



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE TELECOMUNICACIONES**

**INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN  
CURRICULAR, PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**

**TEMA:**

**“SISTEMA DE MONITOREO DE VARIABLES AMBIENTALES Y  
NUTRICIONALES PARA LA ETAPA VEGETATIVA DE CULTIVO  
DE CÁÑAMO MEDICINAL”**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero en Telecomunicaciones**

**Línea de investigación:** Innovación Tecnológica y de productos, conectividad e integración de sistema

**AUTOR:**

Castro Díaz Ismael Daniel

**DIRECTOR:**

Ing. Michilena Calderón Jaime Roberto, MSc

**Ibarra, 2025**

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE BIBLIOTECA  
UNIVERSITARIA**

**IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA**

La Universidad Técnica del Norte dentro del proyecto Repositorio Digital Institucional, determinó la necesidad de disponer de textos completos en formato digital con la finalidad de apoyar los procesos de investigación, docencia y extensión de la Universidad.

Por medio del presente documento dejo sentada mi voluntad de participar en este proyecto, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

| <b>DATOS DE CONTACTO</b>    |                                                                |                    |            |
|-----------------------------|----------------------------------------------------------------|--------------------|------------|
| <b>CÉDULA DE IDENTIDAD:</b> | 1003589304                                                     |                    |            |
| <b>APELLIDOS Y NOMBRES:</b> | Castro Díaz Ismael Daniel                                      |                    |            |
| <b>DIRECCIÓN:</b>           | Ibarra, Barrio Bellavista de Caranqui Av. Atahualpa 43-16      |                    |            |
| <b>EMAIL:</b>               | <a href="mailto:idcastrod@utn.edu.ec">idcastrod@utn.edu.ec</a> |                    |            |
| <b>TELÉFONO FIJO:</b>       |                                                                | <b>TELF. MOVIL</b> | 0996445611 |

| <b>DATOS DE LA OBRA</b>                      |                                                                                                                        |
|----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>TÍTULO:</b>                               | Sistema de monitoreo de variables ambientales y nutricionales para la etapa vegetativa de cultivo de cáñamo medicinal. |
| <b>AUTOR (ES):</b>                           | Castro Díaz Ismael Daniel                                                                                              |
| <b>FECHA:</b>                                | 6 de febrero de 2025                                                                                                   |
| SOLO PARA TRABAJOS DE INTEGRACIÓN CURRICULAR |                                                                                                                        |
| <b>CARRERA/PROGRAMA:</b>                     | <input checked="" type="checkbox"/> <b>GRADO</b> <input type="checkbox"/> <b>POSGRADO</b>                              |
| <b>TÍTULO POR EL QUE OPTA:</b>               | Ingeniero en Telecomunicaciones                                                                                        |
| <b>DIRECTOR:</b>                             | Msc. Jaime Roberto Michilena Calderón                                                                                  |
|                                              | Msc. Edgar Alberto Maya Olalla                                                                                         |

## AUTORIZACIÓN DE USO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD

Yo, Castro Díaz Ismael Daniel, con cédula de identidad Nro. 1003589304 en calidad de autor y titular de los derechos patrimoniales de la obra o trabajo de integración curricular descrito anteriormente, hago entrega del ejemplar respectivo en formato digital y autorizo a la Universidad Técnica del Norte, la publicación de la obra en el Repositorio Digital Institucional y uso del archivo digital en la Biblioteca de la Universidad con fines académicos, para ampliar la disponibilidad del material y como apoyo a la educación, investigación y extensión; en concordancia con la Ley de Educación Superior Artículo 144.

Ibarra, a los 6 días del mes de febrero de 2025

**EL AUTOR:**



.....  
Castro Díaz Ismael Daniel

## CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el (los) titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 6 días, del mes de febrero de 2025

### **EL AUTOR:**



.....  
Castro Díaz Ismael Daniel

**CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE  
INTEGRACIÓN CURRICULAR**

Ibarra, 06 de febrero de 2025

MSC. JAIME ROBERTO MICHILENA CALDERÓN

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICA:

Haber revisado el presente informe final del trabajo de Integración Curricular, el mismo que se ajusta a las normas vigentes de la Universidad Técnica del Norte; en consecuencia, autorizo su presentación para los fines legales pertinentes.



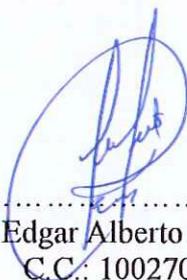
(f) .....  
*Msc. Jaime Roberto Michilena Calderón*  
C.C.: 1002198438

## APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR

El Comité Calificado del trabajo de Integración Curricular “SISTEMA DE MONITOREO DE VARIABLES AMBIENTALES Y NUTRICIONALES PARA LA ETAPA VEGETATIVA DE CULTIVO DE CÁÑAMO MEDICINAL” elaborado por CASTRO DÍAZ ISMAEL DANIEL, previo a la obtención del título de INGENIERO en TELECOMUNICACIONES, aprueba el presente informe de investigación en nombre de la Universidad Técnica del Norte:



(f):.....  
Msc. Jaime Roberto Michilena Calderón  
C.C.: 1002198438



(f):.....  
Msc. Edgar Alberto Maya Olalla  
C.C.: 1002702197

## DEDICATORIA

*El presente trabajo quiero dedicarlo a Dios, por ser la luz que ilumina mi camino, mi fuerza constante y el origen de toda bendición en mi vida.*

*A mi madre, Saira Díaz, por sostenerme con su amor incondicional y por enseñarme que la perseverancia y el cariño pueden superar cualquier obstáculo. Su apoyo ha sido el pilar fundamental de este logro.*

*A mi hermano, Santiago Castro, compañero de cada aventura y confidente de sueños y esperanzas. Gracias por creer en mí y brindarme tu respaldo inquebrantable.*

*A mi familia, en especial a mis tías Daniela Díaz y Erika Díaz, por su aliento permanente y por recordarme siempre el valor de la unidad familiar.*

*A mi querido abuelito, a quien dedico este triunfo con todo mi amor, pues sé que, desde el cielo, continúa guiándome y velando por mi felicidad.*

*A cada uno de ustedes, infinitas gracias por sus oraciones, su afecto y su presencia en cada etapa de mi vida. Sin su amor, dedicación y confianza, este sueño no sería hoy una realidad.*

*Castro Díaz Ismael Daniel*

## AGRADECIMIENTO

*Agradezco, ante todo, a Dios, por ser la fuerza y guía constante en cada paso de mi vida, iluminando mis metas y regalándome la fortaleza para superar cualquier obstáculo.*

*Quiero expresar mi profunda gratitud a mi madre, Saira Díaz, por su apoyo incondicional y por nunca dejar de creer en mí; a mi hermano, Santiago Castro, cuya compañía y amistad han sido un apoyo permanente para seguir adelante; y a toda mi familia, en especial a mis tías Daniela Díaz y Erika Díaz, cuyo cariño y respaldo inquebrantable han sido pilares fundamentales en mi camino. También dedico un especial recuerdo y agradecimiento a mi querido abuelito, quien, desde el cielo, me acompaña y alienta con su amor eterno.*

*Agradezco a la empresa Canna Med Ec y al ingeniero Fernando Pergueza por su generosidad y confianza, al brindarme los recursos necesarios para el desarrollo de este proyecto, haciendo posible la culminación exitosa de este trabajo. Mi gratitud se extiende a mis amigos Bolívar Bolaños, Marco Romero, Ariel Heredia, Keneth Juma, Marco Latacumba y Karlita Moncayo, Edwin Solano, quienes, con sus risas, ayuda y compañerismo han hecho cada reto más llevadero y significativo. Asimismo, agradezco a mis primos Estefanía, Danny, Carla y David, por su presencia constante y sincera motivación, que han demostrado en cada instante la importancia del calor familiar.*

*Quisiera reconocer también a mi tío, Andrés Jacome, y a Byron Caragolla, por ser un pilar de apoyo en los momentos decisivos, brindándome aliento cuando más lo necesitaba.*

*Deseo expresar un agradecimiento muy especial a los ingenieros Jaime Michilena y Edgar Maya. Su generosidad al compartir sus conocimientos, experiencia y tiempo ha*

*sido crucial para mi formación profesional y personal. Las enseñanzas impartidas por ambos no solo enriquecieron mi perspectiva técnica, sino que también me inspiraron a perseguir la excelencia en cada desafío. Su dedicación y disposición para orientar mis inquietudes me permitieron crecer y consolidar las bases necesarias para la realización de este proyecto.*

*A todos ustedes, muchas gracias por creer en mí y acompañarme en este camino. Su amor, fe, apoyo y enseñanzas han sido determinantes para la culminación de este sueño.*

*Castro Díaz Ismael Daniel*

## RESUMEN EJECUTIVO

Este trabajo detalla el diseño e implementación de un sistema de monitoreo basado en tecnología IoT, diseñado específicamente para medir y manejar variables ambientales y nutricionales durante la etapa vegetativa del cultivo de cáñamo medicinal (*Cannabis sativa*, variedad Cherry Oregon Hemp). Su objetivo principal radica en garantizar condiciones óptimas de cultivo, minimizando los riesgos asociados a plagas y enfermedades mediante la supervisión de factores clave como temperatura, luminosidad, pH del suelo y agua, y niveles de macronutrientes (nitrógeno, fósforo y potasio). Este sistema emplea comunicación LoRa para la transmisión eficiente y de largo alcance entre estaciones de monitoreo estratégicamente ubicadas y un Gateway central. Los datos recopilados se procesan mediante el protocolo MQTT, se almacenan en una base de datos InfluxDB y se visualizan en tiempo real a través de un panel interactivo desarrollado en Grafana.

El desarrollo del proyecto siguió una metodología en cascada, estructurada en fases que abarcaron desde la recopilación de requisitos alineada con la norma ISO/IEC/IEEE 29148:2018 hasta el diseño, implementación, pruebas y mantenimiento del sistema. Esta norma permitió definir de manera rigurosa los requisitos funcionales y técnicos del proyecto, asegurando una integración efectiva de sensores, nodos, almacenamiento de datos y herramientas de visualización.

Un aspecto distintivo del sistema es la configuración de alertas basadas en umbrales predeterminados, que facilita la detección temprana de desviaciones en las condiciones críticas del cultivo. Esto resulta esencial para mitigar problemas relacionados con plagas como ácaros y trips, y patógenos como *Pythium spp.*, al garantizar un manejo adecuado de las variables que favorecen el desarrollo saludable del cultivo. Además, el monitoreo

de macronutrientes permite evitar desequilibrios que podrían propiciar infecciones o la proliferación de plagas subterráneas, como nematodos.

**Palabras clave:** IoT, Cáñamo Medicinal, Monitorización de Variables Ambientales, LoRa, Ancho de banda, Factor de expansión, Monitorización de variables nutricionales, MQTT Protocol, Agricultura de precisión, plagas y enfermedades.

## ABSTRACT

This work delineates the design and implementation of a monitoring system based on the Internet of Things (IoT) technology, specifically designed to measure and manage environmental and nutritional variables during the vegetative stage of medicinal hemp (*Cannabis sativa*, Cherry Oregon Hemp variety) cultivation. The primary objective of the system is to ensure optimal growing conditions, minimizing the risks associated with pests and diseases by monitoring key factors such as temperature, luminosity, soil and water pH, and macronutrient levels (nitrogen, phosphorus, and potassium). The system utilizes LoRa communication for efficient, long-range transmission between strategically positioned monitoring stations and a central gateway. The collected data undergoes processing using the MQTT protocol, is stored in an InfluxDB database, and is visualized in real time through an interactive dashboard developed in Grafana.

The development of the project followed a waterfall methodology, structured in phases ranging from requirements gathering aligned with the ISO/IEC/IEEE 29148:2018 standard to the design, implementation, testing and maintenance of the system. This standard made it possible to rigorously define the functional and technical requirements of the project, ensuring effective integration of sensors, nodes, data storage and visualization tools.

A distinctive aspect of the system is the configuration of alerts based on predetermined thresholds, facilitating early detection of deviations in critical crop conditions. This is essential to mitigate problems related to pests such as mites and thrips, and pathogens such as *Pythium* spp. by ensuring proper management of variables that favor healthy crop development. Furthermore, the monitoring of macronutrients is imperative in averting imbalances that could potentially result in infections or the proliferation of subterranean pests, such as nematodes.

**Keywords:** IoT, Medicinal Hemp, Environmental Variables Monitoring, LoRa, Bandwidth, Spreading Factor, Nutritional Variables Monitoring, MQTT Protocol, Precision Agriculture, Pests and Diseases.

## **LISTA DE SIGLAS**

**IoT.** Internet of Things

**MQTT.** Message Queuing Telemetry Transport

**LoRa.** Long Range

**BW.** Ancho de banda

**SF.** Spreading Factor

**LED.** Light Emitting Diode

**ADC.** Convertidor Análogo-Digital

**HTTP.** Hypertext Transfer Protocol

**DS18B20.** Digital Sensor 18B20 (sensor de temperatura)

**BH1750.** Sensor de luminosidad digital

**PH-4502C.** Módulo sensor de pH para agua

**YGC-SM.** Sensor de macronutrientes y pH de suelo

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

|                                                                                                                                    |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| CAPÍTULO I: Antecedentes .....                                                                                                     | 21  |
| 1.1 Problema de investigación .....                                                                                                | 21  |
| 1.2 Objetivos .....                                                                                                                | 23  |
| 1.2.1 Objetivo General .....                                                                                                       | 23  |
| 1.2.2 Objetivos Específicos .....                                                                                                  | 23  |
| 1.3 Alcance .....                                                                                                                  | 24  |
| 1.4 Justificación .....                                                                                                            | 27  |
| CAPÍTULO II: Fundamentación Teórica.....                                                                                           | 28  |
| 2.1 Investigación del cultivo .....                                                                                                | 28  |
| 2.1.1 Origen y propiedades del cannabis .....                                                                                      | 29  |
| 2.2 Ciclo de vida del cannabis .....                                                                                               | 31  |
| 2.2.1 Etapa vegetativa del cáñamo .....                                                                                            | 32  |
| 2.3 Internet de las cosas .....                                                                                                    | 37  |
| 2.3.1 Arquitectura IoT .....                                                                                                       | 38  |
| 2.3.2 Tecnologías inalámbricas para IoT.....                                                                                       | 40  |
| CAPÍTULO III. Diseño e implementación.....                                                                                         | 50  |
| 3.1 Etapa de estudio .....                                                                                                         | 50  |
| 3.1.1 Situación actual de la zona de cultivo de cáñamo en su etapa vegetativa ..                                                   | 51  |
| 3.1.2 Examinar los requisitos del sistema.....                                                                                     | 54  |
| 3.2 Diseño y descripción general del sistema de monitoreo de variables<br>ambientales y nutricionales en el cultivo de cáñamo..... | 66  |
| 3.2.1 Selección de hardware y software para el sistema de monitoreo .....                                                          | 69  |
| 3.2.2 Construcción del sistema de Monitoreo .....                                                                                  | 86  |
| 3.2.3 Programación y calibración de las estaciones de monitoreo .....                                                              | 98  |
| 3.2.4 Programación del nodo Gateway.....                                                                                           | 102 |
| 3.3 Implementación del sistema de monitoreo de variables ambientales y<br>nutricionales del cultivo de cáñamo medicinal.....       | 110 |
| 3.3.1 Implementación del sistema de monitoreo de cultivo de cáñamo medicinal<br>en la etapa vegetativa .....                       | 111 |
| CAPÍTULO IV. Pruebas de funcionamiento.....                                                                                        | 120 |
| 4.1 Análisis General de la comunicación LoRa.....                                                                                  | 120 |
| 4.1.1 Configuración de la comunicación LoRa .....                                                                                  | 121 |
| 4.1.2 Tiempo en el aire para la comunicación LoRa .....                                                                            | 122 |
| 4.1.3 Análisis de envío de datos LoRa .....                                                                                        | 129 |

|       |                                                                                    |     |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.1.4 | Recepción de la señal LoRa usando herramienta de Radio Definida por Software ..... | 133 |
| 4.2   | Evaluación del Sistema de Monitoreo en la Etapa Vegetativa .....                   | 136 |
| 4.2.1 | Monitoreo de Variables Ambientales del cultivo de cáñamo medicinal ..              | 137 |
| 4.2.2 | Monitoreo de Variables Nutricionales.....                                          | 143 |
| 4.3   | Resultados de las Pruebas .....                                                    | 154 |
| 4.3.1 | Análisis de Resultados Obtenidos .....                                             | 154 |
| 4.4   | Discusión sobre los Impactos del Sistema Implementado .....                        | 172 |
| 4.4.1 | Impactos Ambientales .....                                                         | 173 |
| 4.4.2 | Impactos Operativos .....                                                          | 174 |
| 4.4.3 | Beneficios a Largo Plazo y Sostenibilidad .....                                    | 176 |
|       | Conclusiones y Recomendaciones .....                                               | 179 |
|       | Referencias Bibliográficas.....                                                    | 182 |
|       | Anexos .....                                                                       | 186 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|                 |                                                                                           |     |
|-----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Tabla 1</b>  | Niveles óptimos de temperatura en la etapa vegetativa del cáñamo medicinal                | 34  |
| <b>Tabla 2</b>  | Niveles óptimos de luminosidad con LED en el cultivo de cáñamo                            | 35  |
| <b>Tabla 3</b>  | Requerimientos nutricionales del cáñamo medicinal                                         | 36  |
| <b>Tabla 4</b>  | Características de las tecnologías inalámbricas para IoT                                  | 41  |
| <b>Tabla 5</b>  | Estructura PHY LoRa                                                                       | 44  |
| <b>Tabla 6</b>  | Banda de frecuencias sin licencia para Sudamérica                                         | 46  |
| <b>Tabla 7</b>  | Tamaño máximo de la carga útil de la trama LoRa en la banda US902-928                     | 47  |
| <b>Tabla 8</b>  | Asignación de velocidad de datos RX1 de enlace descendente US902-928                      | 49  |
| <b>Tabla 9</b>  | Canal WOR por defecto US902-928                                                           | 49  |
| <b>Tabla 10</b> | Valores medidos en el cultivo de cáñamo en su fase vegetativa                             | 53  |
| <b>Tabla 11</b> | Atribuciones de Stakeholders                                                              | 54  |
| <b>Tabla 12</b> | Nomenclatura para condiciones                                                             | 55  |
| <b>Tabla 13</b> | Condiciones de Stakeholders                                                               | 56  |
| <b>Tabla 14</b> | Exigencias de arquitectura                                                                | 58  |
| <b>Tabla 15</b> | Exigencias del sistema                                                                    | 63  |
| <b>Tabla 16</b> | Condiciones para elección de microcontrolador                                             | 70  |
| <b>Tabla 17</b> | Condiciones de elección de sensor de temperatura                                          | 73  |
| <b>Tabla 18</b> | Condiciones para elección de sensor de luminosidad                                        | 75  |
| <b>Tabla 19</b> | Condiciones de elección de sensor para macronutrientes y pH                               | 76  |
| <b>Tabla 20</b> | Selección de software de programación                                                     | 78  |
| <b>Tabla 21</b> | Elección de hardware para Gateway                                                         | 81  |
| <b>Tabla 22</b> | Elección de Software de Almacenamiento de datos                                           | 84  |
| <b>Tabla 23</b> | Elección de Software de Visualización de Datos                                            | 85  |
| <b>Tabla 24</b> | Librerías que son utilizadas en las estaciones de monitoreo                               | 99  |
| <b>Tabla 25</b> | Parámetros de conexión de Gateway con los servicios                                       | 104 |
| <b>Tabla 26</b> | Resumen de variables monitoreadas                                                         | 112 |
| <b>Tabla 27</b> | Rangos óptimos y efectos asociados del cultivo de cáñamo medicinal en la etapa vegetativa | 117 |
| <b>Tabla 28</b> | Cálculos teóricos para ToA SF7 a SF10                                                     | 125 |
| <b>Tabla 29</b> | Cálculos Teóricos para ToA SF11 y SF12                                                    | 126 |
| <b>Tabla 30</b> | Cálculos de ToA mediante calculadora ToA                                                  | 128 |
| <b>Tabla 31</b> | Eventos en la transmisión de datos LoRa                                                   | 131 |
| <b>Tabla 32</b> | Parámetros configurados de LoRa para SF y BW                                              | 132 |
| <b>Tabla 33</b> | Resumen de registros de Temperatura °C para Estación 1                                    | 139 |
| <b>Tabla 34</b> | Resumen de registros de Temperatura °C para Estación 2                                    | 140 |
| <b>Tabla 35</b> | Resumen de registros obtenidos de Luminosidad (lux) en Estación 1                         | 141 |
| <b>Tabla 36</b> | Resumen de registros obtenidos de Luminosidad (lux) en Estación 2                         | 142 |
| <b>Tabla 37</b> | Resumen de valores registrados de pH de Suelo en Estación 1                               | 145 |
| <b>Tabla 38</b> | Resumen de valores registrados de pH de Suelo en Estación 2                               | 146 |
| <b>Tabla 39</b> | Resumen de valores registrados de pH de Agua para Estación 1                              | 148 |
| <b>Tabla 40</b> | Resumen de valores registrados de pH de Agua para Estación 2                              | 148 |
| <b>Tabla 41</b> | Resumen de valores registrados para Macronutrientes para Estación 1                       | 150 |
| <b>Tabla 42</b> | Resumen de valores registrados para Macronutrientes para Estación 2                       | 152 |

|                                                                                                               |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Tabla 43</b> Resumen de valores promedio, máximos y mínimos de variables ambientales y nutricionales ..... | 165 |
| <b>Tabla 44</b> Resumen de Impactos Ambientales del sistema de monitoreo.....                                 | 174 |
| <b>Tabla 45</b> Resumen de Impacto Operativo del sistema de monitoreo .....                                   | 175 |
| <b>Tabla 46</b> Resumen de los Impactos, Sostenibilidad y Beneficios a Largo Plazo .....                      | 177 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                                                                        |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Figura 1</b> Arquitectura de proyecto planteada. ....                                                                               | 26  |
| <b>Figura 2</b> Cábano medicinal (izquierda) y marihuana (derecha) .....                                                               | 30  |
| <b>Figura 3</b> Arquitectura IoT.....                                                                                                  | 38  |
| <b>Figura 4</b> Arquitectura de LoraWAN .....                                                                                          | 45  |
| <b>Figura 5</b> Zona de cultivo de cábano medicinal. ....                                                                              | 51  |
| <b>Figura 6</b> Fase vegetativa del cábano medicinal.....                                                                              | 52  |
| <b>Figura 7</b> Arquitectura del sistema de monitoreo de variables ambientales y<br>nutricionales del cultivo de cábano medicinal..... | 67  |
| <b>Figura 8</b> Microcontrolador LORA 32 V3.....                                                                                       | 71  |
| <b>Figura 9</b> Sensor de Temperatura DS18B20.....                                                                                     | 74  |
| <b>Figura 10</b> Sensor de luminosidad BH1750.....                                                                                     | 75  |
| <b>Figura 11</b> Sensor para medir macronutrientes y pH de suelo.....                                                                  | 77  |
| <b>Figura 12</b> IDE de Arduino .....                                                                                                  | 79  |
| <b>Figura 13</b> Microcontrolador LoRa32 V3 para Gateway.....                                                                          | 82  |
| <b>Figura 14</b> Interfaz del SO Raspbian .....                                                                                        | 83  |
| <b>Figura 15</b> Diagrama de conexiones de estaci3n de monitoreo 1 .....                                                               | 86  |
| <b>Figura 16</b> Diagrama de conexiones para la estaci3n de monitoreo 2 .....                                                          | 87  |
| <b>Figura 17</b> Diagrama de conexiones en Estaci3n Gateway .....                                                                      | 88  |
| <b>Figura 18</b> Diagrama de flujo de estaciones de monitoreo del cultivo de cábano<br>medicinal. ....                                 | 90  |
| <b>Figura 19</b> Diagrama de flujo de estaci3n Gateway del cultivo de cábano medicinal ..                                              | 92  |
| <b>Figura 20</b> Pruebas de funcionamiento del sensor DS18B20 en diferentes ambientes ..                                               | 94  |
| <b>Figura 21</b> Pruebas de funcionamiento del sensor BH1750 en diferentes ambientes de<br>luz .....                                   | 95  |
| <b>Figura 22</b> Pruebas de funcionamiento del sensor PH-4502C en agua potable.....                                                    | 96  |
| <b>Figura 23</b> Lectura de valores macronutrientes y pH de Suelo.....                                                                 | 97  |
| <b>Figura 24</b> Bibliotecas requeridas para el funcionamiento de Estaciones de monitoreo                                              | 98  |
| <b>Figura 25</b> C3digo de funcionamiento del sensor DS18B20 .....                                                                     | 99  |
| <b>Figura 26</b> C3digo de funcionamiento del sensor BH1750 de luz.....                                                                | 100 |
| <b>Figura 27</b> C3digo de funcionamiento del m3dulo PH-4502C.....                                                                     | 102 |
| <b>Figura 28</b> Conexiones del Gateway con el Br3dker MQTT, LoRa y base de datos<br>InfluxDB.....                                     | 103 |
| <b>Figura 29</b> Publicaci3n de los datos de los sensores a sus distintos t3picos para estaci3n<br>1 y 2 .....                         | 105 |
| <b>Figura 30</b> Instalaci3n de paquetes relacionados a InfluxDB .....                                                                 | 105 |
| <b>Figura 31</b> Visualizaci3n de servicio InfluxDB desde un navegador web .....                                                       | 106 |
| <b>Figura 32</b> Estado de servicio Grafana .....                                                                                      | 107 |
| <b>Figura 33</b> Visualizaci3n del panel de control en Grafana .....                                                                   | 107 |
| <b>Figura 34</b> Configuraci3n de reglas en Grafana. ....                                                                              | 108 |
| <b>Figura 35</b> Estructura del mensaje de alerta en Telegram .....                                                                    | 109 |
| <b>Figura 36</b> Mensaje cuando no existen alertas activas en Telegram.....                                                            | 110 |
| <b>Figura 37</b> Sistema de monitoreo para Estaci3n 1 .....                                                                            | 113 |
| <b>Figura 38</b> Sistema de monitoreo para la Estaci3n 2. ....                                                                         | 114 |
| <b>Figura 39</b> Estaci3n Nodo central Gateway .....                                                                                   | 115 |

|                                                                                                                                                        |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Figura 40</b> Tamaño de Payload.....                                                                                                                | 123 |
| <b>Figura 41</b> Calculadora LoRa para el ToA .....                                                                                                    | 127 |
| <b>Figura 42</b> Resultados del cálculo de ToA.....                                                                                                    | 127 |
| <b>Figura 43</b> Captura de paquete LoRa mediante CubicSDR.....                                                                                        | 133 |
| <b>Figura 44</b> Visualización de paquete LoRa CubicSDR .....                                                                                          | 134 |
| <b>Figura 45</b> Muestra de la señal SF7 en el dominio del tiempo y frecuencia.....                                                                    | 135 |
| <b>Figura 46</b> Obtención de registros para Temperatura Estación 1 .....                                                                              | 138 |
| <b>Figura 47</b> Dashboard del Sistema de Monitoreo de Variables ambientales y<br>nutricionales .....                                                  | 155 |
| <b>Figura 48</b> Valor en tiempo real de Temperatura (°C) Estación 1.....                                                                              | 157 |
| <b>Figura 49</b> Valor en tiempo real de Temperatura (°C) Estación 2.....                                                                              | 158 |
| <b>Figura 50</b> Valor en tiempo real de Luminosidad (lux) Estación 1 .....                                                                            | 160 |
| <b>Figura 51</b> Valor en tiempo real de Luminosidad (lux) Estación 2 .....                                                                            | 160 |
| <b>Figura 52</b> Valor en tiempo real de pH de Agua y Suelo de Estación 1.....                                                                         | 162 |
| <b>Figura 53</b> Valor en tiempo real de pH de Agua y Suelo de Estación 2.....                                                                         | 162 |
| <b>Figura 54</b> Valores en tiempo real de Macronutrientes en Estación 1.....                                                                          | 164 |
| <b>Figura 55</b> Valores en tiempo real de Macronutrientes en Estación 2.....                                                                          | 164 |
| <b>Figura 56</b> Planta cáñamo medicinal (variedad Cherry Oregon Hemp.).....                                                                           | 167 |
| <b>Figura 57</b> Envío de mensajes de alerta a Telegram.....                                                                                           | 168 |
| <b>Figura 58</b> Incidencia de patógeno Pythium spp en cáñamo medicinal .....                                                                          | 170 |
| <b>Figura 59</b> Instalación del sensor YGC-SM para macronutrientes (nitrógeno, fósforo y<br>potasio) y pH de suelo en la Estación de monitoreo 2..... | 190 |
| <b>Figura 60</b> Código de colores para las variables ambientales en Grafana.....                                                                      | 191 |
| <b>Figura 61</b> Configuración de las alertas para las variables ambientales y nutricionales en<br>Grafana. ....                                       | 192 |
| <b>Figura 62</b> Notificación generada y enviada por Telegram alertando sobre un nivel<br>crítico de macronutrientes. ....                             | 192 |

## **CAPÍTULO I: Antecedentes**

### **1.1 Problema de investigación**

La cantidad de luz, nutrientes, agua recibida, fotoperíodo y las temperaturas diurnas y nocturnas son factores cruciales que influyen en el crecimiento, desarrollo y rendimiento de diferentes genotipos de cáñamo. De acuerdo con Zhang et al., (2021) los estudios han revelado que la variación en los factores ambientales puede afectar el tiempo de floración y las características de ámbito sexual.

El cáñamo es una planta de día, sensible a los fotoperíodos. Requiere de un fotoperíodo de 12 a 14 horas de luz para la mayoría de los genotipos de cáñamo. Un fotoperíodo (días más largos y noches más cortas o mayor exposición a la luz) aumenta la altura de la planta, retrasa la floración y prolonga la etapa vegetativa, la cual es adecuada para la producción de cogollos (Hall et al., 2014).

La temperatura para el desarrollo óptimo de cáñamo varía según los genotipos y su origen, oscila entre los 25 °C a 28 °C. Los cambios estacionales en la temperatura media diaria pueden afectar la producción y calidad de semillas. El cáñamo es un desafío en las regiones tropicales y subtropicales en comparación con las de latitudes altas, debido a la alta temperatura, la humedad y la mayor presión con respecto a plagas. Los períodos de oscuridad más largos en estas regiones provocan una transición temprana de la etapa vegetativa a la de floración, lo que limita el alargamiento del tallo (Cosentino et al., 2012).

En la empresa SachaPharma, mantienen sus cultivos de cáñamo subdivididos por etapas de acuerdo con el ciclo de crecimiento de la planta, por lo cual, requiere mantener un control y monitoreo en sus cultivos como parte esencial en la etapa vegetativa, puesto que, es la etapa intermedia entre la germinación de semillas y la floración del cannabis medicinal. Los parámetros por considerar son los niveles de luminosidad, temperatura óptima, pH de agua y suelo, y los nutrientes que requiere.

Estos factores son monitoreados manualmente por las personas encargadas de la plantación, además de controlar con distintos dispositivos que se mantengan en las mejores condiciones todos estos parámetros y se reduzca el impacto de plagas y enfermedades. Implementar un sistema que se encargue de monitorear estos parámetros de forma automática con sensores permite a los agrónomos una mejor percepción del cultivo y sus cambios en toda la etapa vegetativa, lo cual, posibilita conocer cuando la planta requiera aumentar o disminuir los niveles para estos factores que influyen en el crecimiento de la planta.

## **1.2 Objetivos**

### ***1.2.1 Objetivo General***

Monitorear las condiciones ambientales y nutricionales para la fase vegetativa del cultivo de cáñamo, con la finalidad de mantener el control del cáñamo medicinal y minimizar el impacto de enfermedades y plagas.

### ***1.2.2 Objetivos Específicos***

- Realizar un análisis del cultivo de cáñamo para la etapa vegetativa a través de un estudio bibliográfico de los componentes y examinar los mejores sensores y dispositivos a utilizar.
- Determinar los factores en la fase vegetativa del cáñamo, mediante el monitoreo de las plantas con sensores que permitan recolectar en diferentes periodos de tiempo al día los datos receptados y dar seguimiento a los cambios surgidos en la planta.
- Diseñar un sistema de monitoreo que satisfaga los factores ambientales y nutricionales de temperatura, luminosidad, pH de agua y suelo, que permitan un control óptimo en el cultivo de cáñamo.
- Realizar las pruebas de funcionamiento del sistema de monitoreo con el fin de validar su funcionamiento en la fase vegetativa de cáñamo.

### 1.3 Alcance

El presente proyecto tiene objetivo principal, la optimización de las condiciones ambientales y nutricionales con tecnología, con la finalidad de controlar esos factores en la planta de cáñamo medicinal en la etapa vegetativa y minimizar el impacto de plagas y enfermedades. El sistema se llevará a cabo con un enfoque lineal y secuencial como lo describe la metodología en cascada propuesta por Winston W. Royce la cual consta de cinco fases que se describen a continuación:

Para el proyecto se tiene la fase de requisitos la cuál conlleva un análisis de las condiciones donde interactúan los factores como temperatura, pH de agua y suelo, luminosidad que influyen en el cultivo de cáñamo. Conservar los niveles óptimos para que estos factores se mantengan estables es la parte fundamental al momento de implementar un sistema de monitoreo que se encargue de sustentar a partir del estudio y análisis del cultivo de cáñamo medicinal y determinar unas condiciones adecuadas en su etapa vegetativa.

Por tal motivo, en el cultivo de cáñamo medicinal se realizará el análisis de sensores e infraestructura necesaria en cada estación de trabajo que abarque cada uno de estos parámetros, mediante tecnología inalámbrica se podrá conectar los diferentes nodos que se encuentran monitoreando constantemente las variables de forma sectorizada.

La etapa de diseño conlleva luego del análisis de la tecnología inalámbrica y los sensores la obtención de los datos para los factores del tema de estudio; al diseñar una red de sensores que irán distribuidos en diferentes puntos como estaciones, permite capturar los datos en distintas etapas de la fase vegetativa del cáñamo además de verificar las zonas estratégicas para la obtención de datos.

Considerando todos los factores que influyen en esta fase del ciclo de cultivo de cáñamo, se realiza la calibración de los sensores para asegurar unas mediciones y toma de datos fiables y precisas en el cáñamo.

Tras el análisis de las condiciones de las plantas de cáñamo y de verificar que tipo de planta a monitorear y seleccionar la tecnología inalámbrica a usar, se procede a desarrollar un sistema de comunicación con dicha tecnología, con la finalidad de poder transmitir los datos recopilados por las estaciones hacia la estación central o Gateway y poder tratarlos en una plataforma de visualización de datos.

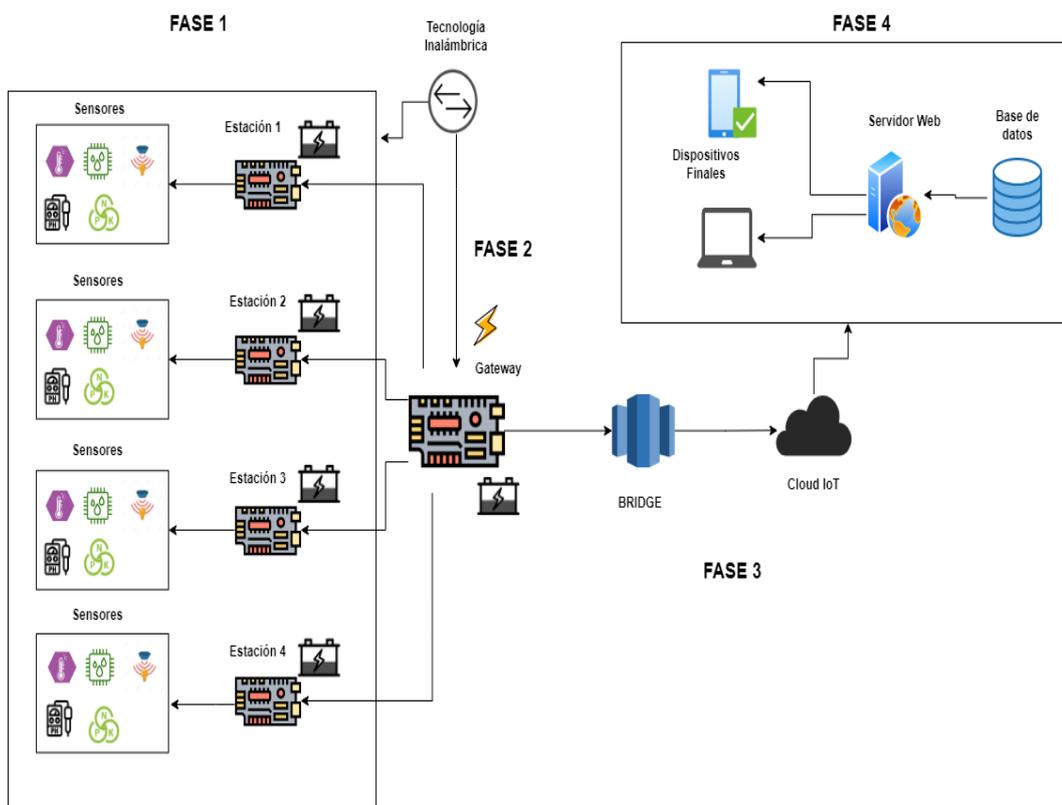
La implementación de esta red de sensores se basa en construir la topología mostrada en la Figura 1 considerando que se seleccionaron los sensores adecuados dentro del mercado para garantizar el correcto funcionamiento de la red. La topología se encuentra constituida por 4 estaciones con 4 sensores, un nodo central, un servidor de red y un aplicativo web. Para la obtención de los datos recopilados por cada uno de los sensores, las estaciones transmitirán los datos obtenidos hacia el nodo central, que se encargará de receptor los datos de toda la red y retransmitirlos hacia un servidor de red para su procesamiento con la finalidad de monitorear y controlar estos factores en la etapa vegetativa del cáñamo.

La verificación de la red de sensores por estaciones estará sujeta a pruebas y análisis de datos obtenidos por la red de sensores, verificando que se mantengan los niveles óptimos de temperatura, pH de agua y suelo, luminosidad que se pueden visualizar en el aplicativo web, así como también, enviar alertas para que prevalezcan las condiciones adecuadas en el cáñamo. En caso de presentar fallo en el sistema, se procederá a realizar los mantenimientos necesarios para un correcto funcionamiento de este sistema de sensores.

Por último, la fase de mantenimiento consiste en monitorear cada uno de los factores que conforman el sistema de sensores, microprocesadores, servidor de red y aplicativo web puesto que, utilizar tecnologías inalámbricas necesita un mantenimiento de red de sensores funcional por un período de tiempo prolongado.

**Figura 1**

*Arquitectura de proyecto planteada.*



## 1.4 Justificación

El Pleno de la Asamblea Nacional aprobó el 17 de septiembre de 2019 el uso de derivados del cannabis para fines medicinales y terapéuticos, permitiendo así la producción, comercialización, distribución, uso y consumo de cannabis con un contenido inferior al 1% de tetrahidrocannabinol (THC) que tiene propiedades industriales y no recreativas.

Según lo expuesto por Ponce Bueno y Jordán Zamora (2023) el Internet de las cosas (IoT) ha revolucionado los procesos agrícolas. Esta tecnología permite recoger, almacenar y procesar datos en tiempo real mediante la implementación de sensores, proporcionando información vital sobre los cultivos, como la humedad, temperatura, nutrientes y otros factores esenciales para lograr cosechas productivas y mejorar la economía del país.

Según Acevedo-Bedoya (2021), el uso de sensores ha generado resultados favorables en la agricultura de precisión, al facilitar la toma de decisiones adecuadas y proporcionar un manejo óptimo para los cultivos. La agricultura de precisión se ha convertido en una tendencia dominante, en la cual se busca maximizar los recursos disponibles para todo tipo de especies cultivadas, permitiendo un control eficiente en la utilización óptima de dichos recursos.

De acuerdo con Alonso, Menoni y Saravia (2022), la luz es un factor crucial en el cultivo indoor de cannabis, ya que no solo influye de manera significativa en el crecimiento de la planta, sino también en otros parámetros relevantes. Cualquier aumento o disminución en la intensidad luminosa también conlleva una variación correspondiente en los demás factores para mantener la salud de la planta. Además, suele requerir una inversión económica considerable. Aunque existen diferentes opiniones sobre el régimen horario óptimo, la configuración más comúnmente utilizada consta de 18 horas de luz y 6 horas de oscuridad diarias durante la fase de crecimiento vegetativo, mientras que en la fase de floración se igualan las horas de luz y oscuridad.

## **CAPÍTULO II: Fundamentación Teórica**

Este capítulo profundizará en los requerimientos para administrar de manera adecuada los factores ambientales y nutricionales del cultivo de cáñamo en Canna Med Ec., considerando aspectos como investigación del cultivo en el que se aborda el origen y propiedades del cannabis, las condiciones climáticas y nutricionales. Se enfocará en explorar a partir de soluciones tecnológicas como lo realizan las aplicaciones de Internet de las Cosas (IoT), para abordar el monitoreo de los factores ambientales y macronutrientes en la etapa vegetativa del cultivo de cáñamo medicinal, teniendo en cuenta sus necesidades en esta etapa crucial. Además, se realizará una comparación detallada de tecnologías de redes de área amplia de bajo consumo (LPWAN) para la red de comunicación. Este proceso permitirá identificar los factores críticos para la correcta medición efectiva de los factores ambientales que inciden en el desarrollo ideal del cultivo de cáñamo.

### **2.1 Investigación del cultivo**

En los últimos años, numerosos países han optado por despenalizar el consumo de marihuana, ya sea con fines recreativos o medicinales. Este es el caso de naciones como Estados Unidos o Canadá, las cuales se han posicionado como potencias en la producción y el consumo de cannabis. En Estados Unidos, son 30 los estados donde se ha legalizado el uso medicinal de la marihuana, mientras que en Canadá tanto el consumo recreativo como el medicinal se encuentran totalmente legalizados, al igual que en Uruguay (Palmira, 2020). Debido a esto, el cultivo de Cannabis se ha convertido en una gran oportunidad de negocio, con la generación de importantes ingresos económicos, y es una actividad que está experimentando un rápido crecimiento.

Los cultivadores de cannabis necesitarán aumentar su producción para satisfacer la creciente demanda de los consumidores, lo que implica incrementar la cantidad de cultivos. Es evidente la importancia de los métodos actuales utilizados en el proceso de producción de

cannabis, los cuales se enfocan en diversas variables como las condiciones climáticas, la ubicación geográfica, los entornos legales vigentes y, lo más relevante, la inversión de capital necesaria para iniciar un cultivo de esta planta.

En la antigüedad, el cáñamo, también conocido como cannabis sativa, se cultivaba al aire libre, dado que no existían restricciones legales contra la marihuana, lo que permitía obtener grandes volúmenes de producción a bajos costos. Posteriormente, los cultivadores comenzaron a plantar las semillas dentro de instalaciones o invernaderos, los cuales requerían mayor cuidado y, por consiguiente, mayores costos. Sin embargo, en la actualidad, esto ha representado una ventaja competitiva para muchos agricultores, ya que les brinda un control total sobre cada aspecto del proceso, lo que se traduce en un mayor número de cultivos por año.

### ***2.1.1 Origen y propiedades del cannabis***

El Cannabis, también conocido como Cáñamo o Marihuana, es una planta de origen himalayo que se halla distribuida en todo el mundo en la actualidad. A lo largo de la historia, esta planta ha sido empleada con diversos fines desde tiempos antiguos (Rodríguez, 2019). Desde que se descubrió, se ha relacionado con sus cualidades terapéuticas, su utilidad y las aplicaciones de sus fibras. Además, en distintas culturas, se ha incorporado su consumo recreativo, reconociendo los efectos psicotrópicos que produce.

Las propiedades del Cannabis sativa es que contiene más de 400 compuestos químicos diferentes, de los cuales al menos 60 son cannabinoides únicos de esta especie vegetal. Los tres cannabinoides más relevantes, debido a sus efectos psicoactivos, son el THC, el cannabidiol (CBD) y el cannabino. Mientras que el THC es el principal responsable de la mayoría de los efectos, el cannabino posee una actividad diez veces menor que el THC. Por otro lado, el cannabidiol presenta un perfil distinto, ya que exhibe propiedades ansiolíticas y sedantes. Las

propiedades curativas del cannabis eran aprovechadas para el tratamiento de diversas dolencias en los antiguos sistemas médicos tradicionales de China, India y Tíbet. Esta planta formaba parte de los remedios herbales empleados en la medicina herbal china, la medicina ayurvédica india y la medicina tibetana para aliviar una extensa gama de padecimientos.

### ***2.1.1.1 Cáñamo medicinal***

Se denomina cáñamo medicinal al empleo de determinadas variedades de la planta cannabis sativa, que poseen componentes ventajosos, como el cannabidiol (CBD), con el fin de aliviar y tratar distintas dolencias y problemas de salud (Rodríguez & Fontaine, 2020)

## **Figura 2**

*Cáñamo medicinal (izquierda) y marihuana (derecha)*



Fuente: Obtenido de MedlinePlus (2024)

El cáñamo y la marihuana son variedades distintas de la planta de cannabis que difieren en su composición química y aspecto físico. El cáñamo se destaca por contener niveles muy bajos de THC (tetrahidrocannabinol), el compuesto psicoactivo responsable de los efectos eufóricos, generalmente menos del 0.3%. En cambio, la marihuana es un híbrido con concentraciones más altas de THC, que pueden oscilar entre el 5% y el 30% o más. Además,

el cáñamo tiene altos niveles de cannabidiol (CBD), un compuesto no psicoactivo asociado con posibles beneficios para la salud.

En cuanto a su apariencia, el cáñamo es una planta alta y delgada, con hojas estrechas, mientras que la marihuana suele ser más baja y frondosa, con hojas más anchas. Estas diferencias en composición y morfología tienen implicaciones significativas en su legalidad, regulaciones y aplicaciones.

A diferencia del cannabis utilizado con fines recreativos, el cáñamo medicinal se cultiva para contener niveles muy reducidos de tetrahidrocannabinol (THC), el componente psicoactivo de dicha planta. El CBD extraído del cáñamo ha demostrado ser eficaz para tratar enfermedades y problemas de salud, lo cual ha propiciado un aumento significativo en el mercado de productos derivados del CBD en los últimos años.

## **2.2 Ciclo de vida del cannabis**

El desarrollo de la planta de Cannabis consta principalmente de las siguientes etapas: germinación de las semillas, plántula, fase vegetativa y floración. Cada una de estas etapas tiene requerimientos ambientales y nutricionales específicos, incluso diferentes ciclos de exposición a la luz y a la oscuridad (fotoperiodos).

**Fase de germinación de semillas:** Las semillas de cannabis se siembran en un sustrato rico en nutrientes, manteniéndolas húmedas y con una temperatura que oscila entre los 20-30°C. El proceso de germinación puede tomar entre 1 y 3 semanas, dependiendo de las condiciones ambientales presentes (Rodríguez & Fontaine, 2020).

**Etapas de plántula:** Luego de germinar, la plántula inicia su desarrollo, formando un sistema radicular y generando sus primeras hojas. Durante este período, es importante evitar un riego excesivo y asegurar un buen drenaje del medio de cultivo. El sustrato debe mantener un rango de pH entre 6 y 7 (Rodríguez & Fontaine, 2020).

**Fase vegetativa:** En esta etapa, la planta incrementa su altura y tamaño, produciendo hojas y tallos. Puede mostrar prefloras que indiquen su sexo, pero los cogollos (flores) solo comenzarán a formarse cuando los días se acorten o cuando se modifique el fotoperiodo a un ciclo de 12 horas de luz y 12 horas de oscuridad (Rodríguez & Fontaine, 2020). La duración de este período puede variar entre 3 y 16 semanas, dependiendo de las condiciones ambientales y de la variedad de cannabis cultivada.

**Etapa de floración:** Durante esta fase, las plantas hembra producen las flores, mientras que las plantas macho generan el polen. El período de floración puede extenderse entre 6 y 12 semanas, según los factores ambientales presentes (Rodríguez & Fontaine, 2020).

Las necesidades ambientales y de nutrientes varían dependiendo de su desarrollo, en la que se debe considerar la fase en las que se requiera mayores cuidados a otras etapas. Por lo tanto, este trabajo se centrará en la etapa vegetativa, la cual resulta crucial para permitir el desarrollo completo de la planta y su crecimiento máximo antes de llegar a la floración.

### ***2.2.1 Etapa vegetativa del cáñamo***

La fase vegetativa es el periodo intermedio del ciclo de vida de la planta de cannabis. Sucede tras la etapa de germinación y precede a la floración. Esta es la etapa en la que las plantas realmente se desarrollan y se enfocan en crecer al máximo antes de florecer. Durante este período, las plantas de cannabis requieren mucha energía y necesitarán abundante luz y nutrición para producirla (Muñoz, 2022).

Esta etapa se distingue por el desarrollo del tallo y las hojas, siendo lento al inicio, cuando se forman hasta cinco pares de hojas verdaderas y los espacios entre nudos son cortos. Posteriormente, el tallo crece rápidamente y los espacios entre nudos se incrementan.

Durante esta etapa, la planta adquiere la forma característica de una planta de cannabis y crecerá rápidamente tanto en altura como en anchura, desarrollando un tallo más grueso con

numerosas ramas y hojas completas. Este crecimiento maximiza la capacidad de la planta para producir flores al contar con una mayor superficie expuesta a la luz y una estructura más sólida, lo cual es, en definitiva, el propósito de cultivar cannabis (Muñoz, 2022).

La fase vegetativa no tiene una duración fija. Típicamente oscila entre 3 y 16 semanas, dependiendo de la genética de la cepa y los objetivos de cultivo. En algunos casos, puede prolongarse indefinidamente: por ejemplo, los cultivadores pueden mantener plantas madre en estado vegetativo durante años y tomar esquejes periódicamente.

Las plantas sensibles al fotoperiodo inician su floración a medida que los días se vuelven más cortos. Permanecen en la etapa vegetativa mientras haya 16 horas diarias de luz; el proceso de floración comienza cuando la duración del día disminuye a 12 horas.

Las plantas autoflorecientes pasan a la etapa vegetativa en función de su edad y no del ciclo de luz. Normalmente vegetan durante 5 a 6 semanas y florecen automáticamente, sin importar la duración de los días y las noches. Rinden mejor cuando reciben 18 horas o más de luz diaria (Homegrown Cannabis Co, 2024).

### ***2.2.1.1 Niveles de Temperatura***

Según Anwar et al. (2018), el cáñamo silvestre de tres áreas agroclimáticas diferentes tuvo un crecimiento óptimo en un clima templado y húmedo con temperaturas que oscilaron entre los 16 y 27 °C. Los cambios estacionales en la temperatura promedio diaria pueden tener un impacto en la producción y calidad de las semillas, así como en la acumulación de biomasa y aceite de las semillas. Por lo tanto, es crucial identificar variedades. En la Tabla 1 se presenta los niveles óptimos de temperatura en la etapa vegetativa del cultivo de cáñamo medicinal.

**Tabla 1***Niveles óptimos de temperatura en la etapa vegetativa del cáñamo medicinal*

| <b>Etapa</b> | <b>Niveles óptimos de temperatura con luces encendidas</b> | <b>Niveles óptimos de temperatura con luces apagadas</b> |
|--------------|------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| Vegetativa   | 20° - 25°                                                  | 20° - 25° con una variación de menos 4° - 5°.            |

### **2.2.1.2 Niveles de luminosidad**

El cáñamo es una planta influenciada por la duración del día, o sea, por los fotoperíodos. Investigaciones han revelado que el cáñamo necesita un tiempo de luz que oscile entre las 12 y 14 horas diarias. En la mayoría de los genotipos de cáñamo, si el período de luz es más extenso (días más largos y noches más cortas, o una mayor exposición a la luz), la planta crecerá más alta, la etapa vegetativa se prolongará y la floración se retrasará, lo que resulta beneficioso para la producción de fibra y biomasa (Sunoj Valiaparambil Sebastian et al., 2023). En contraste, si el período de oscuridad es mayor, la floración ocurre más temprano y la producción se ve limitada.

El requerimiento de iluminación en el cultivo de cannabis no es constante, sino que depende de la etapa de desarrollo de la planta. En este sentido, es importante considerar que las plantas jóvenes o plántones no demandan una alta intensidad lumínica. Sin embargo, cuando atraviesan la fase de crecimiento vegetativo, requieren la máxima exposición a la luz que sea posible proporcionarles. En la Tabla 2 se detalla los niveles de lúmenes por metro cuadrado recomendados:

**Tabla 2***Niveles óptimos de luminosidad con LED en el cultivo de cáñamo*

| <b>Fase</b> | <b>Lux (<i>lum/m<sup>2</sup></i>)</b> |
|-------------|---------------------------------------|
| Esquejes    | 5000 – 10000 lux                      |
| Vegetativa  | 15000 – 50000 lux                     |
| Floración   | 50000 – 75000 lux                     |

**Nota:** Según la guía sobre luz artificial para el cultivo de cáñamo en interior, se recomienda una luminosidad de al menos 20000 lúmenes por metro cuadrado con focos LED para la etapa vegetativa del cultivo de cáñamo medicinal.

### **2.2.1.3 Niveles de pH de agua y suelo**

El valor de pH nos señala el nivel de acidez o alcalinidad de un líquido. El pH se calcula hallando la concentración del ion de hidrógeno con carga positiva (H<sup>+</sup>). El valor del pH representa el potencial de hidrógeno de una disolución, el cual se expresa mediante la fórmula:  $pH = -\log[H_3O^+]$  donde,

- pH: Es la medida de acidez o basicidad de una solución, en una escala de 0 a 14.
- log: Representa el logaritmo en base 10.
- [H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>]: Es la concentración de iones de hidronio (H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>) en la solución, que está relacionada con la acidez.

Las plantas de cannabis prosperan en un rango de pH de ligeramente ácido a neutro, normalmente entre 6,0 y 7,0. En los cultivos de marihuana en tierra o suelo se mantiene un pH regular entre 6.0-6.2 para la zona de las raíces.

En cuanto al agua usada para riego, se conserva un nivel de pH entre 6,0 y 7,0 para garantizar que las raíces de las plantas de cáñamo puedan absorber los nutrientes

adecuadamente. Mantener el pH dentro de este rango es importante para evitar problemas nutricionales y garantizar un entorno propicio para el crecimiento saludable de las plantas.

#### **2.2.1.4 Niveles de nutrientes**

La planta de cáñamo medicinal necesita atenciones particulares para asegurar un crecimiento idóneo y una producción de calidad. Los niveles de macronutrientes constituyen uno de los factores más relevantes para el desarrollo saludable de las plantas de cáñamo medicinal.

La mayoría de los aportes nutricionales se hacen durante la preparación del lecho de siembra. En lo que respecta al fósforo (P) y el potasio (K), se limitan a reponer las cantidades que la planta extrae del suelo. El nitrógeno (N) favorece el desarrollo vegetativo de la planta, pero un exceso de este incrementa la competencia entre las plantas, provocando que sobrevivan únicamente las más fuertes y robustas, disminuyendo así la cantidad de plantas por metro cuadrado (Ortega, 2022).

En la Tabla 3 se realiza un resumen de los niveles de macronutrientes en cada fase del ciclo de vida del cáñamo en unidades de concentración en peso.

**Tabla 3**

*Requerimientos nutricionales del cáñamo medicinal*

| <b>Etapa</b> | <b>Macronutrientes en concentración en peso</b> |                |                |
|--------------|-------------------------------------------------|----------------|----------------|
|              | <b>(masa/masa) mg/kg</b>                        |                |                |
|              | <b>Nitrógeno</b>                                | <b>Potasio</b> | <b>Fósforo</b> |
| Germinación  | 100                                             | 140            | 40             |
| Vegetativa   | 350                                             | 60             | 215            |
| Floración    | 110                                             | 70             | 200            |

Fuente: Ortega (2022)

**Nota:** Si se aplica nitrógeno en exceso, puede resultar peligroso porque propicia que las plantas se doblen y se quiebren sus tallos. En general, un exceso de nitrógeno aumenta la mortandad de plantas y aumenta el diámetro y la altura de las plantas sobrevivientes.

En la agricultura contemporánea, es fundamental asegurar un monitoreo eficaz de los niveles ambientales y nutricionales en el cultivo de cáñamo medicinal. La implementación de tecnologías de Internet de las Cosas (IoT) permite a los productores acceder a sistemas de supervisión en tiempo real para evaluar con exactitud los factores ambientales en la etapa vegetativa del cultivo. Esta capacidad tecnológica brinda información detallada sobre los requerimientos de las plantas de forma instantánea y posibilita realizar ajustes remotos de acuerdo con las condiciones ambientales que lo demanden. Al aplicar sistemas con tecnología IoT en el proceso de cultivo de cáñamo medicinal, los agricultores pueden optimizar los recursos y mejorar la eficiencia de la plantación, lo que produce un crecimiento significativo en la productividad y calidad de las plantas cultivadas.

### **2.3 Internet de las cosas**

El Internet de las Cosas (IoT) es un concepto ambicioso con impactos tecnológicos y sociales significativos. Técnicamente, IoT se concibe como una infraestructura global de la sociedad de la información que permite ofrecer servicios avanzados al interconectar objetos físicos y virtuales utilizando tecnologías de información y comunicación actuales y futuras. Aprovechando las capacidades de identificación, obtención de datos, procesamiento y comunicación, IoT explota plenamente los "objetos" para proveer servicios a diversas aplicaciones, garantizando al mismo tiempo el cumplimiento de los requisitos de seguridad y privacidad

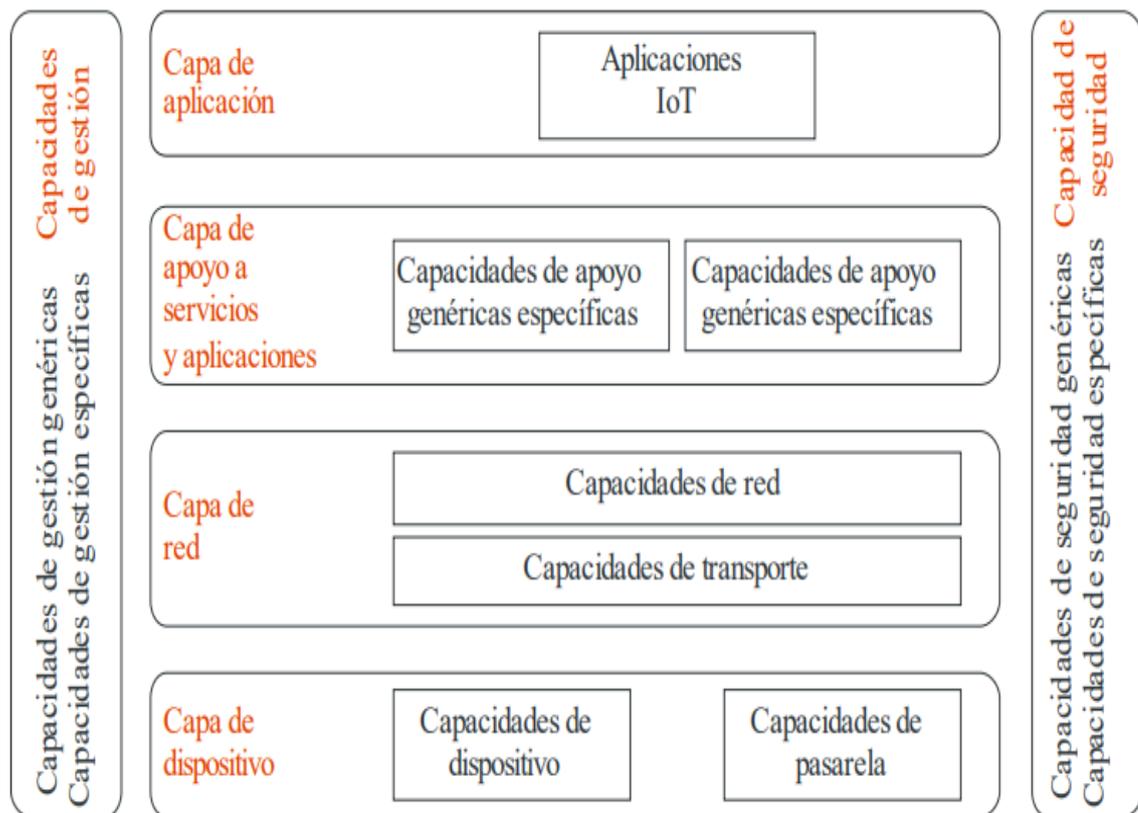
Según Laverde & Laverde (2021) la implementación de Internet de las Cosas en la agricultura posibilita la recopilación de datos que pueden contribuir a identificar mayores oportunidades para optimizar el desempeño de la planta y aumentar su productividad.

### 2.3.1 *Arquitectura IoT*

La arquitectura de Internet de las Cosas (IoT) hace referencia al diseño y estructura de los sistemas que utilizan IoT, una red interconectada de dispositivos físicos capaces de recopilar y compartir datos. La arquitectura IoT se enfoca en el diseño y la estructura de estos sistemas basados en IoT, una red de dispositivos físicos interconectados que pueden recolectar y transmitir información (Vélez, 2019). En la Figura 3 se presenta las cuatro capas del modelo y las capacidades de gestión y seguridad que conforman la arquitectura IoT

**Figura 3**

*Arquitectura IoT*



Fuente: UIT-T (2012)

**Nota:** La arquitectura de Internet de las Cosas se emplea en una amplia gama de aplicaciones, desde la automatización de hogares y edificios hasta la industria 4.0 y la robótica colaborativa. Esta arquitectura IoT posibilita la recopilación y procesamiento de datos en tiempo real, lo que puede mejorar la eficiencia y facilitar la toma de decisiones.

La arquitectura anteriormente mostrada se detalla a continuación:

**Capa de aplicación:** Representa una abstracción de los servicios de Internet de las Cosas solicitados por un usuario mediante una Interfaz de Programación de Aplicaciones (API). De esta manera, esta capa procesa la información y puede responder a la solicitud recibida.

**Capa de soporte de servicios y aplicaciones:** La capa de soporte de servicios y aplicaciones de IoT consta de dos tipos principales de funcionalidades:

Funcionalidades de soporte genéricas: Son capacidades comunes y reutilizables por múltiples aplicaciones IoT, como procesamiento y almacenamiento de datos. Pueden también servir como base para crear capacidades más específicas (UIT-T, 2012).

Funcionalidades de soporte específicas: Son capacidades diseñadas para satisfacer los requerimientos particulares de distintas aplicaciones IoT. Consisten en conjuntos de funciones de apoyo adaptadas para brindar diferentes tipos de asistencia a las variadas aplicaciones (UIT-T, 2012).

**Capa de red:** El texto describe dos categorías fundamentales de funcionalidades:

Funcionalidades de red: Brindan capacidades para controlar y gestionar la conectividad de red, incluyendo control de acceso, administración de recursos de transporte, movilidad, autenticación, autorización y contabilidad (AAA) (UIT-T, 2012).

Funcionalidades de transporte: Se enfocan en proveer la conectividad necesaria para el transporte de datos e información de servicios y aplicaciones IoT, así como para el transporte de información de control y gestión relacionada con IoT (UIT-T, 2012).

**Capa de dispositivo:** Dentro de la capa de dispositivos del Internet de las Cosas, se pueden distinguir dos categorías fundamentales de funcionalidades:

Funcionalidades de los dispositivos finales, que comprenden la capacidad de interactuar directamente con la red de comunicaciones para el envío y recepción de información, la posibilidad de interactuar indirectamente a través de capacidades de pasarela, la habilidad para conformar redes ad-hoc cuando sea necesario, y mecanismos para alternar entre modos de "reposo" y "activo" con el fin de ahorrar energía (UIT-T, 2012).

Funcionalidades de las puertas de enlace, que actúan como intermediarios entre los dispositivos finales y otras capas del Internet de las Cosas, brindando capacidades como la traducción de protocolos, el filtrado de información, entre otras.

**Capacidades de pasarela:** Entre las funcionalidades clave de las puertas de enlace en la capa de dispositivos del Internet de las Cosas se encuentran: brindar soporte para interfaces múltiples que permitan la conexión de dispositivos a través de diversas tecnologías cableadas e inalámbricas, tales como CAN, ZigBee, Bluetooth o Wi-Fi en el plano de dispositivos, y tecnologías como PSTN, redes 2G, 3G, LTE, Ethernet o DSL en el plano de red. Otra capacidad fundamental es la conversión de protocolos, requerida cuando los dispositivos emplean protocolos diferentes entre sí o cuando se utilizan protocolos distintos entre la capa de dispositivos y la capa de red.

### **2.3.2 *Tecnologías inalámbricas para IoT***

Recientemente, estas tecnologías han avanzado rápidamente, evolucionando desde las redes de infrarrojos para comunicarse entre dos puntos hasta las WPAN, redes inalámbricas de

corto alcance y multipunto, como Bluetooth, o las de alcance medio y múltiples saltos, como ZigBee. En la Tabla 4, se describe las características de las tecnologías inalámbricas más usadas, según (Mazón, 2023)

**Tabla 4**

*Características de las tecnologías inalámbricas para IoT*

| Tecnología                                | Características                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|-------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Zigbee</b>                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Desarrollada por ZigBee Alliance en 2001, esta tecnología de comunicación inalámbrica se destaca por su corto alcance, bajo costo y baja velocidad de transferencia de datos, basándose en el estándar IEEE802.15.4.</li> <li>- Ofrece escalabilidad, confiabilidad y un diseño de protocolo flexible.</li> <li>- Opera en las bandas de frecuencia de 868/915 MHz y 2.4 GHz.</li> <li>- Tiene un rango aproximado de 100 metros y un ancho de banda de 250 kbps, admitiendo topologías en estrella, árbol y malla.</li> <li>- Encuentra amplio uso en automatización del hogar, controles industriales, monitoreo médico, sistemas de energía, entre otros campos.</li> </ul> |
| <b>Bluetooth</b>                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>- En 1994, la compañía Ericsson Mobile Communication inició un proyecto denominado Bluetooth. Esta tecnología emplea una topología en estrella. Las versiones iniciales de Bluetooth 1.x se basaban en el estándar IEEE 802.15.1, ofreciendo un ancho de banda de 1 Mbps, permitiendo la conexión inalámbrica de hasta 7 nodos, con un alcance de 10 metros y una latencia de 10 segundos. Operaba en la banda de 2.4 GHz, con bajo consumo de energía, aunque no estaba optimizado para muy baja potencia. La versión Bluetooth 2.0 + EDR aumentó el ancho de banda a 3 Mbps, mientras que la más reciente, Bluetooth 5.0, alcanza un ancho de banda de 50 Mbps.</li> </ul>     |
| <b>Bluetooth<br/>Low Energy<br/>(BLE)</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Es un subconjunto de la versión 4.0 de Bluetooth, adoptado por el Bluetooth Special Interest Group en el año 2010. Ha alcanzado una amplia aceptación en smartphones, sistemas operativos como iOS, Android, Microsoft o Linux, y otros dispositivos.</li> <li>- Se destaca por su corto alcance de 50 a 100 metros, bajo consumo de energía, baja latencia (6 ms) y bajo costo.</li> <li>- Opera a velocidades que van desde 125 Kbps hasta 2 Mbps.</li> <li>- BLE encuentra su uso en aplicaciones de sensores domésticos donde se requiere un rango más extenso.</li> </ul>                                                                                                 |
| <b>LongRange /<br/>LoRaWAN</b>            | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Fue desarrollada inicialmente por Cycleo of Grenoble y posteriormente adquirida por Semtech en 2012.</li> <li>- Se destaca por su largo alcance, que va desde 2 a 5 kilómetros en zonas urbanas hasta 15 kilómetros en áreas suburbanas.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |

---

|   |                                                                                                                                                                                                                                                 |
|---|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| - | Ofrece características de bajo consumo energético, bajo costo, baja velocidad (de 0.3 a 27 Kbps) y baja transferencia de datos (255 bytes).                                                                                                     |
| - | Opera en frecuencias por debajo de 1 GHz, dependiendo de la región: 868 MHz en Europa, 915 MHz en América y 433 MHz en Asia.                                                                                                                    |
| - | La capa física LoRa se encarga de la modulación en radiofrecuencia, mientras que LoRaWAN es el protocolo de comunicación utilizado para comunicar y administrar dispositivos LoRa, compuesto por puertas de enlace ( <i>gateways</i> ) y nodos. |

---

|               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|---------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Z-wave</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Esta tecnología fue concebida para su implementación en automatización del hogar o pequeños negocios.</li> <li>- Consta de un transmisor de radiofrecuencia de bajo consumo energético.</li> <li>- Entre sus principales ventajas, se encuentran la facilidad de instalación al no requerir cableado, la inversión inicial modesta, la seguridad y la confiabilidad.</li> <li>- Ofrece un rango de alcance de hasta 30 metros en espacios abiertos.</li> <li>- Utiliza una banda de frecuencia por debajo de 1MHz para evitar interferencias con Wi-Fi y Bluetooth.</li> <li>- Cuenta con una tasa de transferencia de 40 Kbps, un rango de entre 30 y 100 metros, y una latencia aproximada de 1000 milisegundos.</li> </ul> |
|---------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

---

Fuente: Mazón (2023)

### 2.3.2.1 LoRa

LoRa es una tecnología basada en una modulación inalámbrica que se utiliza para establecer un enlace de comunicación de largo alcance. En la actualidad, algunos sistemas inalámbricos emplean una modulación de manipulación por desplazamiento de frecuencia (FSK) como capa física, ya que esta resulta apropiada para lograr un bajo consumo de energía.

A continuación, se presenta las características de esta tecnología:

- LoRa opera en las bandas de 433 MHz para Asia, 868 MHz en Europa y 915 MHz en Estados Unidos.
- Su esquema de modulación de señal es una variación del espectro ensanchado por secuencia directa (DSSS) denominada Chirp Spread Spectrum (CSS), lo que da lugar a conexiones de bajo costo, bajo consumo, robustas frente a interferencias y resistentes al efecto Doppler.

- Cuenta con un método de ajuste dinámico (ADR) que permite al dispositivo final o a la red ajustar dinámicamente los parámetros de potencia de transmisión y la tasa de transferencia, en relación con la distancia entre el dispositivo final y la puerta de enlace, así como el tamaño del mensaje. Esto permite comunicaciones energéticamente eficientes utilizando la máxima velocidad posible.
- Emplea un espectro ensanchado a través del cual la señal a enviar utiliza un ancho de banda mayor, generando la recepción de múltiples señales con diferentes velocidades (Vallejo & Cuesta, 2022).
- Utiliza seis factores de ensanchamiento (SF7-SF12), donde cada uno define una relación entre potencia y tasa de transferencia.
- A mayor factor de ensanchamiento, mayor es la sensibilidad del receptor y, por tanto, mayor es el alcance, pero la velocidad disminuye.
- Presenta una velocidad que va desde 0.3 kbps para SF12 hasta 5486 kbps para SF7.
- Se caracteriza por una sensibilidad de recepción de -137 dBm para SF12 y -123 dBm para SF7, y tiene un alcance de 14 km para SF12 y 2 km para SF7 (Vallejo & Cuesta, 2022).

LoRaWAN emplea una capa de nivel físico para permitir la comunicación entre dispositivos. En la actualidad, soporta tres capas físicas distintas mediante las técnicas de modulación de larga distancia LoRa, espectro ensanchado por salto de frecuencia de largo alcance LR-FHSS, y modulación por desplazamiento de frecuencia FSK.

### ***2.3.2.2 Estructura física del paquete LoRa***

Los mensajes LoRa utilizan el formato de paquete de radio con cabecera explícita, el cual contiene la cabecera física LoRa (PHDR) más un código de redundancia cíclica para la

cabecera (PHDR CRC). En este modo con cabecera explícita, el PHDR especifica el tamaño en bytes de la carga útil, la tasa de corrección de errores hacia adelante y si hay un CRC opcional para la carga útil. La integridad de la carga útil en los mensajes ascendentes está protegida por un CRC. Las señales LoRaWAN se transmiten usando la modulación LoRa pero en modo de cabecera implícita, sin CRC para la carga útil. El tamaño de la carga útil depende de la tasa de datos de la baliza. En el modo implícito no están presentes ni el PHDR ni su CRC.

Los campos PHDR, PHDR CRC y payload CRC son insertados por el transceptor de radio.

**Tabla 5**

*Estructura PHY LoRa*

|                              |            |                           |            |          |                                                  |
|------------------------------|------------|---------------------------|------------|----------|--------------------------------------------------|
| <b>Tamaño</b>                | 8 símbolos | 4.25 símbolos             | 8 símbolos |          | 7 bytes<br>(de 2 bytes<br>PHDR)                  |
| <b>Estructura de Paquete</b> | Preámbulo  | Palabra de sincronización | PHDR       | PHDR_CRC | PHY Carga útil<br>CRC ((sólo enlace ascendente)) |

Fuente: Adaptado de LoRa Alliance (2022)

### 2.3.2.3 LoRaWAN

Es un protocolo de red de largo alcance y bajo consumo energético (LPWA) diseñado para conectar inalámbricamente dispositivos de bajo consumo de energía, comúnmente utilizados en el desarrollo de aplicaciones relacionadas con el Internet de las Cosas (IoT) y el Internet Industrial de las Cosas (IIoT). Esta red se basa en una topología de "estrella de estrellas" que consta de cuatro elementos clave: dispositivos finales (nodos), puertas de enlace, un servidor de red y un servidor de aplicaciones.

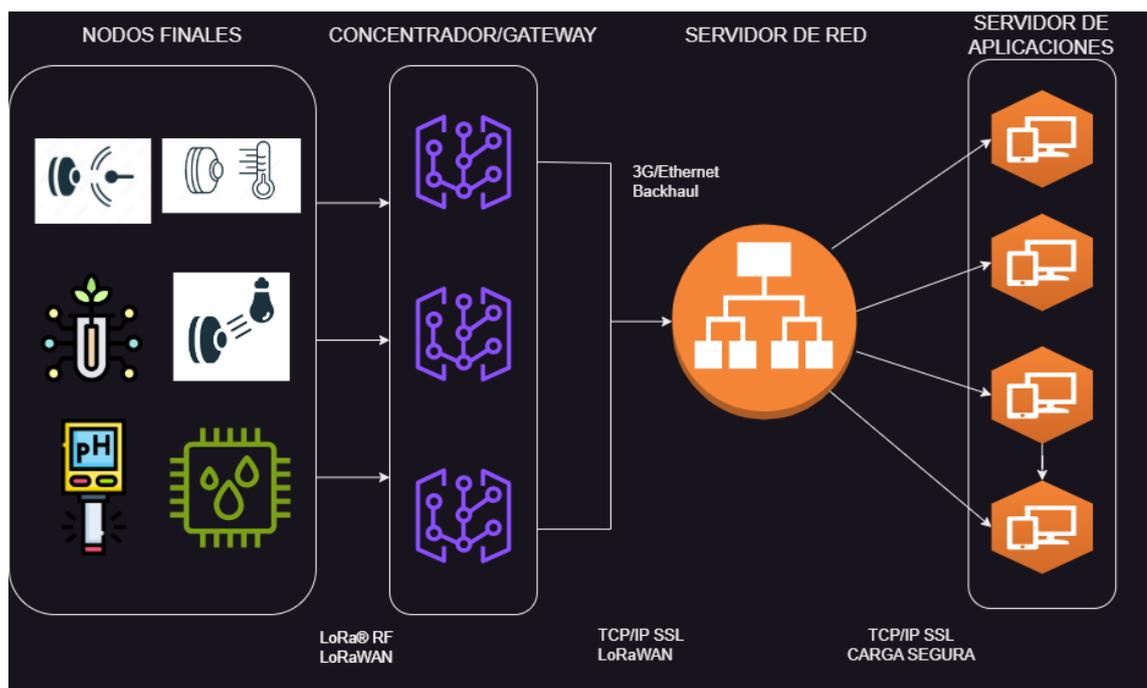
#### 2.3.2.3.1 Arquitectura LoRaWAN

La arquitectura de esta red se basa en una topología de estrella de largo alcance, lo que contribuye a prolongar la vida útil de la batería al proporcionar una conectividad de largo

alcance. Esta topología consta de cuatro componentes fundamentales: dispositivos finales, nodos o motes, puertas de enlace, un servidor de red y un servidor de aplicaciones. La arquitectura de esta red se representa en la Figura 4.

**Figura 4**

*Arquitectura de LoraWAN*



**Nota:** La arquitectura LoRaWAN utiliza la capa física LoRa basada en la modulación de espectro ensanchado y define varios protocolos para crear un sistema integral de extremo a extremo. LoRaWAN permite que los dispositivos finales funcionen con baterías pequeñas con una duración de hasta 10 años, para lo cual emplea puertas de enlace de radio con un alcance de hasta 50 km en áreas rurales. Se basa en el estándar de cifrado avanzado de 128 bits (AES128) para garantizar la seguridad total de la red, incluyendo la autenticación mutua de puntos finales, la autenticación del origen de los datos, la protección contra reproducción e integridad, y la privacidad. Permite aplicaciones de ubicación sin GPS gracias a su espectro ensanchado y capacidad de sellado de tiempo fino. Su uso de bandas de radio industriales,

científicas y médicas (ISM) permite una operación de alta capacidad (millones de mensajes por puerta de enlace), de bajo costo y altamente optimizada.

### 2.3.2.3.2 Banda de frecuencias de LoRaWAN para Ecuador

Según LoRa Alliance (2022) con el fin de facilitar la identificación de los planes de canales LoRaWAN para un país determinado, se presenta en la Tabla 6, con una referencia de las bandas de frecuencias sin licencia y los planes de canales sugeridos para Sudamérica.

**Tabla 6**

*Banda de frecuencias sin licencia para Sudamérica*

| ISO 3166-1 Nombre del país (Código alfa-2) | Banda/Canales       | Plan de canales    |
|--------------------------------------------|---------------------|--------------------|
| Argentina (AR)                             | 915 – 928 MHz       | AU915-928          |
| Bolivia (BO)                               | 915 - 930 MHz       | AS923-1            |
| Brasil (BR)                                | 902 - 907.5 MHz     | AU915-928<br>EU433 |
|                                            | 915 - 928 MHz       |                    |
|                                            | 433 - 435 MHz       |                    |
| Chile (CL)                                 | 433 – 434.79 MHz    | EU433              |
|                                            | 915 – 928 MHz       | AU915-928          |
| Colombia (CO)                              | 433 – 434.79 MHz    | EU433              |
|                                            | 915 - 928 MHz       | AU915-928          |
| Ecuador (EC)                               | 902 - 928 MHz       | AU915- 928         |
| Paraguay (PY)                              | 433.05 - 434.79 MHz | EU433              |
|                                            | 915 - 928 MHz       | AU915-928          |
| Perú (PE)                                  | 915 - 928 MHz       | AU915-928          |
| Uruguay (UY)                               | 915 - 928 MHz       | AU915- 928         |
| Venezuela (VE)                             | 922 - 928 MHz       | AS923-1            |

Adaptado de LoRa Alliance (2022)

### 2.3.2.3.3 US902-928 Frecuencias de canal de banda

En esta sección se definen los parámetros regionales para EE. UU., Canadá y los demás países de la región 2 de la UIT que adoptan la normativa FCC 47 CFR parte 15 en la banda ISM 902 – 928 en dónde es usada en Ecuador para realizar este trabajo.

La banda de frecuencias de 915 MHz para dispositivos industriales, científicos y médicos (ISM) se dividirá en los siguientes planes de canales:

Canal de subida - Contará con 64 canales, numerados del 0 al 63, que emplearán una modulación LoRa con un ancho de banda de 125 kHz, variando desde la tasa de datos DR0 hasta DR3, utilizando una tasa de codificación 4/5. Iniciaré en 902.3 MHz e incrementará linealmente 200 kHz hasta 914.9 MHz (LoRa Alliance, 2022).

Canal de subida - Tendrá 8 canales, numerados del 64 al 71, que utilizarán LoRa con 500 kHz de ancho de banda en DR4 o LR FHSS con 1.523 MHz de ancho de banda en DR5-DR6. Comenzará en 903.0 MHz e incrementará linealmente 1.6 MHz hasta 914.2 MHz (LoRa Alliance, 2022).

Canal de bajada - Contará con 8 canales, numerados del 0 al 7, que emplearán LoRa con 500 kHz de ancho de banda en DR8 a DR13. Iniciaré en 923.3 MHz e incrementará linealmente 600 kHz hasta 927.5 MHz (LoRa Alliance, 2022).

#### 2.3.2.3.4 US902-928 Tamaño máximo de la carga útil

La Tabla 7 muestra la longitud máxima (M) del tamaño de MACPayload. Esta se calcula a partir del tiempo máximo de transmisión permitido en la capa física, considerando una posible encapsulación de repetidor. También se proporciona, únicamente a modo informativo, la longitud máxima de la carga útil de aplicación (N) en ausencia del campo de control MAC FOpts OPCIONAL. El valor de N puede ser menor si el campo FOpts no se encuentra vacío.

**Tabla 7**

*Tamaño máximo de la carga útil de la trama LoRa en la banda US902-928*

| <b>Velocidad de datos</b> | <b>M</b> | <b>N</b> |
|---------------------------|----------|----------|
| 0                         | 19       | 11       |
| 1                         | 61       | 53       |
| 2                         | 133      | 125      |

---

|       |             |             |
|-------|-------------|-------------|
| 3     | 230         | 222         |
| 4     | 230         | 222         |
| 5     | 58          | 50          |
| 6     | 133         | 125         |
| 7     | No definido |             |
| 8     | 61          | 53          |
| 9     | 137         | 129         |
| 10    | 230         | 222         |
| 11    | 230         | 222         |
| 12    | 230         | 222         |
| 13    | 230         | 222         |
| 14:15 |             | No definido |

---

Fuente: LoRa Alliance (2022)

### 2.3.2.3.5 US902-928 Ventanas de recepción

El canal de recepción RX1 se determina en función del canal ascendente utilizado para iniciar el intercambio de datos. El número de canal RX1 se calcula mediante la siguiente operación: Número de canal RX1 = Número de canal de transmisión módulo *NbChannel*, donde *NbChannel* es la cantidad de canales de recepción activos.

La tasa de datos de la ventana RX1 depende de la tasa de datos de transmisión.

Por otro lado, la configuración de la ventana RX2 (segunda ventana de recepción) emplea una tasa de datos y frecuencia fijas. Los parámetros predeterminados son 923.3 MHz / DR8. La Tabla 8 presenta la asignación de datos RX1 de enlace descendente US902-928

**Tabla 8***Asignación de velocidad de datos RX1 de enlace descendente US902-928*

| Velocidad de transmisión de<br>datos RX1DROffset | Tasa de datos descendente |      |      |      |
|--------------------------------------------------|---------------------------|------|------|------|
|                                                  | 0                         | 1    | 2    | 3    |
| DR0                                              | DR10                      | DR9  | DR8  | DR8  |
| DR1                                              | DR11                      | DR10 | DR9  | DR8  |
| DR2                                              | DR12                      | DR11 | DR10 | DR9  |
| DR3                                              | DR13                      | DR12 | DR11 | DR10 |
| DR4                                              | DR13                      | DR13 | DR12 | DR11 |
| DR5                                              | DR10                      | DR9  | DR8  | DR8  |
| DR6                                              | DR11                      | DR10 | DR9  | DR8  |

Fuente: LoRa Alliance (2022)

**2.3.2.3.6 US902-928 Parámetros de relay**

Los canales Window Operation Receiving (WOR) por defecto se presenta en la Tabla 9:

**Tabla 9***Canal WOR por defecto US902-928*

| Índice de canal          | 0     | 1     |
|--------------------------|-------|-------|
| Frecuencia WOR (MHz)     | 916.7 | 919.9 |
| Frecuencia WOR ACK (MHz) | 918.3 | 921.5 |
| SF                       | SF10  |       |
| BW                       | BW500 |       |

Fuente: LoRa Alliance (2022)

## **CAPÍTULO III. Diseño e implementación**

Este capítulo adopta un enfoque primordial al aplicar el modelo para diseño e implementación del sistema de monitoreo de las variables ambientales y nutricionales en el cultivo de cáñamo medicinal para su etapa vegetativa en Canna Med Ec. El sistema se centra en la integración estratégica de tecnologías para redes inalámbricas de área extensa y bajo consumo (LPWAN), además de sensores cuyo rol es recolectar datos ambientales y nutricionales para el cultivo del cáñamo medicinal en su etapa vegetativa. A partir de un análisis exhaustivo de las condiciones de geografía e infraestructura, se busca optimizar el despliegue del sistema de monitoreo de variables ambientales y nutricionales, además, se detalla la selección de componentes para hardware y software basada en los requerimientos y expectativas de los interesados, haciendo énfasis en la eficiente transferencia de datos a través de una plataforma en la nube gestionada a través de Node-Red. Este capítulo hace énfasis en la elección de elementos de hardware y software que sean adecuados para desarrollar un sistema que permita conocer con eficacia las variables ambientales y nutricionales para el cultivo de cáñamo medicinal.

### **3.1 Etapa de estudio**

En esta fase crítica se deben considerar diversos factores como las condiciones climáticas, valores estables para los nutrientes y los requerimientos específicos del cultivo de cáñamo en su etapa vegetativa. Se hace hincapié en investigar los requisitos primordiales para lograr un correcto monitoreo en el sistema, el cual implica identificar las variables clave a medir y seleccionar los sensores óptimos para obtener mediciones precisas y confiables. Se evaluarán las características de infraestructura para elección de la tecnología inalámbrica más adecuada que permita transmitir los datos desde las estaciones monitoras hacia al nodo central. Los datos recopilados serán almacenados y visualizados en una plataforma que permita monitorear los valores adecuados para el cultivo de cáñamo en su etapa vegetativa, lo cual

representa realizar un análisis exhaustivo en esta etapa para evitar errores y tener una solución eficiente para el manejo de estos valores ambientales y nutricionales.

### ***3.1.1 Situación actual de la zona de cultivo de cáñamo en su etapa vegetativa***

El cultivo de cáñamo medicinal se realizará en invernadero (indoor). Si bien el área de cultivo se controla con dispositivos independientes como datalogers, es importante señalar que la zona de cultivo carece de un sistema de monitoreo, lo cual es importante para evitar que la planta florezca en menor tiempo. Además, el lugar cuenta con suministro energético en la zona donde se mantiene el cultivo del cáñamo medicinal en su etapa vegetativa, lo que proporciona una fuente para la alimentación eléctrica del sistema.

El cultivo de cáñamo medicinal tendrá lugar en un entorno indoor en la parroquia Caranqui. La disposición de esta propiedad ha sido planificada estratégicamente para garantizar las condiciones óptimas para el cultivo de cáñamo en su etapa vegetativa, permitiendo la implementación y verificación efectiva para los beneficios del proyecto. El área destinada a la etapa vegetativa del cáñamo medicinal está representada en el gráfico adjunto de la Figura 5, abarcando un área total de 278.85 m<sup>2</sup>.

### **Figura 5**

*Zona de cultivo de cáñamo medicinal.*



**Nota:** Se ha seleccionado el lugar de la propiedad en donde se encuentran el cultivo de cáñamo medicinal en su etapa vegetativa.

Para implementar exitosamente el sistema de monitoreo de variables ambientales y nutricionales del cultivo de cáñamo medicinal en su etapa vegetativa, se han considerado aspectos clave que incidirán en la aplicación adecuada del sistema. Se analizarán las particularidades que conforman la zona de cultivo, abarcando el intervalo entre cada ejemplar sembrado y la separación entre masetas de plantación, al igual que el tramo de división entre las mismas. Dichos factores son fundamentales para escoger de manera acertada la ubicación de las estaciones de monitoreo que se emplearán.

### **Figura 6**

*Fase vegetativa del cáñamo medicinal*



**Nota:** Los valores presentados en la Figura 6 son los estimados para el cultivo de cáñamo medicinal en su etapa vegetativa. Los datos mostrados se detallarán en la Tabla 10 los cuáles están considerados en el diseño del sistema de monitoreo.

**Tabla 10**

*Valores medidos en el cultivo de cáñamo en su fase vegetativa*

| <b>Espacios entre zonas de cultivo</b> | <b>Valores medidos (metros)</b> |
|----------------------------------------|---------------------------------|
| Distancia entre macetas                | 0.70 m                          |
| Espaciamiento entre plantas            | 0.50 m                          |

**Nota:** El total de plantas que se van a tener en cada fila de macetas va a ser de 3.

### **3.1.2 Examinar los requisitos del sistema**

En referencia al marco teórico expuesto en el capítulo 2, en el cual se analiza los componentes necesarios para el sistema, se aplicará la metodología en cascada para tratar distintos aspectos presentes en la arquitectura IoT definida en el punto 2.4.1. Esta arquitectura servirá de referencia para las aplicaciones como la agricultura. En esta se detallará la selección de elementos que componen la capa dispositivos como los sensores, la capa de Gateway y las tecnologías inalámbricas para el envío de datos, considerando también la capa de aplicación en la que se incluirá un software o aplicación para visualización y manejo de datos del sistema.

Para implementar un sistema de monitoreo que permita supervisar las variables ambientales y nutricionales en el cultivo de cáñamo medicinal, se ha analizado los elementos que formarán parte del diseño e implementación del sistema. Este debe alinearse con los requerimientos previamente establecidos por el agrónomo o encargado del cultivo.

#### **3.1.2.1 Determinación de Stakeholders**

En el marco del proyecto que se viene desarrollando, la norma ISO/IEC/IEEE 29148-2018, los stakeholders o partes interesadas engloban a aquellos individuos o grupos que tienen un interés directo con el resultado final. Incluye tanto a personas como entidades que podrían verse afectadas u obtener algún beneficio de este, ya sea de forma directa o indirecta. Las partes interesadas comprenden a los usuarios finales del sistema, los patrocinadores del proyecto, el equipo de desarrollo, potenciales clientes, entre otros. Es fundamental considerar a estas partes interesadas en todas las etapas del desarrollo del proyecto, desde la identificación de los requisitos, hasta la realización y evaluación, para asegurar que sus necesidades y expectativas sean cumplidas de forma eficiente.

#### **Tabla 11**

##### *Atribuciones de Stakeholders*

---

**Lista de Stakeholders**


---

|                          |                        |
|--------------------------|------------------------|
| <b>Usuarios directos</b> | Ing. Fernando Pergueza |
| <b>Tutor</b>             | MsC. Jaime Michilena   |
| <b>Asesor</b>            | MsC. Edgar Maya        |
| <b>Desarrollador</b>     | Sr. Ismael Castro      |

---

### ***3.1.2.2 Exigencias de Software y Hardware***

Los criterios por considerar en la selección de los requisitos están dados en función de las necesidades de las partes interesadas (stakeholders) y las recomendaciones de los expertos en el ámbito de la agricultura, monitoreo de factores ambientales y nutricionales que influyen en el diseño del sistema para el cultivo de cáñamo medicinal.

Se afrontan los requisitos de software que desempeñarán un rol en el sistema de monitoreo con base a los requerimientos previstos en el cultivo del cáñamo. Esta fase es de gran importancia, ya que es la indicada para seleccionar cada componente que se utilizará para asegurar la eficiencia del proyecto final y, por lo tanto, brindar la solución a la problemática.

### ***3.1.2.3 Nomenclatura para requisitos***

En la Tabla 12 se establecerán las abreviaturas que se utilizarán para hacer referencia a cada uno de los procesos que formarán parte del desarrollo del proyecto

**Tabla 12**

*Nomenclatura para condiciones*

---

| <b>Acrónimo</b> | <b>Condiciones</b> |
|-----------------|--------------------|
|-----------------|--------------------|

---

|      |                             |
|------|-----------------------------|
| CDST | Condiciones de Stakeholders |
| CDA  | Condiciones de Arquitectura |
| CDS  | Condiciones de Sistema      |

#### ***3.1.2.4 Exigencias de Stakeholders***

En cuanto a los requisitos que deben cumplirse, es crucial resaltar que estos surgieron en una reunión con los encargados del cultivo. Durante esta reunión con el Ing. Fernando Hidalgo se abordaron temas relevantes para el estudio en cuestión.

Se presentará el diálogo de los temas abordados en la reunión presencial en el Anexo 1, llevada a cabo con el beneficiario, quién cuenta con la experiencia necesaria en el ámbito agrícola para cultivos de cannabis medicinal. La reunión se llevó a cabo el miércoles 24 de abril de 2024 en la zona del cultivo, iniciando a las 10:30 am y finalizando a las 12:15 pm, donde se abordaron temas relacionados al área de cultivo en su etapa vegetativa, las necesidades de medir los factores ambientales que se miden cada cierto tiempo de forma manual, el tiempo que tarda la planta en cada fase de su ciclo de vida y específicamente en su etapa vegetativa, los requerimientos para el sistema por parte de la entrega de datos y alertas que permitan al sistema ser más eficiente en el monitoreo por parte de los usuarios.

La reunión se realizó con el fin de establecer los requisitos para cumplir en el sistema que se va a implementar. Se presentará un análisis de los requisitos con el beneficiario interesado en la Tabla 13. Esto permitirá elegir los mejores dispositivos, tanto a nivel de hardware como software.

#### **Tabla 13**

*Condiciones de Stakeholders*

| <b>Condiciones de Stakeholders CDST</b> |                                                                                         | <b>Prioridad</b> |              |             |
|-----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|------------------|--------------|-------------|
|                                         | <b>Condiciones de funciones</b>                                                         | <b>Baja</b>      | <b>Media</b> | <b>Alta</b> |
| <b>CDST 1</b>                           | Elección de fuente de energía eléctrica para el sistema                                 |                  |              | X           |
| <b>CDST 2</b>                           | Mejora de la distribución para el funcionamiento entre Gateway y Estaciones sensoras    |                  |              | X           |
| <b>CDST 3</b>                           | Requisitos de conexión a Internet para los dispositivos a usar                          |                  |              | X           |
| <b>CDST 4</b>                           | Transmisión y recepción constante de datos                                              |                  |              | X           |
| <b>CDST 5</b>                           | Mantener el funcionamiento continuo de los dispositivos del sistema                     |                  |              | X           |
| <b>Condiciones de usuarios</b>          |                                                                                         |                  |              |             |
| <b>CDST 6</b>                           | Ingreso remoto y local a los datos receptados                                           |                  |              | X           |
| <b>CDST 7</b>                           | Implementación de hardware y software de bajo costo                                     |                  |              | X           |
| <b>CDST 8</b>                           | Exposición de datos actualizada                                                         |                  |              | X           |
| <b>CDST 9</b>                           | Alertas en los cambios de los niveles ambientales y nutricionales en el área de cultivo |                  |              | X           |

|                |                                                        |   |
|----------------|--------------------------------------------------------|---|
| <b>CDST 10</b> | Ingreso al historial de datos recibidos del sistema    | X |
| <b>CDST 11</b> | Ingreso rápido y eficiente de los datos receptados     | X |
| <b>CDST 12</b> | Funcionamiento automático del sistema de monitoreo     | X |
| <b>CDST 13</b> | Autenticación con credenciales para acceder al sistema | X |

### 3.1.2.5 Exigencias de arquitectura

A continuación, se enumerarán las condiciones de arquitectura en la Tabla 14, tomando en consideración lo previamente observado como requerimiento del usuario final y los requisitos para el correcto desempeño del mecanismo.

**Tabla 14**

#### *Exigencias de arquitectura*

|                                | Condiciones de Arquitectura (CDA)     | Prioridad |       |      |
|--------------------------------|---------------------------------------|-----------|-------|------|
|                                |                                       | Baja      | Media | Alta |
| <b>Condiciones en Hardware</b> |                                       |           |       |      |
| <b>CDA1</b>                    | Sistema con un coste bajo y accesible |           |       | X    |

|             |                                                                 |   |
|-------------|-----------------------------------------------------------------|---|
|             | Capacidad de procesamiento                                      |   |
| <b>CDA2</b> | rápido de datos por parte de las placas que componen el sistema | X |
|             | Disponibilidad de alimentación                                  |   |
| <b>CDA3</b> | eléctrica y respaldo mediante baterías para estaciones          | X |
|             | Dimensiones compactas y tamaño                                  |   |
| <b>CDA4</b> | reducido de las estaciones que conforman el sistema             | X |
|             | Consumo bajo de energía eléctrica                               |   |
| <b>CDA5</b> |                                                                 | X |
|             | Contar con sensores aptos para trabajar en ambientes difíciles  |   |
| <b>CDA6</b> |                                                                 | X |

|             |                                                                       |   |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------|---|
| <b>CDA7</b> | Compatibilidad de procesamiento de datos entre placas y sensores.     | X |
| <b>CDA8</b> | Manejo de tecnología inalámbrica LoRa que opere con antena en sub-GHz | X |

---

**Condiciones de Software**

---

|              |                                                                      |   |
|--------------|----------------------------------------------------------------------|---|
| <b>CDA9</b>  | Capacidad de almacenamiento de datos en gran cantidad en tiempo real | X |
| <b>CDA10</b> | Manejo de lenguaje de programación Python y C                        | X |
| <b>CDA11</b> | Plataforma de visualización de datos receptados                      | X |

|              |                                                         |   |
|--------------|---------------------------------------------------------|---|
|              | Instalación de                                          |   |
| <b>CDA12</b> | sistema operativo en<br>microcontroladores              | X |
|              | Instalación de un<br>analizador de                      |   |
| <b>CDA13</b> | paquetes de código<br>abierto para análisis<br>de datos | X |
|              | Configuración de<br>servidor web y                      |   |
| <b>CDA14</b> | plataforma para<br>visualización de<br>datos            | X |

---

**Condiciones lógicas y de diseño**

---

|              |                                             |   |
|--------------|---------------------------------------------|---|
|              | Implementación                              |   |
| <b>CDA15</b> | accesible con costo<br>reducido del sistema | X |
|              | Compatibilidad<br>entre hardware y          |   |
| <b>CDA16</b> | software para<br>rendimiento<br>eficiente   | X |

|                               |                                                                             |   |
|-------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|---|
|                               | Seleccionar la tecnología inalámbrica                                       |   |
| <b>CDA17</b>                  | adecuada de acuerdo con la infraestructura del lugar                        | X |
|                               | Capacidad del Gateway para soportar tecnología Wi-Fi                        |   |
| <b>CDA18</b>                  |                                                                             | X |
|                               | Utilización de protocolos MQTT/MQTT-SN                                      |   |
| <b>CDA19</b>                  |                                                                             | X |
| <b>Condiciones eléctricas</b> |                                                                             |   |
|                               | Facilidad de alimentación eléctrica y respaldo con baterías para estaciones |   |
| <b>CDA20</b>                  |                                                                             | X |

### 3.1.2.6 Exigencias de sistema

A continuación, se enumeran las exigencias del sistema en la Tabla 15, tomando en consideración lo previamente identificado como requerimiento del usuario final y los requisitos para el correcto desempeño del mecanismo.

**Tabla 15**

*Exigencias del sistema*

| Condiciones de Sistema             | Prioridad                                                                       |       |      |
|------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|-------|------|
|                                    | Baja                                                                            | Media | Alta |
| <b>Condiciones para interfaces</b> |                                                                                 |       |      |
| CDS1                               | Alimentación eléctrica mediante el puerto USB o conexión de 3.3-5V              |       |      |
|                                    |                                                                                 |       | X    |
| CDS2                               | Plataforma óptima para visualización y monitoreo de datos para el usuario final |       |      |
|                                    |                                                                                 |       | X    |

|                                |                                                                                                      |   |
|--------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|
|                                | Puertos                                                                                              |   |
| <b>CDS3</b>                    | suficientes para<br>conexión de<br>sensores                                                          | X |
| <b>Condiciones de estatus</b>  |                                                                                                      |   |
|                                | Trabajo                                                                                              |   |
| <b>CDS4</b>                    | continuo de<br>dispositivos del<br>sistema                                                           | X |
|                                | Funcionamiento<br>ininterrumpido<br>de la plataforma<br>de monitoreo y<br>almacenamiento<br>de datos |   |
| <b>CDS5</b>                    |                                                                                                      | X |
|                                | Transmisión y<br>recepción entre<br>la antena y el<br>módulo<br>LPWAN                                |   |
| <b>CDS6</b>                    |                                                                                                      | X |
| <b>Condiciones para manejo</b> |                                                                                                      |   |
| <b>CDS7</b>                    | Medición<br>precisa por                                                                              | X |

---

|              |                  |   |
|--------------|------------------|---|
|              | parte de los     |   |
|              | sensores         |   |
|              | ambientales y    |   |
|              | nutricionales en |   |
|              | la zona de       |   |
|              | cultivo          |   |
|              | Instalación y    |   |
|              | configuración    |   |
| <b>CDS8</b>  | fiable del       | X |
|              | sistema          |   |
|              | Pruebas previas  |   |
|              | de software en   |   |
|              | las estaciones   |   |
| <b>CDS9</b>  | sensoras y       | X |
|              | Gateway de       |   |
|              | monitoreo        |   |
|              | Armazón          |   |
|              | protector y      |   |
| <b>CDS10</b> | adaptable para   | X |
|              | los dispositivos |   |
|              | del sistema      |   |

---

**Condiciones físicas**

---

---

|              |                                                               |   |
|--------------|---------------------------------------------------------------|---|
|              | Seguridad de las<br>estaciones                                |   |
| <b>CDS11</b> | sensoras en el<br>área de<br>implementación                   | X |
|              | Disponibilidad<br>del cultivo para                            |   |
| <b>CDS12</b> | la<br>implementación<br>del sistema                           | X |
|              | Realización de<br>pruebas de<br>funcionamiento                |   |
| <b>CDS13</b> | y corrección de<br>errores antes de<br>la puesta en<br>marcha | X |
|              | Línea de vista<br>entre estaciones                            |   |
| <b>CDS14</b> | sensoras y<br>Gateway                                         | X |

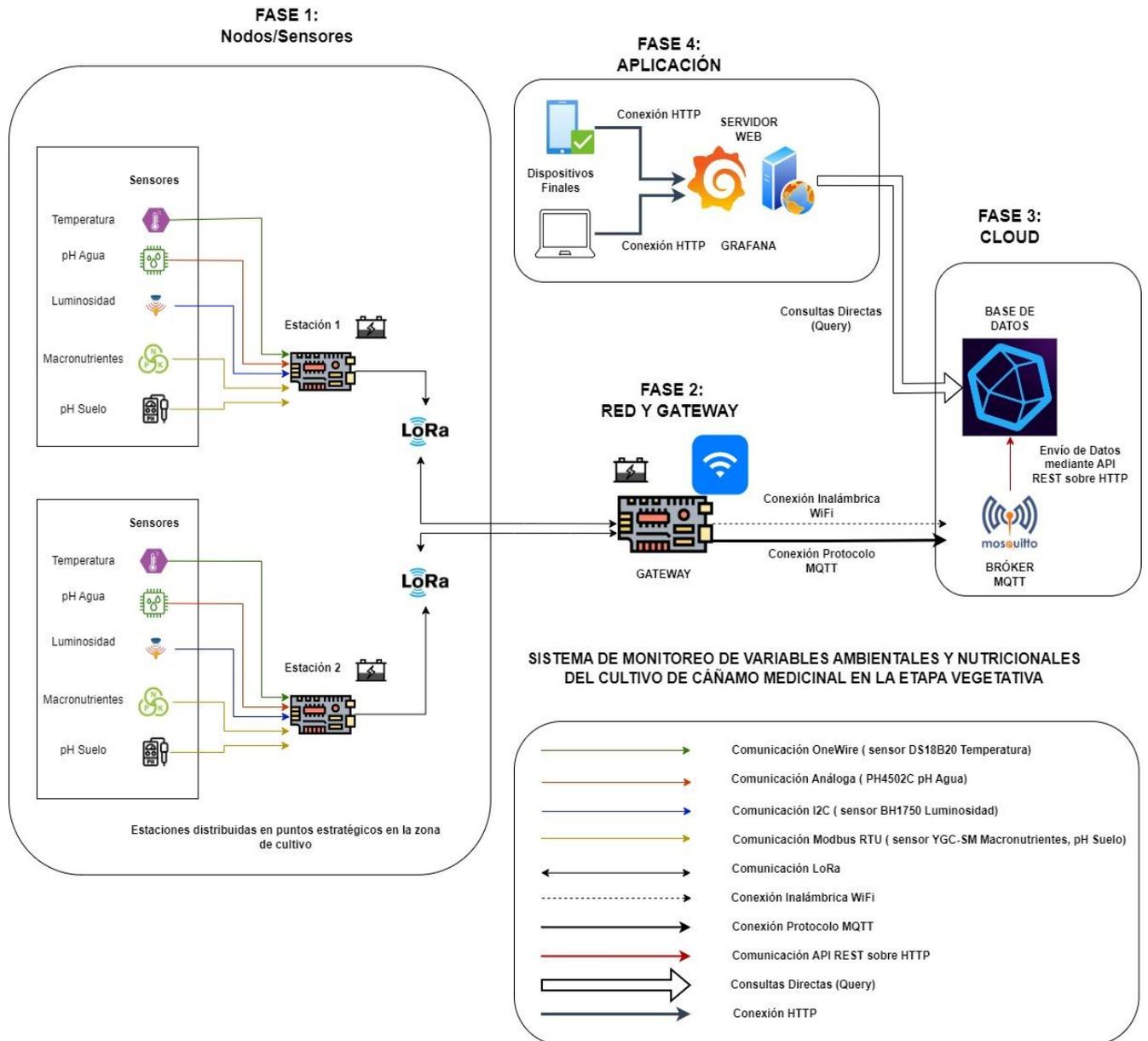
---

### **3.2 Diseño y descripción general del sistema de monitoreo de variables ambientales y nutricionales en el cultivo de cañamo**

El objetivo principal de la iniciativa es aumentar la eficiencia en el manejo de las condiciones ambientales y nutricionales para el cultivo de cáñamo usando sensores con tecnologías de área extensa de bajo consumo. El propósito es mejorar la calidad de las plántulas de cáñamo en su etapa vegetativa antes de llegar a la floración manteniendo los niveles óptimos de temperatura, humedad, luminosidad, macronutrientes y regular el pH en su zona de cultivo. La implementación de esta tecnología permitirá al agricultor o encargado monitorear y asegurar los niveles óptimos para las plántulas antes de la floración, asegurando el crecimiento eficiente sin necesidad de una supervisión con técnicas tradicionales que ocupan los agricultores.

### **Figura 7**

*Arquitectura del sistema de monitoreo de variables ambientales y nutricionales del cultivo de cáñamo medicinal*



La Figura 7 muestra la arquitectura del sistema diseñado para monitorear las variables ambientales y nutricionales del cultivo de cáñamo medicinal en su etapa vegetativa integra diversas fases con protocolos de comunicación específicos, lo que garantiza un flujo constante y confiable de datos desde los sensores hasta los dispositivos de visualización final. En la primera etapa, los sensores recolectan la información. El sensor DS18B20, que mide la temperatura, utiliza el protocolo OneWire. Por su parte, el módulo PH-4502C, encargado de medir el pH del agua, transmite señales analógicas que son procesadas por el convertidor analógico-digital (ADC) del microcontrolador. La luminosidad es medida por el sensor

BH1750, que emplea comunicación I2C, mientras que el sensor YGC-SM, utilizado para registrar macronutrientes y pH del suelo, se comunica a través del protocolo Modbus RTU.

Los datos recopilados en esta fase son enviados al Gateway a través de la tecnología inalámbrica LoRa, que se destaca por su bajo consumo energético y capacidad de comunicación a larga distancia, ideal para aplicaciones en entornos agrícolas. En la siguiente fase, el Gateway centraliza la información y la transmite al broker MQTT (Mosquitto) utilizando el protocolo MQTT, diseñado específicamente para manejar de forma eficaz las comunicaciones en sistemas IoT.

En la fase de cloud, el broker MQTT transfiere los datos a la base de datos InfluxDB mediante solicitudes API REST sobre HTTP, permitiendo que la información se almacene de manera organizada y accesible. A partir de esta base de datos, Grafana accede a la información mediante consultas directas (Query), lo que facilita la extracción de datos relevantes para generar paneles de visualización en tiempo real.

Finalmente, en la fase de aplicación, el usuario puede acceder a los datos desde dispositivos como computadoras o teléfonos móviles a través de conexiones HTTP, para monitorear las condiciones del cultivo en tiempo real.

### ***3.2.1 Selección de hardware y software para el sistema de monitoreo***

La selección de hardware y software para el desarrollo del sistema de monitoreo de las variables ambientales y nutricionales del cultivo de cáñamo en la etapa vegetativa considerando la planta de cáñamo y las sugerencias dadas por el agricultor. La infraestructura y las condiciones presentes en la zona de cultivo determinarán la selección de los dispositivos electrónicos y softwares que ofrezcan el respaldo adecuado para las mediciones ambientales y nutricionales y para la gestión en el monitoreo de los datos obtenidos. Esto permitirá que las



---

|                 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|-----------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Arduino<br>Mega | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 5 |
| Arduino<br>Nano | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 3 |
| LORA 32<br>V3   | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 8 |

1 – Cumple

0 - No cumple

---

**Elección:** LoRa32 V3

---

**Nota:** La elección es por el microcontrolador LoRa32 V3 de 26 pines

Después de un estudio de las características individuales de los diversos microcontroladores, se ha seleccionado el LORA 32 V3 de 26 pines debido que es una placa de desarrollo IoT que está basada en el ESP32 de 32 bits de doble núcleo con chip de nodo LoRa SX1276/SX1278 a una velocidad de 240 MHz, que opera en la banda de 863-928 MHz, además cuenta con un módulo WiFi 802.11 b/g/n lo cual es ideal para la transmisión de datos de respaldo. El factor clave en la elección es su bajo costo y la integración del módulo LoRa para la transmisión inalámbrica de datos de hasta 2.8 Km en campo abierto, además de sus dimensiones con un tamaño compacto de 27.13mm de ancho y 64.47mm de largo con un voltaje de trabajo de 1.8 – 3.7 V

### Figura 8

*Microcontrolador LORA 32 V3*



Fuente: Tomado de [Amazon.com: MakerFocus ESP32 Development Board SX1262 863 928MHz LoRaWAN WiFi Bluetooth Dual Core 240MHz Integrated CP2102 with 0.96" OLED Display and Antenna for Arduino NodeMCU Intelligent Scenes : Electronics](https://www.amazon.com/dp/B085311111)

### 3.2.1.1.2 Selección de sensores

La selección de los dispositivos electrónicos físicos encargados de recibir las variables de medición ambientales y nutricionales en la que se incluyen sensores para medir la temperatura del ambiente, pH de agua y suelo, luminosidad y macronutrientes (NPK). Estos elementos permiten que el sistema de monitoreo de variables ambientales y nutricionales del cultivo de cáñamo medicinal en la etapa vegetativa mantengan los niveles óptimos para estos factores, permitiendo al agricultor actuar conforme sea necesario conociendo los valores de forma automática. Para cumplir con las expectativas previstas en el sistema de monitoreo, es primordial elegir exhaustivamente los dispositivos electrónicos a utilizar, priorizando las necesidades específicas del cultivo y los beneficios de acuerdo con las funciones requeridas para el sistema.

- Selección sensor de temperatura

La elección del sensor de temperatura es crucial por las condiciones climáticas del sector donde se encuentra el cultivo de cáñamo medicinal, ya que tiene un clima templado donde se mantendrá una temperatura ideal en el cultivo de invernadero para permitir el desarrollo óptimo de la planta. Por esta razón, es necesario medir la temperatura para llevar un control adecuado en un ambiente indoor, por lo tanto, se llevó a cabo la evaluación de tres tipos de sensores: DS18B20, DHT22 y DHT11 para determinar el mejor de ellos y el que se adapta de mejor forma a las necesidades presentadas el cual se presenta en la Tabla 17.

**Tabla 17**

*Condiciones de elección de sensor de temperatura*

| Hardware                        | Condiciones |       |      |      |       |      | Valoración |
|---------------------------------|-------------|-------|------|------|-------|------|------------|
|                                 | CDST5       | CSDT6 | CDA1 | CDA6 | CDA16 | CDS7 | Total      |
|                                 | DHT11       | 1     | 1    | 1    | 0     | 1    | 0          |
| DHT22                           | 1           | 1     | 0    | 0    | 1     | 0    | 3          |
| DS18B20                         | 1           | 1     | 1    | 1    | 1     | 1    | 6          |
| 1-Cumple                        |             |       |      |      |       |      |            |
| 0-No Cumple                     |             |       |      |      |       |      |            |
| <b>Elección:</b> Sensor DS18B20 |             |       |      |      |       |      |            |

Después de examinar la tabla proporcionada, el cual presenta un análisis de viabilidad de diversos sensores de temperatura, se ha elegido el sensor DS18B20. Esta decisión se sustenta en su precio y las características que permiten aplicarlo en las condiciones del entorno donde

se va a implementar. El sensor funciona a un voltaje de 3.3V, lo que lo hace ideal para ser manipulado y controlado de manera precisa en la placa LoRa32 V3.

### Figura 9

#### *Sensor de Temperatura DS18B20*



**Nota:** Tomado de DS18B20 WaterProof Temperature Sensor Module Probe+Terminal Adapter For Arduino | eBay (s/f)

- Selección de sensor de luminosidad

La elección del sensor que permita medir la luminosidad es importante debido a que la planta de cáñamo está influenciada por la duración del día (fotoperíodos), lo cual es crucial mantener la cantidad de luz natural y artificial óptimas para prolongar la etapa vegetativa y retrasar la floración. Con estos antecedentes, se realizará un análisis de dos tipos de sensores los cuáles deben estar acoplados a las necesidades del entorno y en la precisión de obtener los datos. Los dos tipos de sensores que se analizarán son el sensor BH1750 y el sensor TSL2561, los cuáles se detallan en la Tabla 18.

**Tabla 18***Condiciones para elección de sensor de luminosidad*

| Hardware                       | Condiciones |       |      |      |      |       | Valoración<br>total |
|--------------------------------|-------------|-------|------|------|------|-------|---------------------|
|                                | CDST5       | CDST6 | CDA1 | CDA5 | CDA6 | CDA16 |                     |
| Sensor<br>BH1750               | 1           | 1     | 1    | 1    | 1    | 1     | 6                   |
| Sensor<br>TSL2561              | 1           | 0     | 0    | 1    | 1    | 1     | 4                   |
| 1-Cumple                       |             |       |      |      |      |       |                     |
| 0-No cumple                    |             |       |      |      |      |       |                     |
| <b>Elección:</b> Sensor BH1750 |             |       |      |      |      |       |                     |

Los datos presentados en la Tabla 18, revelan que el sensor TSL2561 puede medir rangos hasta 40k Lux, que difiere del sensor BH1750 que posee una medición de 1 a 65535 Lux, además este último sensor es mucho más potente que el TSL2561, esto se debe a la capacidad para medir una gama más amplia de niveles de luminosidad y su mayor precisión. El sensor BH1750 es óptimo para trabajar en ambientes indoor o invernaderos.

**Figura 10***Sensor de luminosidad BH1750*



**Nota:** Tomado de BH1750FVI DC 5V Digital Light Intensity Sensor Module Stable For Arduino | eBay (s/f)

- Selección de sensor para macronutrientes y pH

La elección del sensor para medir la cantidad de macronutrientes presentes en el suelo es crucial, debido a que la planta extrae estos nutrientes del suelo, es necesario mantener estos elementos estables en el suelo puesto que favorecen el desarrollo vegetativo de la planta, de igual forma es indispensable mantener el pH regular en la tierra de los cultivos de cáñamo. Por este motivo, es necesario medir los macronutrientes como Nitrógeno, Fósforo y Potasio, además, de regular el pH en el suelo, por lo tanto, se llevó a cabo la evaluación de dos tipos de sensores: Soil NPK Sensor y YGC-SM-KV-W2 para determinar el mejor de ellos y el que se adapta a las necesidades presentadas en la Tabla 19.

**Tabla 19**

*Condiciones de elección de sensor para macronutrientes y pH*

| Hardware | Condiciones |
|----------|-------------|
|----------|-------------|

|                               | CDST4 | CDST7 | CDA6 | CDA16 | CDA20 | CDS7 | Valoración<br>Total |
|-------------------------------|-------|-------|------|-------|-------|------|---------------------|
| Soil NPK<br>Sensor            | 1     | 0     | 1    | 1     | 1     | 1    | 5                   |
| YGC-SM-<br>KV-W2              | 1     | 1     | 1    | 1     | 1     | 1    | 6                   |
| 1-Cumple                      |       |       |      |       |       |      |                     |
| 0-No cumple                   |       |       |      |       |       |      |                     |
| <b>Elección: YGC-SM-KV-W2</b> |       |       |      |       |       |      |                     |

Los datos presentados en la Tabla 18, indican que el sensor YGC-SM-KV-W2 puede medir diferentes factores como humedad del suelo, valor de pH, conductividad eléctrica, temperatura del suelo, Nitrógeno, Fósforo y Potasio. A diferencia del Soil NPK Sensor que solo permite medir los valores de macronutrientes (NPK). El sensor YGC-SM-KV-W2 trabaja con una alimentación de DC 7-30V además de contar con la protección contra la entrada de partículas IP68 que lo hace eficiente en su área de trabajo.

### **Figura 11**

*Sensor para medir macronutrientes y pH de suelo*



**Nota:** Tomado de YGC-SM土壤综合传感器 | 仪谷传感器厂家 (s/f)

### 3.2.1.2 Selección de software para gestionar estaciones de monitoreo

Con el propósito de escoger la herramienta informática adecuada para programar y gestionar los firmwares de los microcontroladores instalados en los puestos de supervisión, se han evaluado dos soluciones primordiales: Python y Arduino IDE. Ambos constituyen lenguajes de programación ampliamente difundidos que brindan la posibilidad de parametrizar y actualizar dispositivos ESP32. La determinación se fundamenta en un exhaustivo análisis comparativo de las propiedades distintivas de cada aplicación, las cuales se exhiben en la Tabla 20 a fin de agilizar el proceso decisorio.

#### Tabla 20

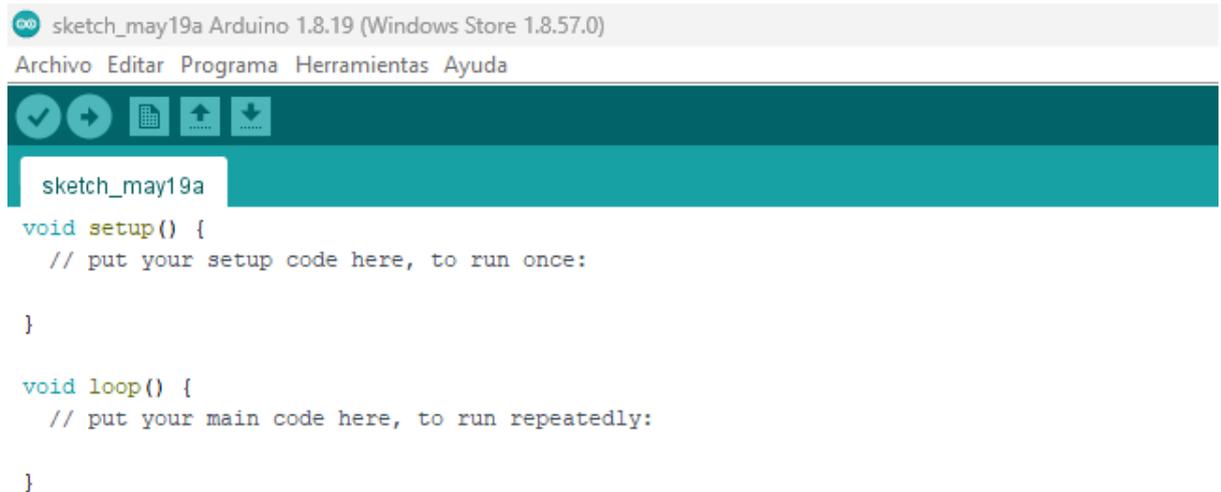
*Selección de software de programación*

| Software                     | Condiciones |      |       |      |       |       | Valoración<br>total |
|------------------------------|-------------|------|-------|------|-------|-------|---------------------|
|                              | CDS2        | CDS8 | CDS13 | CDA2 | CDA10 | CDA12 |                     |
| Arduino<br>IDE               | 1           | 1    | 1     | 1    | 1     | 1     | 6                   |
| Python                       | 0           | 1    | 1     | 1    | 1     | 1     | 6                   |
| 1-Cumple                     |             |      |       |      |       |       |                     |
| 0-No cumple                  |             |      |       |      |       |       |                     |
| <b>Elección:</b> Arduino IDE |             |      |       |      |       |       |                     |

Para la configuración de los nodos que monitorean el cultivo de cáñamo en su etapa vegetativa, se ha decidido emplear el entorno de desarrollo integrado (IDE) de Arduino. Esta decisión se sustenta en su sencilla utilización y en la robusta comunidad de usuarios y programadores que brindan respaldo y asesoría. Adicionalmente la plataforma provee un conjunto de instrumentos, bibliotecas de librerías específicamente diseñadas para las placas LoRa32, lo cual simplifica notablemente el proceso de desarrollo. Si bien existen otras alternativas disponibles, el IDE de Arduino sobresale por su accesibilidad y la vasta disponibilidad de recursos y librerías compatibles con la placa LoRa32, haciéndolo idóneo para la codificación y actualización de los firmwares en los microcontroladores.

### Figura 12

*IDE de Arduino*



```
sketch_may19a Arduino 1.8.19 (Windows Store 1.8.57.0)
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda
sketch_may19a
void setup() {
  // put your setup code here, to run once:
}
void loop() {
  // put your main code here, to run repeatedly:
}
```

### ***3.2.1.3 Selección de hardware para estación Gateway***

De acuerdo con la configuración estructural de una red de sensores, resulta trascendental seleccionar un nodo principal o Gateway y nodos controlados por microcontroladores. Para la elección del Gateway, se opta por un microcontrolador similar al de las estaciones para garantizar la compatibilidad entre dispositivos, además de gestionar su envío al servicio de almacenamiento en la nube, favoreciendo así la visualización de estos mediante un panel de control o la toma de decisiones basadas en los datos.

#### **3.2.1.3.1 Selección de placa microcontrolador Gateway**

Tomando en cuenta estos requerimientos del sistema, se decidirá por emplear el microcontrolador LoRa32 V3 como opción entre microcontroladores como la Raspberry Pi 4. La decisión de esta placa está fundamentada en las características necesarias que requiere el sistema de monitoreo del cáñamo medicinal en la etapa vegetativa que se presenta en la Tabla 21.

**Tabla 21***Elección de hardware para Gateway*

| Hardware                   | Condiciones |      |     |     |     | Valoración |       |
|----------------------------|-------------|------|-----|-----|-----|------------|-------|
|                            | CDST        | CDST | CDA | CDA | CDA | CDS        | Total |
| LoRa32                     | 1           | 1    | 1   | 1   | 1   | 1          | 6     |
| V3                         |             |      |     |     |     |            |       |
| Raspberry                  | 1           | 1    | 1   | 0   | 0   | 1          | 4     |
| Pi 4                       |             |      |     |     |     |            |       |
| 1-Cumple                   |             |      |     |     |     |            |       |
| 0-No cumple                |             |      |     |     |     |            |       |
| <b>Elección: LoRa32 V3</b> |             |      |     |     |     |            |       |

**Figura 13***Microcontrolador LoRa32 V3 para Gateway*

Fuente: Tomado de [Amazon.com: MakerFocus ESP32 Development Board SX1262 863 928MHz LoRaWAN WiFi Bluetooth Dual Core 240MHz Integrated CP2102 with 0.96" OLED Display and Antenna for Arduino NodeMCU Intelligent Scenes : Electronics](https://www.amazon.com/dp/B08L5K9K9K)

### **3.2.1.4 Selección de software para la Estación Gateway**

Para seleccionar el software adecuado para el sistema de monitoreo del cáñamo medicinal en la etapa vegetativa, es fundamental evaluar meticulosamente los requisitos especificados en la sección 3.1.4. Dicho software debe ser compatible con el microcontrolador Gateway (LoRa32 V3) y proporcionar un soporte completo para las operaciones y aplicaciones que realizará el Gateway. Entre las operaciones esenciales se encuentra el almacenamiento de datos, transmisión de información mediante un bróker MQTT y la visualización de estos datos utilizando herramientas como Grafana que operan a través de un servidor web.

#### **3.2.1.4.1 Software encargado de recibir y procesar los datos del Gateway**

El sistema operativo seleccionado para manejar la recepción y el procesamiento de datos de las estaciones de monitoreo Raspbian a través de una Raspberry Pi 4 Modelo B. Este

sistema operativo se caracteriza por su interfaz de usuario accesible y eficiente, facilitando la conexión por Wi-Fi. Además, se puede integrar con facilidad el bróker MQTT. Esta funcionalidad es crucial para procesar y analizar los datos y emitir las alertas al agricultor. En conjunto, el sistema operativo provee las herramientas necesarias para administrar el bróker, procesar la información y visualizar a través de un servidor web.

### Figura 14

*Interfaz del SO Raspbian*



#### 3.2.1.4.2 Software de almacenamiento de los datos

Al elegir una herramienta adecuada para el almacenamiento de los datos recogidos por los sensores, es fundamental evaluar diversos aspectos incluyendo el tipo de base de datos más apropiado. Las opciones disponibles incluyen InfluxDB, especializada en series temporales y DynamoDB, el cual es una base de datos NoSQL. Ambas son alternativas para almacenar la información recopilada a través del bróker MQTT Mosquitto. La decisión de seleccionar una de estas dos bases de datos para almacenamiento se basa en sus necesidades para el proyecto,

buscando asegurar la disponibilidad de los datos en todo momento que se presenta en la Tabla 22.

**Tabla 22**

*Elección de Software de Almacenamiento de datos*

| Software de almacenamiento | Condiciones |      |      |      |     |     | Valoración |
|----------------------------|-------------|------|------|------|-----|-----|------------|
|                            | CDST        | CDST | CDST | CDST | CDA | CDA | Total      |
| DynamoDB                   | 1           | 1    | 1    | 1    | 0   | 0   | 4          |
| InfluxDB                   | 1           | 1    | 1    | 1    | 1   | 1   | 6          |
| 1-Cumple                   |             |      |      |      |     |     |            |
| 0-No cumple                |             |      |      |      |     |     |            |
| <b>Elección: InfluxDB</b>  |             |      |      |      |     |     |            |

La elección de InfluxDB como base de datos se debe a varias razones clave, incluyendo su licencia gratuita que elimina cualquier costo de uso. Esta plataforma ofrece una confiabilidad en el almacenamiento y disponibilidad de datos del 99.999%. Además, InfluxDB permite el almacenamiento local de datos incluso cuando no hay conexión a internet, lo cual es crucial para el funcionamiento continuo en situaciones donde el bróker MQTT puede perder conectividad.

#### **3.2.1.4.3 Software de visualización de datos**

Seleccionar el software adecuado para visualización es fundamental en el desarrollo del sistema de monitoreo del cultivo de cáñamo medicinal en la etapa vegetativa. La relevancia de este software se basa en su capacidad para mostrar los datos obtenidos por las estaciones de

monitoreo de manera clara y en casi en tiempo real, proporcionando al administrador o agricultor información actualizada sobre las condiciones de humedad y otros factores críticos de la planta.

Las alternativas consideradas para esta tarea incluyen la creación de un Dashboard mediante un servidor web y el uso de Grafana, que permitan una adaptación más específica a las necesidades del proyecto, detalladas en la Tabla 23.

**Tabla 23**

*Elección de Software de Visualización de Datos*

| Software de visualización         | Condiciones |      |      |      |      |      | Valoración |
|-----------------------------------|-------------|------|------|------|------|------|------------|
|                                   | CDST        | CDST | CDST | CDST | CDST | CDST | Total      |
| Servidor                          | 1           | 1    | 1    | 0    | 0    | 1    | 4          |
| Web                               |             |      |      |      |      |      |            |
| Servidor                          | 1           | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 6          |
| Grafana                           |             |      |      |      |      |      |            |
| 1-Cumple                          |             |      |      |      |      |      |            |
| 0-No cumple                       |             |      |      |      |      |      |            |
| <b>Elección:</b> Servidor Grafana |             |      |      |      |      |      |            |

Tomando en cuenta las necesidades especificadas por el usuario, es imperativo que el software de visualización ofrezca una interfaz fácil de usar y que su implementación sea costeable. Utilizando Grafana, que es de uso libre, los gastos se reducen principalmente al tiempo que el administrador del sistema dedique a aprender a manejarlo.

### **3.2.2 Construcción del sistema de Monitoreo**

En el desarrollo del sistema de monitoreo del cultivo de cáñamo medicinal en la etapa vegetativa, se considerará el análisis detallado en la sección 3.1.1, que describe la situación actual y los requisitos específicos de la zona de cultivo. Para una gestión óptima del sistema, se implementará una configuración tipo estrella, que incluirá dos estaciones de monitoreo y una estación de control o Gateway. Además, se utilizará un microcontrolador adicional para delegar funciones de forma distribuida desde el nodo central, de acuerdo con lo establecido en el estudio mencionado.

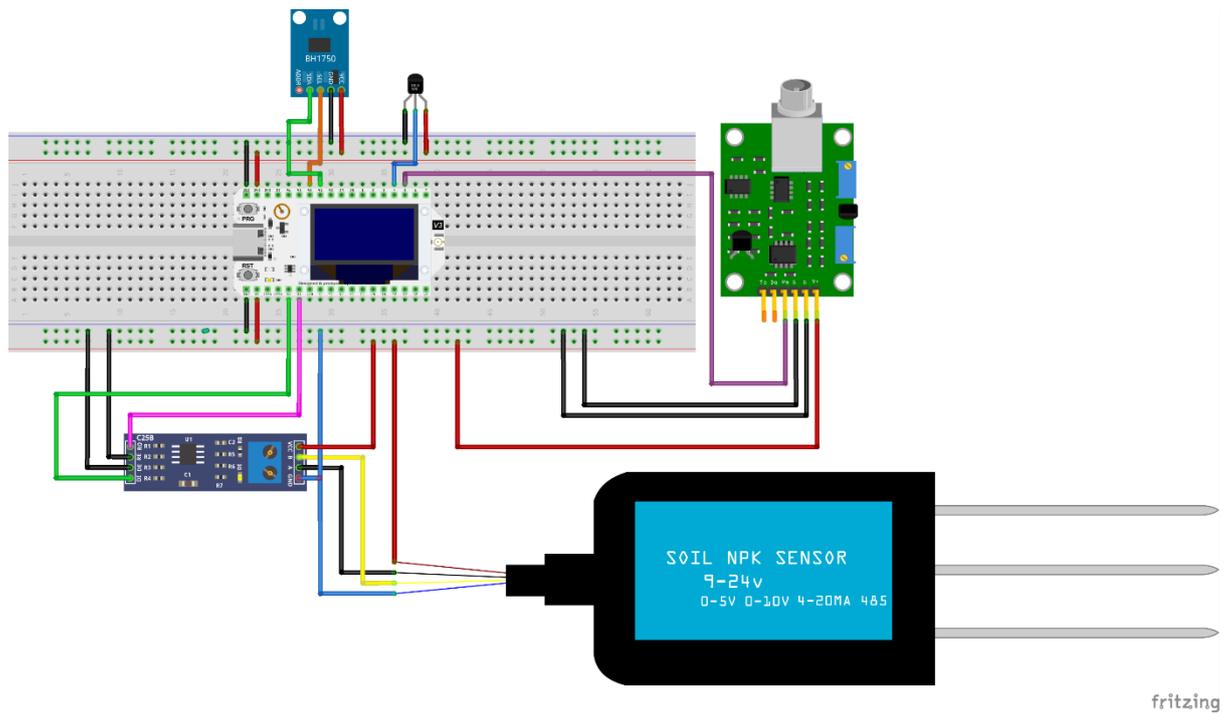
En cuanto a la selección de variables a medir, como la temperatura ambiental, luminosidad, pH de agua y suelo, cantidad de macronutrientes (NPK). Estas variables se han elegido basándose en las necesidades del beneficiario directo. Además, se presentarán los diagramas detallados de la circuitería para cada estación de monitoreo, asegurando que cada una contribuya eficazmente al sistema propuesto.

#### **3.2.2.1 Diagrama de conexiones para Estación de monitoreo 1**

De acuerdo con el diseño detallado en la Figura 7 de la Sección 3.2, que ilustra la arquitectura del sistema de monitoreo, se ha definido que la estación de monitoreo 1 se encargará de medir la temperatura ambiental, luminosidad, pH de agua y suelo, cantidad de macronutrientes (NPK). Esta decisión responde a las necesidades del cultivo en conjunto con el beneficiario del proyecto, para resaltar la importancia de monitorear estas variables para optimizar la gestión del sistema y asegurar las condiciones óptimas para el cultivo de cáñamo medicinal en su etapa vegetativa. Para cumplir con esta condición, se configuró la estación de monitoreo 1 con un diagrama de conexiones mostrado en la Figura 15. Este diagrama detalla las conexiones entre los sensores, el microcontrolador y el módulo LoRa integrado en la placa.

**Figura 15**

*Diagrama de conexiones de estación de monitoreo 1*

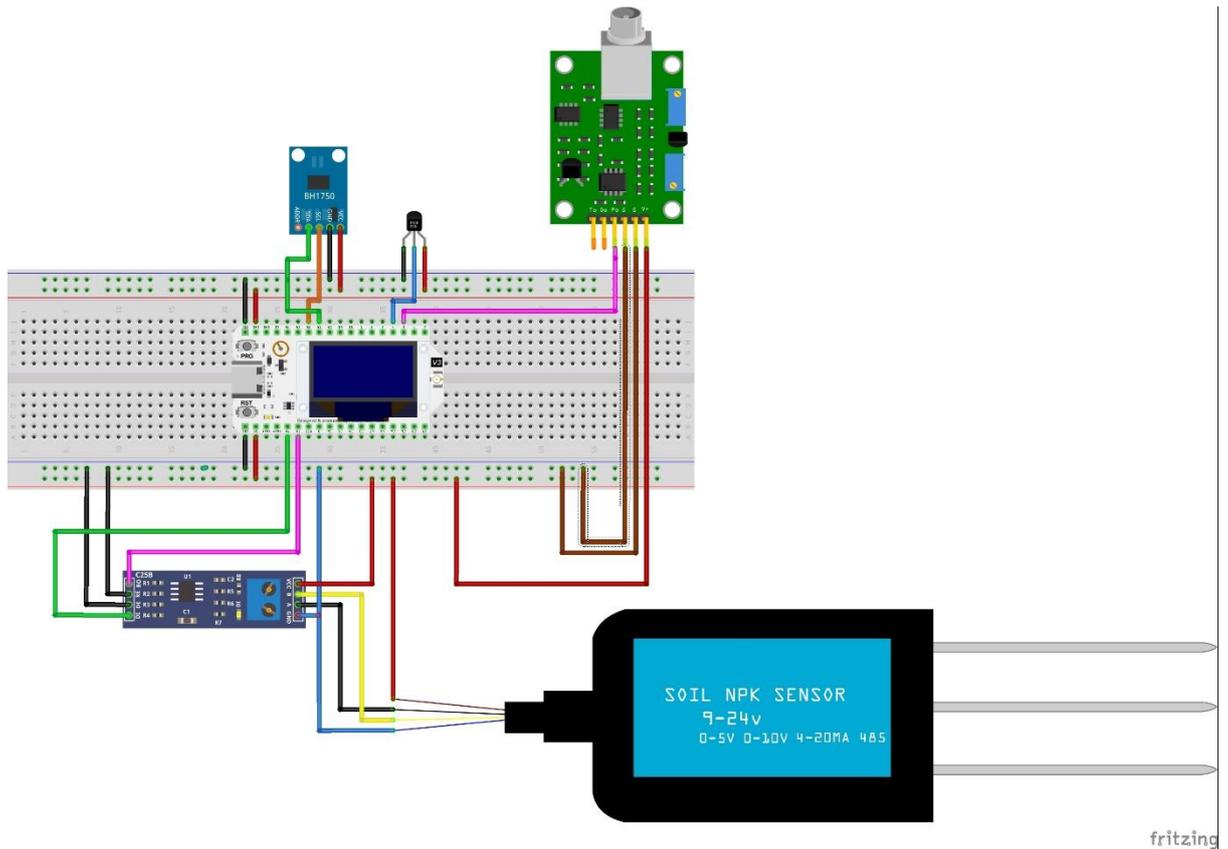


**3.2.2.2 Diagrama de conexiones para la estación de monitoreo 2**

Conforme al diseño ilustrado en la Figura 7 de la Sección 3.2, se define que la segunda estación de monitoreo será responsable de medir la temperatura ambiente, pH del suelo, luminosidad y cantidad de macronutrientes (NPK) en el área de cultivo, conforme a los requisitos previamente fijados. Para implementar estas tareas, se ha diseñado el esquema de conexiones presentado en la Figura 16. Este esquema detalla las conexiones entre el microcontrolador, los sensores, el módulo de comunicación LoRa integrado en la placa. El propósito de este diagrama es convertir los requisitos funcionales en una configuración técnica de dispositivos que posibilite a la estación de monitoreo 2 recoger y enviar de manera eficaz los datos esenciales sobre las variables consideradas.

**Figura 16**

*Diagrama de conexiones para la estación de monitoreo 2*

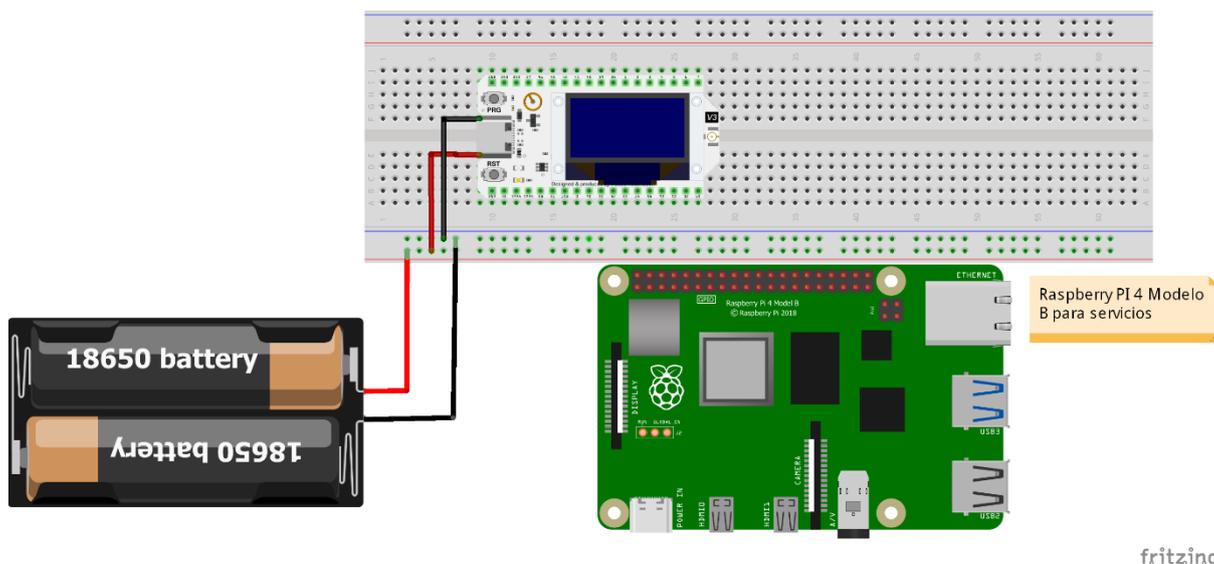


### 3.2.2.3 Diagrama de conexiones para la estación Gateway

Para configurar el nodo central o Gateway, que facilitará la recepción y manejo de los datos recogidos por las estaciones de monitoreo, se ha optado por utilizar la misma placa que en las estaciones LoRa32 V3. Esta elección subraya las responsabilidades asignadas al Gateway, tal como se describe en la Sección 3.2. En la Figura 17, se muestra cómo se realiza la conexión a la fuente de alimentación que es directamente a la red eléctrica o puede ser mediante baterías. El Gateway desempeña roles clave en la recepción, almacenamiento, manejo y visualización de los datos. Elegir adecuadamente el hardware para el nodo central, considerando sus funciones y necesidades de comunicación, es crucial para asegurar una operación eficaz del sistema de monitoreo.

**Figura 17**

*Diagrama de conexiones en Estación Gateway*



#### 3.2.2.4 Diagramas de flujo de sistema de monitoreo del cáñamo medicinal

Los diagramas de flujo adjuntos describen el proceso que seguirá el código en cada estación, tanto de monitoreo como el de Gateway, para supervisar y administrar las variables ambientales y nutricionales del cultivo de cáñamo medicinal en la etapa vegetativa. El sistema se compone de varias estaciones de monitoreo, cuya función es registrar los valores de estas variables en la planta. Estos datos se transmitirán luego a un Gateway que los procesará antes de enviarlos a una plataforma de almacenamiento. Este software procesará esta información, guardando en una base de datos de InfluxDB, desde donde se podrá visualizar mediante el software Grafana. Así, los diagramas de flujo ilustran la secuencia completa del sistema, desde la captura de datos en las estaciones de monitoreo, pasando por la transmisión al nodo Gateway, el almacenaje en InfluxDB, hasta la visualización de los datos finales en Grafana.

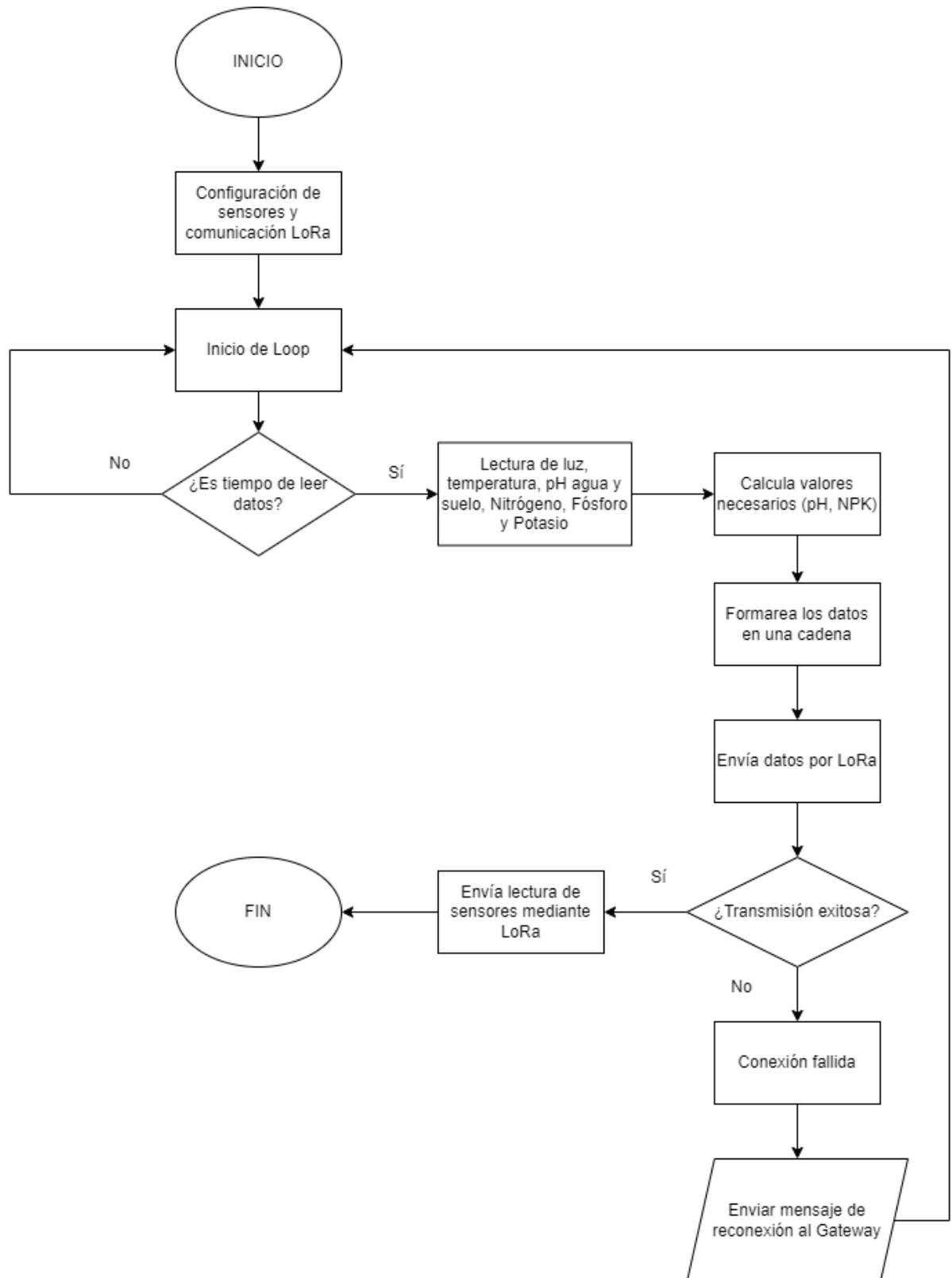
##### 3.2.2.4.1 Diagrama de flujo de estaciones de monitoreo

La Figura 18 ilustra el procedimiento operativo que seguirán las estaciones de monitoreo, conforme a las tareas asignadas. Este procedimiento facilita la captura de datos como temperatura, pH de agua y suelo, cantidades de Nitrógeno, Fósforo y Potasio en el cultivo de cáñamo medicinal utilizando los sensores adecuados. Una vez recogidos, estos datos se

enviarán a un nodo Gateway utilizando la tecnología LoRa. El diagrama detalla el proceso completo en las estaciones: desde la recolección de datos por los sensores, hasta su procesamiento y transmisión a través de comunicación LoRa, culminando en la recepción por el nodo Gateway, que posteriormente enviará los datos a un sistema centralizado de monitoreo.

**Figura 18**

*Diagrama de flujo de estaciones de monitoreo del cultivo de cáñamo medicinal.*



**Nota:** El diagrama de flujo se aplicará de igual manera a la estación de monitoreo 1 y la estación 2, dado que ambas desempeñan funciones similares dentro del sistema de monitoreo de variables ambientales.

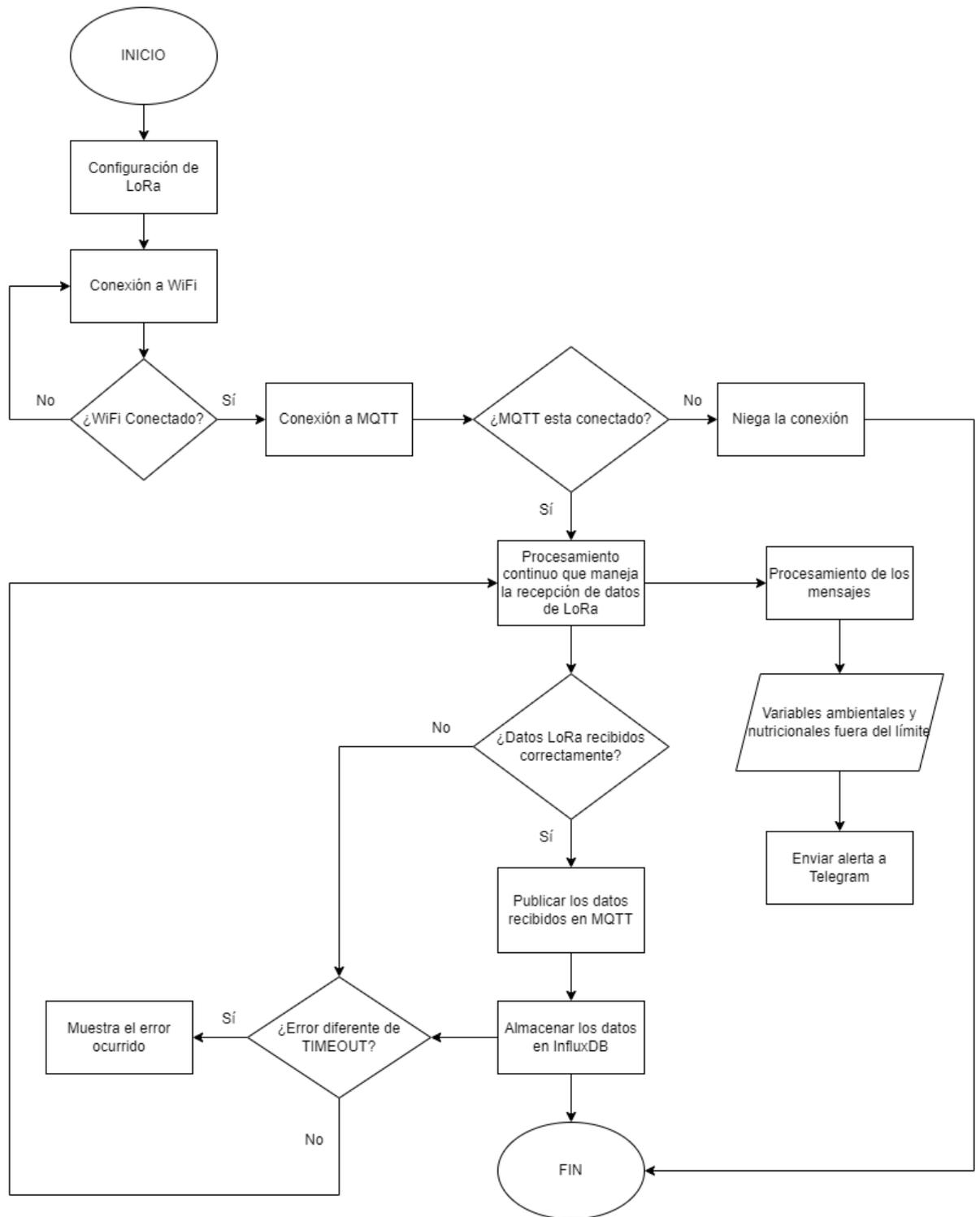
#### 3.2.2.4.2 Diagrama de flujo de estación Gateway

La Figura 19 ilustra el diagrama de flujo correspondiente a la estación Gateway de gestión, el cual expone la estructura del código necesario para su operación eficiente dentro del sistema de monitoreo de variables ambientales y nutricionales del cultivo de cáñamo medicinal. Este código es responsable de recibir los paquetes LoRa transmitidos por las estaciones de monitoreo. En este nodo Gateway, se establecerá la configuración para la conexión a la red LoRa utilizando direcciones específicas y las credenciales para la conexión al bróker MQTT Mosquitto y el respectivo almacenamiento en InfluxDB.

Además, para facilitar la transmisión de datos se utilizará la red WiFi, permitiendo así la comunicación y el procesamiento posterior de la información. Este nodo también incluye un segmento para la respuesta, donde se procesan los datos de las variables ambientales y nutricionales del cáñamo medicinal. Asimismo, se ha incorporado una función de alerta por Telegram que notifica el estado y las anomalías relacionadas a las variables ambientales y nutricionales del cáñamo medicinal.

#### **Figura 19**

*Diagrama de flujo de estación Gateway del cultivo de cáñamo medicinal*



### 3.2.2.5 Lectura y calibración de sensores para las estaciones de monitoreo

Una vez completada la construcción y montaje del hardware para las estaciones de monitoreo, se procedió a la configuración del software. Este paso es vital para abordar posibles

complicaciones en la captura de datos del sistema de monitoreo de variables ambientales y nutricionales del cáñamo medicinal. En esta etapa, se realiza la programación y calibración de los sensores como el de temperatura DS18B20, el sensor luminosidad BH1750, el sensor de pH de agua PH-4502C, el sensor de suelo YGC-SM para la medición de pH de suelo y las condiciones nutricionales de macronutrientes (Nitrógeno, Fósforo, Potasio).

La adecuada configuración y calibración de estos instrumentos de medición son cruciales para asegurar mediciones precisas y fiables de las condiciones ambientales. Utilizando bibliotecas específicas, procedimientos de captura de datos y comparaciones con estándares establecidos, se determinan los coeficientes ideales de calibración para los sensores. Esta fase de ajuste y pruebas es esencial en la implementación de cualquier sistema de monitoreo, ya que proporciona una base sólida para identificar y corregir cualquier error antes de su implementación final.

#### **3.2.2.5.1 Lectura de datos del sensor DS18B20**

En la Figura 20 se observa que la temperatura ambiente se actualiza cada 2 segundos, reflejando el valor pertinente en el ambiente de prueba. Esta medición se encuentra dentro del intervalo operativo del sensor DS18B20 que va desde  $-10^{\circ}\text{C}$  hasta  $+85^{\circ}\text{C}$ , con una variación de  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ .

#### **Figura 20**

*Pruebas de funcionamiento del sensor DS18B20 en diferentes ambientes*

```
17:36:24.456 -> Alerta: La temperatura es muy alta.
17:36:35.001 -> Temperature: 29.56 °C
17:36:35.001 -> Alerta: La temperatura es muy alta.
17:36:45.550 -> Temperature: 27.75 °C
17:36:45.550 -> Alerta: La temperatura es muy alta.
17:36:56.035 -> Temperature: 23.12 °C
17:36:56.107 -> La temperatura está dentro del rango normal.
17:37:06.567 -> Temperature: 18.50 °C
17:37:06.567 -> Alerta: La temperatura es muy baja.
17:37:17.096 -> Temperature: 13.81 °C
17:37:17.160 -> Alerta: La temperatura es muy baja.
17:37:27.626 -> Temperature: 11.56 °C
17:37:27.700 -> Alerta: La temperatura es muy baja.
```

Las mediciones obtenidas de temperatura ambiental están alineadas con los intervalos esperados para el sensor DS18B20, gracias a una frecuencia de muestreo cada 2 segundos que asegura una resolución temporal apropiada. Hay que confirmar que los datos se ajustan a las especificaciones del sensor lo que constituye un paso crucial para corroborar su correcto funcionamiento antes de su despliegue en campo. Los ensayos efectuados muestran un desempeño satisfactorio del DS18B20, brindando confianza en sus resultados para su uso en el sistema de monitoreo planeado.

#### **3.2.2.5.2 Lectura de datos del sensor BH1750**

Los datos sobre la luminosidad que presenta el sensor BH1750 son fundamentales ya que entrega la intensidad luminosa directamente en unidades Lux. Por lo tanto, se debe verificar que los datos mostrados estén dentro del rango de operación del sensor que de acuerdo con las especificaciones del fabricante tiene un amplio rango de 1 a 65535 Lux.

#### **Figura 21**

*Pruebas de funcionamiento del sensor BH1750 en diferentes ambientes de luz*

```

17:44:16.655 -> Alerta: Hay poca luminosidad.
17:44:26.639 -> Light Level: 12295.83 lx
17:44:26.639 -> Alerta: Hay poca luminosidad.
17:44:36.607 -> Light Level: 54612.50 lx
17:44:36.607 -> Alerta: Hay exceso de luminosidad.
17:44:46.649 -> Light Level: 27413.33 lx
17:44:46.649 -> La luminosidad está dentro del rango normal.
17:44:56.645 -> Light Level: 6396.67 lx
17:44:56.645 -> Alerta: Hay poca luminosidad.

```

La Figura 21 presenta los valores obtenidos los cuales se encuentran dentro del rango específico funcional, aprovechando su rendimiento frente a fuentes de luz dependientes como halógena, LED blanco o fluorescente. Los resultados que se obtienen demuestran fiabilidad y validez a los datos que entrega el sensor BH1750, mostrando las variaciones esperadas en las zonas que son alimentadas con luz artificial.

### 3.2.2.5.3 Lectura de datos del sensor PH-4502C

La Figura 22 muestra los valores de pH de agua, la cual se encuentra en el rango de medición del sensor PH-4502C que va desde 0 a 14 (ácido/alcalino). Mediante la sonda (Electrodo E201) se toma lectura a través del conector BNC.

#### Figura 22

*Pruebas de funcionamiento del sensor PH-4502C en agua potable*

```

17:53:05.849 -> pH Value: 7.02
17:53:05.849 -> El pH del agua está dentro del rango normal.
17:53:15.827 -> pH Value: 7.02
17:53:15.874 -> El pH del agua está dentro del rango normal.
17:53:25.853 -> pH Value: 6.98
17:53:25.853 -> El pH del agua está dentro del rango normal.
17:53:35.862 -> pH Value: 7.06
17:53:35.862 -> El pH del agua está dentro del rango normal.
17:53:45.856 -> pH Value: 6.96
17:53:45.856 -> El pH del agua está dentro del rango normal.
17:53:55.848 -> pH Value: 6.91

```

Los valores mostrados indican el valor de ensayo en agua potable la cual tiene un pH entre 6.5 y 8.5 lo cual representa la veracidad de los datos recopilados por el sensor PH-4502C y la sonda E201, la cual se mantiene dentro de los límites para el agua de riego en la zona de cultivo.

#### 3.2.2.5.4 Lectura de datos del sensor de suelo YGC-SM

La configuración del sensor YGC-SM de suelo se la realizó mediante la biblioteca ModbusMaster para poder obtener lectura y establecer comunicación Modbus RTU la cual indica el manual de operación del sensor. Se define un Esclavo para la lectura de los registros, puesto que consulta 8 registros a partir de la dirección 0. Dado que el protocolo Modbus RTU se implementa sobre RS-485 y el Arduino trabaja con niveles de TTL (0-5 V o 0-3.3 V) por lo cual se utilizó un módulo convertidor MAX 13487 a TTL. El sensor cuenta con conexiones para RS485 (A+/B-). Con esta configuración, el código lee los valores registrados Modbus del sensor YCG-SM y los muestra en el monitor serial de Arduino. En la Figura 23 se aprecia la lectura de los valores obtenidos por el sensor YGC-SM para el suelo.

**Figura 23**

*Lectura de valores macronutrientes y pH de Suelo*

```
Lectura exitosa:
PH: 6.45 pH
Nitrogeno: 40.00 mg/kg
Fosforo: 55.00 mg/kg
Potasio: 137.00 mg/kg

Lectura exitosa:
PH: 6.47 pH
Nitrogeno: 40.00 mg/kg
Fosforo: 55.00 mg/kg
Potasio: 137.00 mg/kg
```

Autoscroll  Mostrar marca temporal

### 3.2.3 Programación y calibración de las estaciones de monitoreo

La configuración y valoración de los sensores se realiza de acuerdo con los parámetros de operación especificados por los fabricantes. Este proceso se efectúa en el software mediante el uso del entorno de desarrollo integrado (IDE) de Arduino, que es especialmente adecuado para trabajar con el microcontrolador LoRa32 V3.

Es fundamental incluir en el IDE las bibliotecas necesarias que permitan acceder a las configuraciones específicas de cada sensor y asegurar una captura de datos precisa. La Figura 24 indica las bibliotecas requeridas para configurar estos sensores y el módulo LoRa integrado en la placa son:

**Figura 24**

*Bibliotecas requeridas para el funcionamiento de Estaciones de monitoreo*

```
#include <ModbusMaster.h>
#include <ArduinoJson.h>
#include "LoRaWAN_APP.h"
#include "Arduino.h"
#include <Wire.h>
#include <BH1750.h>
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
```

Antes de compilar el código en el IDE de Arduino, es necesario instalar previamente las librerías correspondientes. El uso de estas librerías facilita la programación al eliminar la necesidad de desarrollar rutinas complejas e interfaces de bajo nivel. Al seleccionar e incorporar las librerías correctas para cada sensor, se optimiza el proceso de desarrollo y se mejora la precisión y fiabilidad de las mediciones. Este proceso es esencial en la configuración efectiva de sistemas de monitoreo que integran múltiples sensores. La Tabla 24 muestra las librerías que se van a usar en el IDE de Arduino y el propietario de esta para el acople de los sensores con la estación de monitoreo

**Tabla 24***Librerías que son utilizadas en las estaciones de monitoreo*

| <b>Librerías para instalar en IDE de Arduino</b> | <b>Propietario librería</b> |
|--------------------------------------------------|-----------------------------|
| <BH1750.h>                                       | Christopher Laws            |
| <DallasTemperatura.h>                            | Miles Burton                |
| <OneWire.h>                                      | Paul Stoffregen             |
| <LoRaWan_APP.h>                                  | HELTEC                      |
| <ModbusMaster.h>                                 | Doc Walker                  |
| <ArduinoJson.h>                                  | Benoit Blanchon             |

Fuente: Autoría Propia

**3.2.3.1 Programación de sensor DS18B20**

El funcionamiento del sensor DS18B20 es necesario para obtener los valores de temperatura precisos. Tiene una resolución ADC seleccionable de 9 a 12 bits, con un rango de precisión de -10°C hasta +85°C con una variación de  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ .

Para valorar el sensor, se utiliza solo un pin de comunicación 1-Wire y se obtienen los valores precisos con el uso de la librería OneWire y DallasTemperature. No necesita de calibración puesto que obtiene valores digitales que lo hacen más fiables al momento de recopilar los valores de temperatura ambiental.

**Figura 25***Código de funcionamiento del sensor DS18B20*

```

OneWire oneWire(oneWireBus);
DallasTemperature sensors(&oneWire);
float temperature;

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  sensors.begin();
}

void loop() {
  pinMode(oneWireBus, INPUT_PULLUP);
  sensors.begin();
  sensors.requestTemperatures();
  temperature = sensors.getTempCByIndex(0);

  Serial.print("Temperature: ");
  Serial.print(temperature);
  Serial.println(" °C");

  // Verificar el rango de la temperatura y enviar alertas
  if (temperature < 20) {
    Serial.println("Alerta: La temperatura es muy baja.");
  } else if (temperature > 25) {
    Serial.println("Alerta: La temperatura es muy alta.");
  } else {
    Serial.println("La temperatura está dentro del rango normal.");
  }
}

```

### 3.2.3.2 Programación de sensor BH1750

Para configurar el sensor de luminosidad BH1750, se debe considerar las características de su funcionamiento. Este sensor tiene un rango de medición de 1 a 65535 Lux. El tiempo de medición es cada 10 segundos con un rechazo a ruido a 50/60 Hz. El código presentado en la Figura 26, se observa que se obtiene mediciones precisas para diferentes entornos de luz artificial, desde luces Halógenas a luces LED con una fiabilidad del 100%.

#### Figura 26

*Código de funcionamiento del sensor BH1750 de luz*

```

BH1750 lightMeter;
float lux;

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  Wire.begin(SDApin, SCLpin);

  if (lightMeter.begin(BH1750::CONTINUOUS_HIGH_RES_MODE, 0x23, &Wire)) {
    Serial.println("BH1750 Ready");
  } else {
    Serial.println("Error initializing BH1750");
  }
}

void loop() {
  lux = lightMeter.readLightLevel();
  Serial.print("Light Level: ");
  Serial.print(lux);
  Serial.println(" lx");

  // Verificar el intervalo de lux y enviar mensajes de alerta
  if (lux < 15000) {
    Serial.println("Alerta: Hay poca luminosidad.");
  } else if (lux > 50000) {
    Serial.println("Alerta: Hay exceso de luminosidad.");
  } else {
    Serial.println("La luminosidad está dentro del rango normal.");
  }
}

```

### 3.2.3.3 Programación y calibración del módulo PH-4502C y sonda E201

Para configurar y calibrar el módulo PH-4502C se la realiza mediante el ajuste de los potenciómetros que cuenta el módulo. El potenciómetro de Offset (POT1) ayuda a calibrar la medición de pH y con el potenciómetro de control de salida (POT2) se ajusta los valores de salida de acuerdo con el voltaje de salida  $\sim 3.7V$ . Este se comprueba cuando se enciende el LED rojo en el módulo de PH. De acuerdo con el rango de medición, si el voltaje se ubica en 3.7 aproximadamente el pH se sitúa en 7.0 como media.

El tiempo de medición para esta prueba es de 10 segundos y se observa en la Figura 27 que se obtiene valores precisos luego de calibrar el módulo PH para valores en agua potable que es la que se usa para riego en los cultivos.

**Figura 27**

*Código de funcionamiento del módulo PH-4502C*

```

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  // Configuración del ancho de ADC a 12 bits
  adc1_config_width(ADC_WIDTH_BIT_12);
  // Configuración del pin de ADC para tener una atenuación de 11 dB
  adc1_config_channel_atten(ADC1_CHANNEL_4, ADC_ATTEN_DB_11);
}

void loop() {
  // Leer el valor crudo del ADC
  int sensorValue = adc1_get_raw(ADC1_CHANNEL_4);
  // Convertir el valor crudo a voltaje
  float measuredVoltage = sensorValue * (3.3 / 4095.0);
  // Ajustar el voltaje medido al rango esperado
  voltage = measuredVoltage * (5.0 / 3.3);
  // Calcular el valor de pH basado en el voltaje
  pHValue = 7 + ((voltage - 3.7) * (14.0 / 5.0));

  // Mostrar el valor de pH
  Serial.print("pH Value: ");
  Serial.println(pHValue);

  // Alertas basadas en el valor de pH
  if (pHValue < 6.0) {
    Serial.println("Alerta: El agua está por debajo del nivel normal; es muy ácida.");
  } else if (pHValue > 7.5) {
    Serial.println("Alerta: El agua está fuera del límite; es muy alcalina.");
  } else {

```

La calibración y programación de los sensores y módulos permiten manejar de mejor forma los valores que se obtienen en cada lectura, con ello, se asegura de reducir los errores y aumentar la eficiencia del sistema de monitoreo y mejorar su desempeño en el ambiente que se va a implementar.

### **3.2.4 Programación del nodo Gateway**

Para asegurar un desempeño óptimo del nodo Gateway, se incorporaron las Librerías esenciales que facilitan la configuración de la comunicación con el módulo LoRa integrado en la placa el cual están encargada de captar la información procedente de las estaciones de monitoreo. Adicionalmente, el código se estructuró para la comunicación con el bróker MQTT

y su posterior conexión a la base de datos de InfluxDB. La carga de las librerías específicas y la configuración autónoma de cada nodo son vitales para el buen funcionamiento del Gateway, optimizando la recepción de datos LoRa que recibe de las estaciones de monitoreo.

## Figura 28

### *Conexiones del Gateway con el Bróker MQTT, LoRa y base de datos InfluxDB*

```

#include <ArduinoJson.h>
#include <WiFi.h>
#include <AsyncMqttClient.h>
#include <InfluxDbClient.h>
#include "LoRaWAN_APP.h"

const char* ssid = "Flia.Castro_Dias";
const char* password = "1005406820";

const char* mqtt_server = "192.168.1.20";
const int mqtt_port = 1883;
const char* mqtt_user = "ismael";
const char* mqtt_password = "root123";

const char* influxdb_url = "http://192.168.1.20:8086";
const char* influxdb_token = " ";
const char* influxdb_org = " ";
const char* influxdb_bucket = "Cannabis";

InfluxDBClient client(influxdb_url, influxdb_org, influxdb_bucket, influxdb_token);
AsyncMqttClient mqttClient;

#define RF_FREQUENCY 915000000
#define TX_OUTPUT_POWER 14
#define LORA_BANDWIDTH 0
#define LORA_SPREADING_FACTOR 7
#define LORA_CODINGRATE 1
#define LORA_PREAMBLE_LENGTH 8
#define LORA_SYMBOL_TIMEOUT 0
#define LORA_FIX_LENGTH_PAYLOAD_ON false
#define LORA_IQ_INVERSION_ON false
|
#define RX_TIMEOUT_VALUE 1000
.....

```

En la Figura 28, se destacan las bibliotecas que simplifican el código y facilitan el uso del módulo integrado LoRa propiedad de Heltec para este tipo de microcontroladores. Conforme al esquema eléctrico mostrado en la Figura 15 de la sección 3.2.2.3, se integra la placa LoRa32 V3 con el módulo LoRa integrado, el cual es crucial para recibir datos de las estaciones remotas. Posteriormente, se implementa el protocolo MQTT para establecer la conexión con el Gateway. Además, se hace la conexión con la base de datos de InfluxDB en la que se ubica las credenciales necesarias para conectarse con esta plataforma, como ubicar el Token del Bucket creado en InfluxDB el cual se denomina Cannabis, además se ubica el código de la organización a la que pertenece el Bucket creado. La conexión del Gateway con los

servicios se lo realiza mediante WiFi para facilitar la comunicación como se describe en la Tabla 25:

**Tabla 25**

*Parámetros de conexión de Gateway con los servicios*

| <b>Parámetros</b>                   | <b>Credenciales</b> |
|-------------------------------------|---------------------|
| IP del servidor                     | 192.168.1.20        |
| Usuario MQTT                        | ismael              |
| Contraseña de usuario MQTT          | root123             |
| Puerto de comunicación MQTT TCP     | 1883                |
| Puerto de comunicación InfluxDB TCP | 8086                |

#### ***3.2.4.1 Código para envío de datos mediante protocolo MQTT***

El uso del protocolo MQTT en lugar de HTTP, se escogió debido a su eficiencia en la gestión de datos locales. En el proyecto de monitoreo de variables ambientales y nutricionales del cultivo de cáñamo medicinal en la etapa vegetativa, donde se trabaja con volúmenes moderados de datos que necesitan ser almacenados localmente, MQTT ofrece ventajas significativas. Una de ellas es su capacidad de mantener operativo el sistema incluso cuando hay interrupciones en la red WiFi, a diferencia de HTTP que dejaría el sistema inutilizable.

MQTT se caracteriza por ser un protocolo de comunicación ligero que opera bajo un modelo de publicación y suscripción entre dispositivos. Este método no solo minimiza el uso de ancho de banda, sino que también fortalece la seguridad, protegiendo los datos de posibles accesos no autorizados y asegurando su integridad.

La configuración del bróker MQTT implica el uso de credenciales específicas para cada suscripción. Una vez autenticados, los usuarios pueden configurar y asignar tópicos, tal como se muestra en la Figura 29 del documento. Esta estructura facilita la clasificación y el acceso a los datos recogidos por las estaciones de monitoreo.

### Figura 29

*Publicación de los datos de los sensores a sus distintos tópicos para estación 1 y 2*

```
char tempTopic[50], luzTopic[50], phTopic[50], phsueloTopic[50], nitrogenoTopic[50], fosforoTopic[50], potasioTopic[50];
sprintf(tempTopic, "estacion%d/temperatura", id);
sprintf(luzTopic, "estacion%d/luz", id);
sprintf(phTopic, "estacion%d/phAgua", id);
sprintf(phsueloTopic, "estacion%d/phSuelo", id);
sprintf(nitrogenoTopic, "estacion%d/Nitrogeno", id);
sprintf(fosforoTopic, "estacion%d/Fosforo", id);
sprintf(potasioTopic, "estacion%d/Potasio", id);

mqttClient.publish(tempTopic, 0, false, String(temp).c_str());
mqttClient.publish(luzTopic, 0, false, String(luz).c_str());
mqttClient.publish(phTopic, 0, false, String(pH).c_str());
mqttClient.publish(phsueloTopic, 0, false, String(pHSuelo).c_str());
mqttClient.publish(nitrogenoTopic, 0, false, String(SMNitrogeno).c_str());
mqttClient.publish(fosforoTopic, 0, false, String(SMFosforo).c_str());
mqttClient.publish(potasioTopic, 0, false, String(SMPotasio).c_str());
```

#### 3.2.4.2 Servicio de almacenamiento de base de datos InfluxDB

Se ha decidido implementar la base de datos de InfluxDB de manera local en el Gateway de servicios. Todos los datos recibidos por las estaciones de monitoreo serán almacenados en esta base de datos. Con el entorno preparado para recibir y gestionar la información recogida por las estaciones de monitoreo, se procede a configurar el servicio de InfluxDB en el servidor de base de datos.

Se presenta en el Anexo 2 la instalación del servicio InfluxDB, en la Figura 30 se verifica el estado del servicio activo.

### Figura 30

*Instalación de paquetes relacionados a InfluxDB*

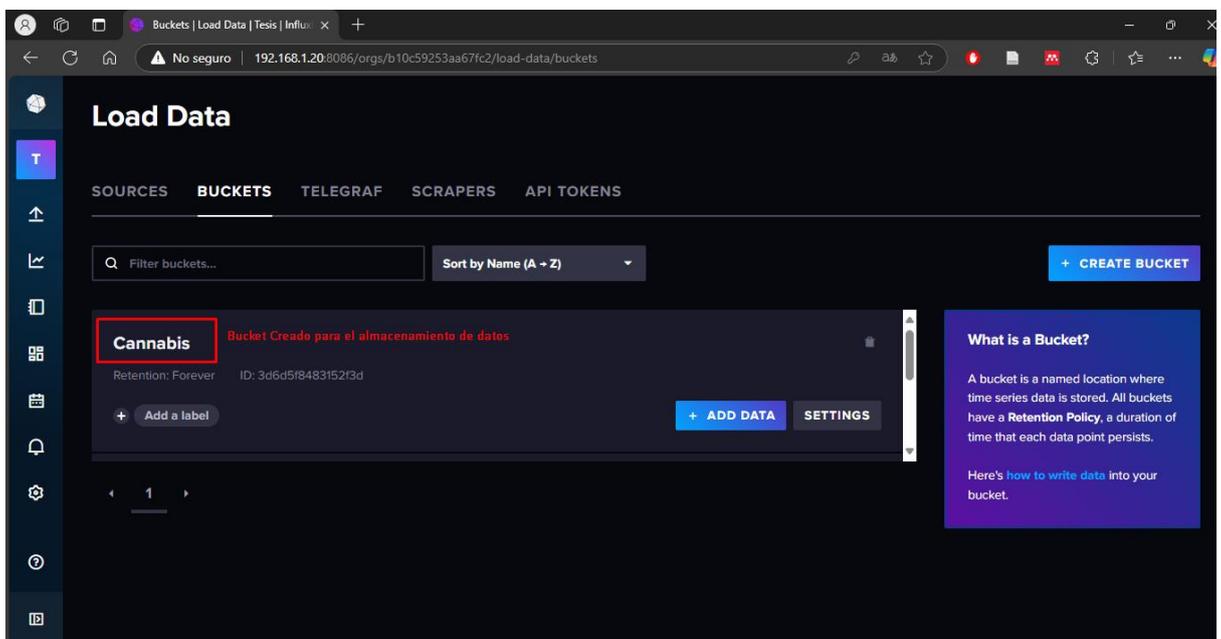
```
ismael@raspberrypi:~$ sudo systemctl status influxdb
● influxdb.service - InfluxDB is an open-source, distributed, time series datab
Loaded: loaded (/lib/systemd/system/influxdb.service; enabled; preset: ena
Active: active (running) since Sun 2025-01-12 12:47:09 -05; 8h ago
Docs: https://docs.influxdata.com/influxdb/
Main PID: 1238 (influxd)
Tasks: 27 (limit: 3915)
CPU: 10min 11.820s
CGroup: /system.slice/influxdb.service
├─1238 /usr/bin/influxd
├─1284 /usr/bin/dbus-daemon --syslog --fork --print-pid 4 --print->
├─1285 /usr/bin/dbus-daemon --syslog --fork --print-pid 4 --print->
├─1427 /usr/bin/dbus-daemon --syslog --fork --print-pid 4 --print->
└─1443 /usr/bin/dbus-daemon --syslog --fork --print-pid 4 --print->

ene 12 20:49:29 raspberrypi influxd-systemd-start.sh[1238]: ts=2025-01-13T01:49>
ene 12 20:49:41 raspberrypi influxd-systemd-start.sh[1238]: ts=2025-01-13T01:49>
ene 12 20:49:49 raspberrypi influxd-systemd-start.sh[1238]: ts=2025-01-13T01:49>
ene 12 20:49:59 raspberrypi influxd-systemd-start.sh[1238]: ts=2025-01-13T01:49>
ene 12 20:50:09 raspberrypi influxd-systemd-start.sh[1238]: ts=2025-01-13T01:50>
ene 12 20:50:19 raspberrypi influxd-systemd-start.sh[1238]: ts=2025-01-13T01:50>
ene 12 20:50:30 raspberrypi influxd-systemd-start.sh[1238]: ts=2025-01-13T01:50>
ene 12 20:50:40 raspberrypi influxd-systemd-start.sh[1238]: ts=2025-01-13T01:50>
ene 12 20:50:49 raspberrypi influxd-systemd-start.sh[1238]: ts=2025-01-13T01:50>
lines 1-23...skipping...
```

La Figura 31 indica el panel de visualización de InfluxDB en su versión 2, la cual se puede gestionar mediante un navegador web, y en la que se indica el Bucket creado llamado Cannabis para trabajar en el almacenamiento de los datos recibidos por el nodo Gateway.

**Figura 31**

*Visualización de servicio InfluxDB desde un navegador web*



### 3.2.4.3 Servicio de visualización de datos Grafana

Se ha optado por implementar el servicio de Grafana de manera local en el Gateway de servicios. Toda la información recibida desde las estaciones de monitoreo será visualizada y gestionada a través de este servicio. Con el entorno configurado para procesar y presentar los datos recolectados por las estaciones de monitoreo, se procede a realizar la configuración del sistema de Grafana en el servidor destinado para la visualización de datos.

Se presenta en el Anexo 4, los pasos de instalación de este servicio. En la Figura 32 se verifica el estado del servicio de la visualización de datos.

**Figura 32**

*Estado de servicio Grafana*

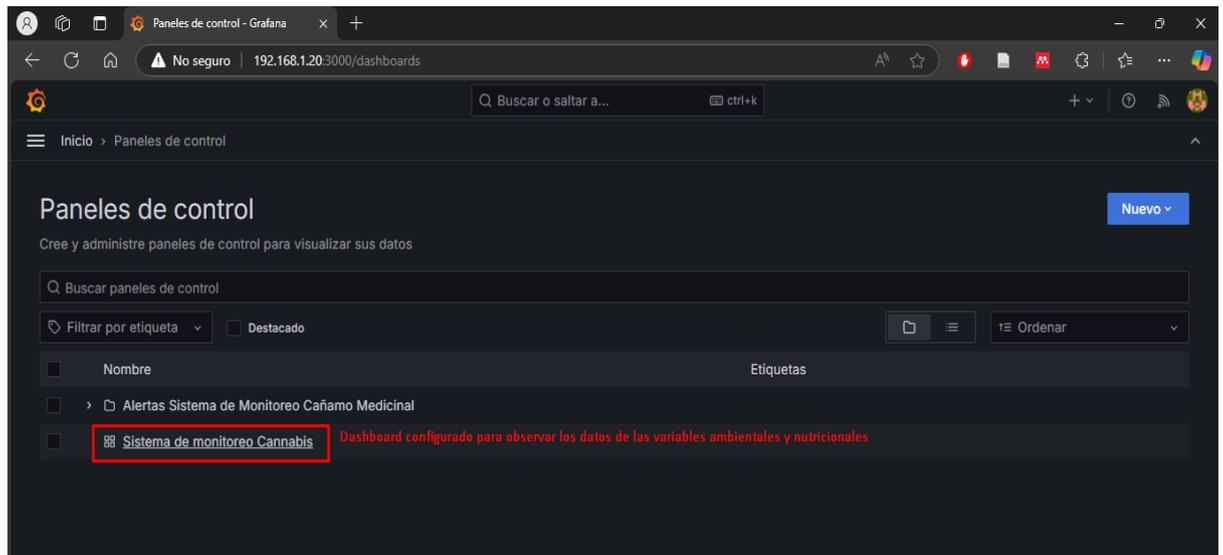
```
ismael@raspberrypi:~ $ sudo systemctl status grafana-server
● grafana-server.service - Grafana instance
   Loaded: loaded (/lib/systemd/system/grafana-server.service; enabled; preset: enabled)
   Active: active (running) since Sun 2025-01-12 12:47:09 -05; 8h ago
     Docs: http://docs.grafana.org
   Main PID: 1564 (grafana)
    Tasks: 17 (limit: 3915)
      CPU: 10min 28.067s
   CGroup: /system.slice/grafana-server.service
           └─1564 /usr/share/grafana/bin/grafana server --config=/etc/grafana/grafana.ini ->

ene 12 20:57:05 raspberrypi grafana[1564]: logger=ngalert.sender.router rule_uid=fe81qkdd1dxj>
ene 12 20:57:50 raspberrypi grafana[1564]: logger=ngalert.sender.router rule_uid=de848nf1pbb1>
ene 12 20:58:00 raspberrypi grafana[1564]: logger=ngalert.sender.router rule_uid=ae81qs15tscn>
ene 12 20:58:05 raspberrypi grafana[1564]: logger=ngalert.sender.router rule_uid=fe81qkdd1dxj>
ene 12 20:58:31 raspberrypi grafana[1564]: logger=cleanup t=2025-01-12T20:58:31.693826263-05:>
ene 12 20:58:32 raspberrypi grafana[1564]: logger=plugins.update.checker t=2025-01-12T20:58:3>
ene 12 20:58:50 raspberrypi grafana[1564]: logger=ngalert.sender.router rule_uid=de848nf1pbb1>
ene 12 20:59:00 raspberrypi grafana[1564]: logger=ngalert.sender.router rule_uid=ae81qs15tscn>
ene 12 20:59:05 raspberrypi grafana[1564]: logger=ngalert.sender.router rule_uid=fe81qkdd1dxj>
ene 12 20:59:50 raspberrypi grafana[1564]: logger=ngalert.sender.router rule_uid=de848nf1pbb1>
lines 1-20/20 (END)
```

La Figura 33 indica el panel de visualización accediendo desde un navegador al servicio de Grafana, el cual permite crear paneles de Dashboard para observar los datos recibidos y almacenados en InfluxDB para una mejor apreciación de estos valores en cada variable monitoreada.

**Figura 33**

### Visualización del panel de control en Grafana



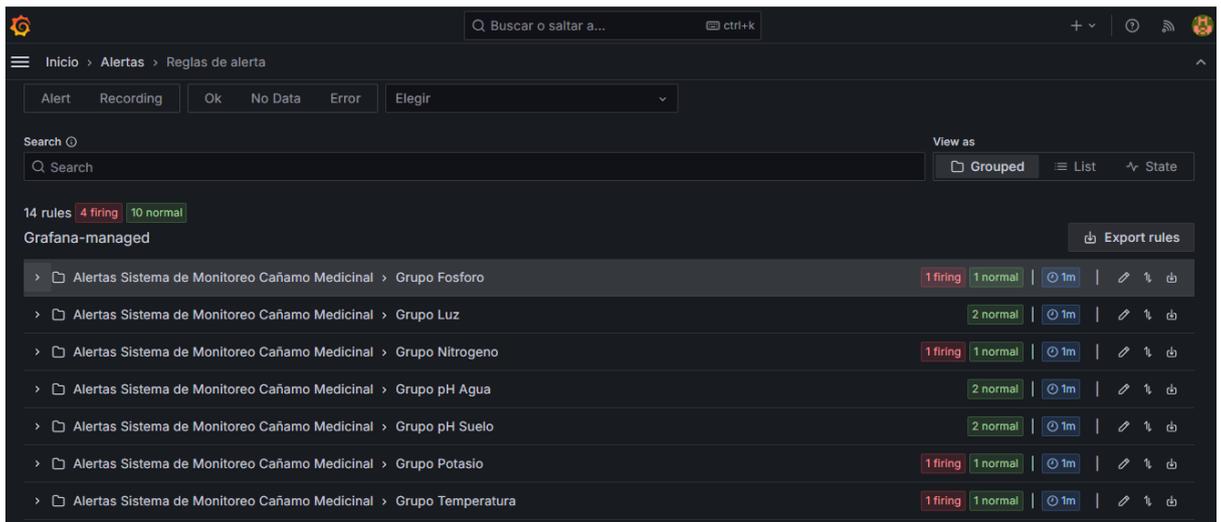
#### 3.2.4.4 Configuración de Alertas en Grafana y Telegram

El sistema de monitoreo implementado utiliza Grafana como plataforma principal para la visualización de datos y generación de alertas, y Telegram como herramienta para la notificación de eventos críticos en tiempo real. La configuración se realizó para garantizar que los usuarios puedan recibir notificaciones precisas y oportunas sobre desviaciones en las variables ambientales y nutricionales del cultivo de cáñamo medicinal.

En Grafana, se definieron reglas específicas para activar las alertas. Estas reglas están vinculadas a paneles de gráficos y activan una notificación cuando los valores superan los umbrales definidos. La Figura 34 indica las reglas configuradas en el sistema para cada variable monitoreada.

#### Figura 34

*Configuración de reglas en Grafana.*



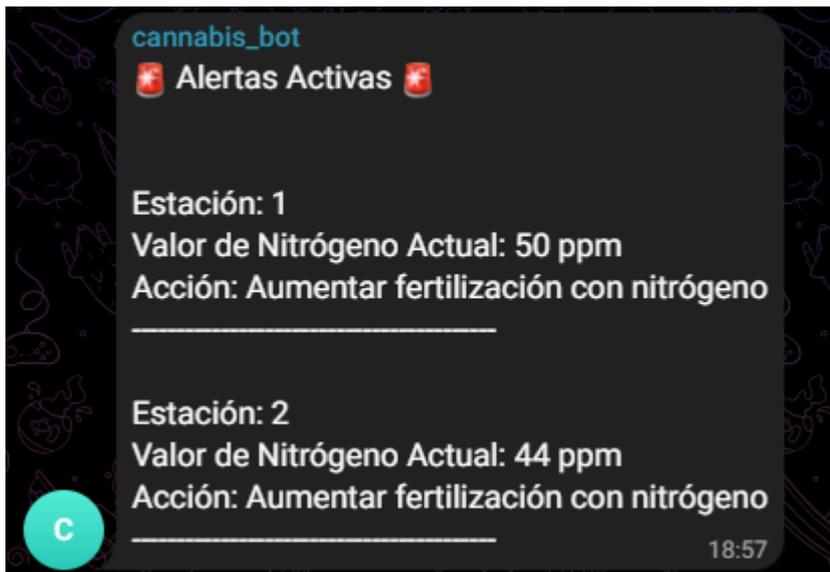
En el servidor Grafana, se configuró un canal de notificación vinculado a Telegram utilizando un bot. Este bot se creó específicamente para enviar alertas generadas por el sistema. Grafana envía mensajes automáticos a través de Telegram cuando se activa una alerta en el sistema. Este mensaje incluye:

- Alerta Activa
- Estación de monitoreo a la que pertenece.
- Valor actual de la variable medida
- Acción por tomar para la variable en alerta.

La Figura 35 se observa la estructura mencionada para la regla de alerta configurada en Grafana la cual está realizando una evaluación cada 10 minutos de frecuencia con la que se repite para enviar el mensaje.

### **Figura 35**

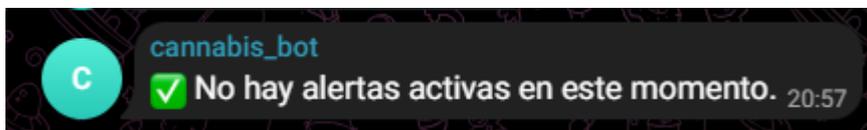
*Estructura del mensaje de alerta en Telegram*



La Figura 36 indica el mensaje en el que no existen alertas activas para las variables ambientales y nutricionales en el cultivo de cáñamo medicinal.

**Figura 36**

*Mensaje cuando no existen alertas activas en Telegram.*



### **3.3 Implementación del sistema de monitoreo de variables ambientales y nutricionales del cultivo de cáñamo medicinal**

La puesta en marcha del sistema de monitoreo para el cultivo de cáñamo medicinal en un entorno indoor constituye un paso fundamental hacia la adopción de prácticas de agricultura de precisión. Este sistema está diseñado para monitorear de forma continua y en tiempo real las variables clave necesarias para el óptimo desarrollo de las plantas durante su etapa vegetativa. Al integrar tecnologías como sensores de alta precisión, comunicación LoRa y una plataforma de visualización interactiva mediante Grafana, se garantiza un control eficiente de las condiciones del cultivo, mejorando tanto la sostenibilidad como la eficiencia operativa.

El propósito principal de la implementación es asegurar que las variables ambientales (como la temperatura y la luminosidad) y las nutricionales (incluyendo el pH del agua, el pH del suelo y los niveles de macronutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio) se mantengan en los niveles ideales para el desarrollo saludable del cáñamo medicinal. Esto no solo mejora la calidad del cultivo, sino que también reduce riesgos asociados con plagas, enfermedades y desequilibrios en el manejo de los recursos.

La implementación del sistema se realizó siguiendo un enfoque estructurado basado en la metodología en cascada, que incluye las fases de análisis de requisitos, diseño, desarrollo, pruebas y mantenimiento. Esto aseguró que cada etapa del proyecto fuera ejecutada de manera ordenada, con validaciones periódicas para garantizar la correcta integración de los componentes tecnológicos.

### ***3.3.1 Implementación del sistema de monitoreo de cultivo de cáñamo medicinal en la etapa vegetativa***

La etapa vegetativa del cultivo de cáñamo medicinal es crucial para garantizar el crecimiento saludable de las plantas. En esta fase, es indispensable controlar con precisión las condiciones ambientales y nutricionales, ya que cualquier variación puede afectar negativamente su desarrollo. La implementación de un sistema de monitoreo en un entorno indoor permite mantener las variables clave en rangos óptimos mediante el uso de tecnologías avanzadas como sensores de alta precisión, comunicación inalámbrica LoRa y visualización en tiempo real a través de Grafana.

El principal objetivo de este sistema es supervisar constantemente las variables críticas para el desarrollo del cáñamo medicinal, garantizando que las condiciones del ambiente y los nutrientes estén dentro de los rangos ideales. Las principales variables monitoreadas incluyen:

- Condiciones ambientales: Temperatura, luminosidad, pH del agua y pH del suelo

- Condiciones nutricionales: Niveles de macronutrientes como Nitrógeno (N), Fósforo (P) y Potasio (K).

Este monitoreo constante permite prevenir problemas como estrés térmico, desequilibrios nutricionales o una iluminación inadecuada, factores que pueden comprometer la calidad y cantidad de la producción. La Tabla 26 detalla las variables a monitorear, así como el sensor utilizado, valores óptimos y su impacto en el cultivo de cáñamo medicinal.

**Tabla 26**

*Resumen de variables monitoreadas*

| <b>Variable Monitoreada</b> | <b>Sensor</b>         | <b>Rango Óptimo</b> | <b>Importancia para el cultivo</b>   |
|-----------------------------|-----------------------|---------------------|--------------------------------------|
| Temperatura                 | DS18B20               | 20 °C – 25 °C       | Favorece un desarrollo saludable.    |
| Luminosidad                 | BH1750                | 15000-50000 lux     | Promueve el crecimiento vegetativo.  |
| pH de Agua                  | PH-4502C<br>electrodo | con 6.0 - 7.0       | Optimiza el agua de riego.           |
| pH de Suelo                 | YGC-SM                | 6.0 - 7.0           | Optimiza la absorción de nutrientes. |
| Nitrógeno (N)               | YGC-SM                | 150 – 200 ppm       | Estimula el crecimiento foliar.      |

|             |        |               |                                     |
|-------------|--------|---------------|-------------------------------------|
| Fósforo (P) | YGC-SM | 30 – 60 ppm   | Mejora el desarrollo de raíces.     |
| Potasio (K) | YGC-SM | 150 – 200 ppm | Fortalece las estructuras celulares |

Fuente: Autoría Propia

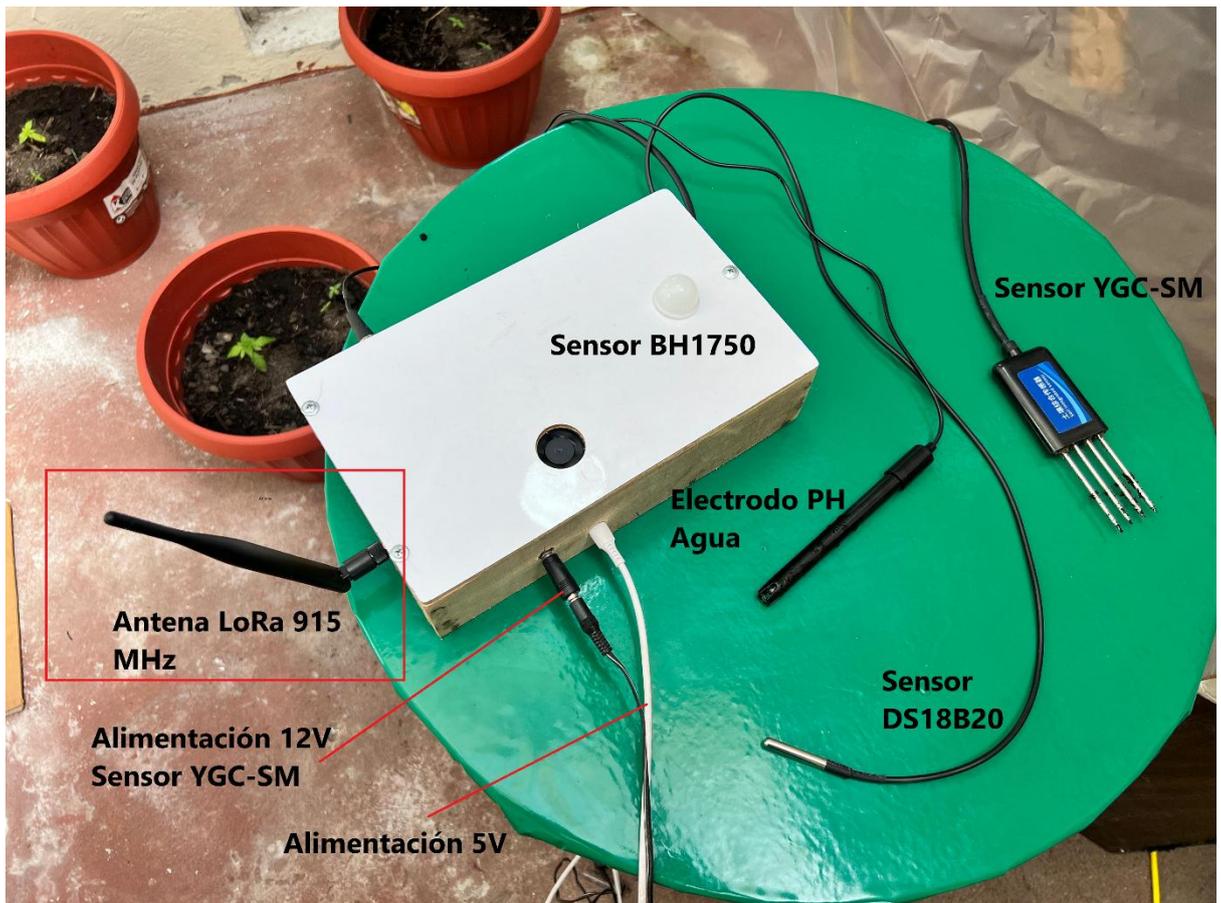
### ***3.3.1.1 Ubicación de las estaciones de monitoreo y Gateway***

La correcta ubicación de las estaciones de monitoreo y el Gateway es un aspecto esencial para asegurar el buen funcionamiento del sistema diseñado para supervisar el cultivo de cáñamo medicinal en un entorno indoor. Al garantizar una disposición estratégica de estos elementos, se optimiza la recolección de datos, la transmisión de información y el análisis en tiempo real de las variables ambientales y nutricionales que influyen en el desarrollo del cultivo.

Las estaciones de monitoreo se distribuyen en diferentes puntos del cultivo para abarcar de manera representativa las condiciones generales del entorno. Esto permite que los datos obtenidos reflejen de forma precisa el estado del cultivo en cada área. La Figura 37 se describe los elementos activos por parte de la Estación 1, en la que se menciona los sensores empleados además de la fuente de alimentación de la estación y la antena RF de comunicación LoRa 915 MHz.

### **Figura 37**

*Sistema de monitoreo para Estación 1*



Los sensores de temperatura y luminosidad se colocaron a una altura considerable de la maceta de la planta, donde estos factores tienen mayor impacto en el crecimiento de las plantas. El sensor YGC-SM que mide el pH del suelo y los nutrientes (nitrógeno, fósforo y potasio) se instaló cerca de las raíces para garantizar lecturas representativas del entorno radicular. En la Figura 38 se indica la estación 2 con la apreciación de los factores considerados para el desarrollo de la planta en la fase vegetativa.

### **Figura 38**

*Sistema de monitoreo para la Estación 2.*



El Gateway, que actúa como centro de recepción y procesamiento de datos, fue colocado en un lugar estratégico dentro del ambiente indoor. Se instaló en un punto equidistante de las estaciones de monitoreo, asegurando que las señales transmitidas mediante LoRa lleguen con alta fiabilidad y sin pérdidas significativas de datos. Se eligió un lugar con acceso a energía eléctrica y conexión a la red local, permitiendo una integración eficiente con la base de datos InfluxDB y la plataforma de visualización Grafana. La Figura 39 indica los parámetros que contiene el Nodo Gateway para poder operar en el sistema.

**Figura 39**

*Estación Nodo central Gateway*



Aunque el cultivo se desarrolla en un ambiente controlado, el Gateway se ubicó en un área protegida para evitar riesgos, como derrames accidentales de agua o fluctuaciones extremas de temperatura, que pudieran afectar su funcionamiento.

La ubicación estratégica de las estaciones de monitoreo y el Gateway es esencial para garantizar el éxito del sistema de monitoreo. Al asegurar una cobertura adecuada, comunicación estable y acceso para el mantenimiento, se facilita la gestión eficiente del cultivo de cáñamo medicinal. Este enfoque no solo optimiza la recolección de datos, sino que también mejora la sostenibilidad y escalabilidad del sistema.

### ***3.3.1.2 Rangos de medición óptimos de las variables ambientales y nutricionales***

En el cultivo de cáñamo medicinal en un ambiente indoor, es crucial mantener las variables ambientales y nutricionales dentro de rangos específicos para garantizar un crecimiento saludable durante la etapa vegetativa. Estos rangos no solo influyen en el desarrollo de las plantas y la calidad del producto final, sino también en el uso eficiente de recursos, contribuyendo a una gestión más sostenible del cultivo.

Controlar estas variables dentro de límites establecidos permite generar un entorno estable y favorable para el desarrollo uniforme de las plantas. Esto previene problemas como estrés térmico, deficiencias de nutrientes y efectos adversos de una exposición inadecuada a la luz. Los valores óptimos se definen en función de las necesidades biológicas del cáñamo medicinal, considerando las condiciones específicas del entorno indoor.

Para facilitar la interpretación de los datos recolectados, el sistema de monitoreo utiliza indicadores de color en Grafana que representan el estado de cada variable:

- Bajo el rango óptimo (Azul): La variable está por debajo del nivel ideal, lo que puede generar efectos negativos específicos.
- Rango óptimo (Verde): La variable se encuentra dentro del intervalo ideal, favoreciendo el desarrollo del cultivo en su fase vegetativa.
- Por encima del rango óptimo (Rojo): La variable supera los límites ideales, lo que puede causar problemas en las plantas.

A continuación, se presenta en la Tabla 27, los detalles que incluye los rangos ideales para cada variable, junto con los indicadores de color y sus respectivos impactos en el cultivo:

**Tabla 27**

*Rangos óptimos y efectos asociados del cultivo de cáñamo medicinal en la etapa vegetativa.*

| Variable | Rango óptimo | Indicador Azul<br>(Bajo el rango) | Indicador Verde (óptimo) | Indicador Rojo<br>(Por encima del rango) |
|----------|--------------|-----------------------------------|--------------------------|------------------------------------------|
|          |              |                                   |                          |                                          |

|                      |               |                                                                                  |                                                                            |                                                                                   |
|----------------------|---------------|----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| Temperatura<br>(°C)  | 20 – 25       | < 20 (Azul):<br>Crecimiento<br>lento<br>metabolismo<br>reducido                  | 20 - 25 (Verde):<br>Desarrollo<br>por equilibrado<br>saludable.            | > 25 (Rojo):<br>Estrés térmico<br>y que puede dañar<br>tejidos foliares.          |
| Luminosidad<br>(lux) | 15000 – 50000 | < 15000 (Azul):<br>Fotosíntesis<br>insuficiente;<br>retraso en el<br>desarrollo. | 15000 - 50000 (Verde):<br>Fotosíntesis<br>óptima y buen<br>crecimiento.    | > 50,000 (Rojo):<br>Quemaduras en<br>hojas y pérdida<br>de biomasa.               |
| pH de Agua           | 6.0 – 7.0     | < 6.0 (Azul):<br>Acidez<br>excesiva;<br>toxicidad por<br>aluminio.               | 6.0-7.0 (Verde):<br>Eficiencia<br>máxima en el<br>uso de<br>fertilizantes. | > 7.0 (Rojo):<br>Alcalinidad que<br>limita la<br>disponibilidad<br>de nutrientes. |
| pH de Suelo          | 6.0 – 7.0     | < 6.3 (Azul):<br>Deficiencia de<br>fósforo y<br>magnesio.                        | 6.0-7.0 (Verde):<br>Absorción<br>eficiente de<br>nutrientes.               | > 7.0 (Rojo):<br>Bloqueo de<br>micronutrientes<br>como hierro.                    |
| Nitrógeno<br>(ppm)   | 150 – 200     | < 150 (Azul):<br>Clorosis<br>(amarillamiento)                                    | 150-200 (Verde):<br>Follaje<br>vigoroso y                                  | > 200 (Rojo):<br>Acumulación de<br>sales que puede                                |

---

|               |           |                 |                  |                |
|---------------|-----------|-----------------|------------------|----------------|
|               |           | por deficiencia | crecimiento      | causar         |
|               |           | de nitrógeno.   | acelerado.       | toxicidad.     |
| Fósforo (ppm) | 30 – 60   | < 30 (Azul):    | 30 - 60 (Verde): | > 60 (Rojo):   |
|               |           | Desarrollo      | Raíces robustas  | Bloqueo de     |
|               |           | radicular       | y buena          | nutrientes por |
|               |           | deficiente      | y absorción      | de acumulación |
|               |           | absorción       | agua.            | excesiva.      |
|               |           | limitada.       |                  |                |
| Potasio (ppm) | 150 – 200 | < 150 (Azul):   | 150-200          | > 200 (Rojo):  |
|               |           | Menor           | (Verde): Fuerte  | Desequilibrio  |
|               |           | resistencia     | y estructura     | que afecta la  |
|               |           | calidad celular | celular          | y absorción de |
|               |           | reducida.       | fotosíntesis     | calcio y       |
|               |           |                 | eficiente.       | magnesio.      |

---

Fuente: Autoría Propia

El uso de rangos definidos con indicadores de color facilita la interpretación de las condiciones del cultivo, permitiendo identificar rápidamente situaciones que requieren atención. Este enfoque no solo asegura un crecimiento uniforme y saludable, sino que también permite la optimización de recursos y la prevención de problemas, contribuyendo a la sostenibilidad y productividad del cultivo de cáñamo medicinal en un entorno controlado.

## **CAPÍTULO IV. Pruebas de funcionamiento**

En esta sección se presentarán los resultados obtenidos durante la recopilación de datos, los cuales demuestran el desempeño del sistema desarrollado. Para llevar a cabo esta etapa, se ha seguido como guía la metodología en cascada, aplicada al diseño e implementación del sistema destina al monitoreo de variables ambientales y nutricionales del cultivo de cáñamo medicinal en la etapa vegetativa.

El objetivo principal de este proyecto es monitorear las condiciones ambientales y nutricionales para la fase vegetativa del cultivo de cáñamo, con la finalidad de mantener el control del cáñamo medicinal y minimizar el impacto de enfermedades y plagas. Por consiguiente, los resultados expuestos reflejan la mejora en las condiciones tanto ambientales como nutricionales, facilitando una mejor gestión del cultivo y contribuyendo en esta fase del ciclo de vida del cáñamo con las índoles necesarias para su crecimiento con un sistema radicular robusto y una abundante cantidad de hojas, lo cual es necesario para acumular energía que será utilizada durante la floración. Así, se minimiza los riesgos de anomalías en esta fase de desarrollo de la planta, beneficiando directamente al agricultor.

Las pruebas realizadas confirman el adecuado funcionamiento del hardware del sistema, validando su diseño. Además, se incluye la evaluación de los cambios positivos y las ventajas observadas en la fase vegetativa del cultivo tras la implementación del sistema de monitoreo.

### **4.1 Análisis General de la comunicación LoRa**

La tecnología LoRa (Long Range) es una solución de comunicación inalámbrica de largo alcance y bajo consumo, ideal para sistemas de monitoreo distribuidos como el implementado en este proyecto. Su capacidad para transmitir datos en condiciones de baja

potencia la hace adecuada para aplicaciones en entornos agrícolas, donde la infraestructura de red puede ser limitada.

En este apartado, se analizarán los aspectos clave de la comunicación LoRa aplicada al sistema de monitoreo de variables ambientales y nutricionales del cultivo de cáñamo medicinal. Este análisis incluye la configuración de parámetros técnicos, el comportamiento en la transmisión de datos, y la evaluación del rendimiento y la confiabilidad de la red.

A continuación, se detalla la configuración inicial de la comunicación LoRa, explicando los valores seleccionados para los parámetros del sistema y su impacto en la eficiencia y estabilidad del enlace.

#### ***4.1.1 Configuración de la comunicación LoRa***

La configuración de la comunicación LoRa es un aspecto crítico para garantizar la transmisión eficiente y confiable de los datos en el sistema de monitoreo de variables ambientales y nutricionales del cultivo de cáñamo medicinal. En este proyecto, se han implementado dos estaciones de monitoreo que utilizan dispositivos microcontroladores LoRa32 V3, configurados con parámetros específicos para operar en la banda de 915 MHz. La comunicación entre estas estaciones y el nodo Gateway sigue un modelo de red punto a punto (P2P), asegurando la integridad de los datos y minimizando las pérdidas de paquetes.

##### ***4.1.1.1 Parámetros de Configuración***

- Frecuencia de Operación (RF\_FREQUENCY): La frecuencia de 915 MHz se seleccionó debido a su compatibilidad con las normativas ISM (Industrial, Scientific, and Medical) en la región y su capacidad para proporcionar un alcance significativo en áreas rurales como las agrícolas.
- Potencia de Transmisión (TX\_OUTPUT\_POWER): La potencia de transmisión se configuró en 14 dBm, lo cual ofrece un equilibrio entre consumo energético y alcance

de la señal. Este valor garantiza una cobertura adecuada en el campo de monitoreo sin comprometer la autonomía de las estaciones.

- Ancho de Banda (LORA\_BANDWIDTH): El ancho de banda se fijó en 125 kHz (valor 0), optimizando la sensibilidad del receptor y favoreciendo la transmisión de datos en entornos con interferencias limitadas.
- Factor de Expansión (LORA\_SPREADING\_FACTOR): Se estableció un factor de expansión de 7, configurando una tasa de datos más alta mientras se mantiene un rango de cobertura adecuado. Este ajuste es ideal para las necesidades de transmisión de datos de bajo volumen, como las de este sistema.
- Tasa de Codificación (LORA\_CODINGRATE): El valor 1, que corresponde a una tasa de codificación de 4/5, proporciona una corrección de errores efectiva, reduciendo la posibilidad de pérdida de datos en la transmisión.
- Longitud del Preambulo (LORA\_PREAMBLE\_LENGTH): El preámbulo de 8 símbolos asegura que el receptor pueda detectar y sincronizar la señal antes de la recepción de los datos útiles.
- Tiempo de Espera de Símbolo (LORA\_SYMBOL\_TIMEOUT): Este parámetro, configurado en 0, se ajusta para mantener un tiempo de espera ilimitado durante la recepción de datos, permitiendo una operación continua en modo RX.
- Tamaño del Buffer: Un tamaño de buffer de 512 bytes garantiza que los mensajes JSON generados en las estaciones de monitoreo puedan transmitirse sin truncamientos ni pérdidas.
- Tiempo de Espera de RX (RX\_TIMEOUT\_VALUE): El tiempo de espera en la recepción se configuró en 1000 ms para optimizar el tiempo de operación y la capacidad de respuesta del sistema.

#### **4.1.2 *Tiempo en el aire para la comunicación LoRa***

El tiempo en el aire (ToA) es un parámetro clave en la comunicación LoRa, ya que afecta directamente la capacidad de la red, el consumo de energía y la eficiencia general de las comunicaciones. En esta sección se analiza el cálculo del tiempo en el aire de un paquete capturado con el software Wireshark filtrado por el protocolo MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) desde su transmisión a su recepción, es decir, desde que la señal se envía de uno de los nodos LoRa hasta que es recibida por el Gateway LoRa. Con esta captura, se puede conocer el valor de carga útil para determinar el tamaño del payload que se obtiene como muestra la Figura 40:

**Figura 40**

### *Tamaño de Payload*

The screenshot shows a Wireshark capture of an MQTT Publish Message. The packet list pane shows a table of captured packets:

| No.    | Time           | Source       | Destination  | Protocol | Length | Info                                                             |
|--------|----------------|--------------|--------------|----------|--------|------------------------------------------------------------------|
| 213741 | 1668.494141077 | 192.168.1.9  | 192.168.1.20 | MQTT     | 209    | Publish Message [estacion2/luz], Publish Message [estacion2/phAg |
| 216393 | 1672.465625298 | 192.168.1.9  | 192.168.1.20 | MQTT     | 62     | Ping Request                                                     |
| 216395 | 1672.465693168 | 192.168.1.20 | 192.168.1.9  | MQTT     | 58     | Ping Response                                                    |
| 217541 | 1676.587739630 | 192.168.1.20 | 192.168.1.9  | MQTT     | 70     | Ping Request                                                     |
| 217542 | 1676.588021423 | 192.168.1.20 | 192.168.1.20 | MQTT     | 70     | Ping Response                                                    |
| 218676 | 1679.017822910 | 192.168.1.9  | 192.168.1.20 | MQTT     | 86     | Publish Message [estacion2/temperatura]                          |
| 218690 | 1679.061220645 | 192.168.1.9  | 192.168.1.20 | MQTT     | 209    | Publish Message [estacion2/luz], Publish Message [estacion2/phAg |

The packet details pane for the selected MQTT Publish Message (No. 218676) shows the following information:

- Frame Number: 218676
- Frame Length: 86 bytes (688 bits)
- Capture Length: 86 bytes (688 bits)
- Protocols in frame: sll:ethertype:ip:tcp:mqtt
- Linux cooked capture v1
- Internet Protocol Version 4, Src: 192.168.1.9, Dst: 192.168.1.20
- Transmission Control Protocol, Src Port: 54588, Dst Port: 1883
- MQ Telemetry Transport Protocol, Publish Message
  - Header Flags: 0x30, Message Type: Publish Message, QoS Level: 0, Retain: Not set
  - Topic Length: 21
  - Topic: estacion2/temperatura
  - Message: 32312e3934

The packet bytes pane shows the raw data of the message, with a blue box highlighting the topic 'estacion2/temperatura' and a red box highlighting the message '32312e3934'. The status bar at the bottom indicates the packet size as 30 byte(s).

Cuando se obtiene este valor, se determina los parámetros necesarios para el cálculo:

- Longitud de payload (PL): 30 bytes
- Ancho de banda (BW): 125 kHz

- Factor de expansión (SF): 7
- Tasa de codificación (CR): 1
- Preámbulo ( $N_{preambulo}$ ): Por defecto 8 bytes
- Encabezado Implícito (IH): 0 si está habilitado
- Optimización de baja tasa de datos (DE): 0 para SF7 hasta SF10
- Bit de CRC (CRC): 1 si está deshabilitado

$$T_s = \frac{2^{SF}}{BW}$$

$$T_s = \frac{2^7}{125 \text{ kHz}}$$

$$T_s = 1.024 \text{ ms}$$

Se obtiene el valor de los números de símbolos para transmitir la carga útil ( $N_{payload}$ ) con la siguiente ecuación:

$$N_{payload} = 8 + \left( \left( \frac{8 * PL - 4 * SF + 28 + 16 * CRC - 20 * IH}{4(SF - 2 * DE)} \right) (CR + 4) \right)$$

$$N_{payload} = 8 + \left( \left( \frac{8 * 30 - 4 * 7 + 28 + 16 * 1 - 20 * 0}{4(7 - 2 * 0)} \right) (1 + 4) \right)$$

$$N_{payload} = 53.71 \text{ símbolos}$$

Se realiza el cálculo del tiempo del preámbulo mediante la ecuación:

$$T_{preambulo} = (N_{preambulo} + 4.25) * T_s$$

$$T_{preambulo} = (8 + 4.25) * 1.024 \text{ ms}$$

$$T_{preambulo} = 12.544 \text{ ms}$$

Por último, se realiza el cálculo del tiempo de la carga útil mediante la ecuación:

$$T_{payload} = payloadSymbNb * T_s$$

$$T_{payload} = 53.71 * 1.024 \text{ ms}$$

$$T_{payload} = 54.999 \text{ ms}$$

Finalmente, se obtiene el tiempo en el aire () con la ecuación:

$$ToA = T_{preambulo} + T_{payload}$$

$$ToA = 12.544 \text{ ms} + 54.999 \text{ ms}$$

$$\mathbf{ToA = 67.543 \text{ ms}}$$

A continuación, se presenta la Tabla 28 con los valores de  $ToA$  para diferente configuración SF:

**Tabla 28**

*Cálculos teóricos para ToA SF7 a SF10*

| SF | Tiempo de símbolo (ms) | Símbolos de carga útil | Tiempo de preámbulo (ms) | Tiempo de carga útil (ms) | Tiempo en el aire (ToA) calculado (ms) |
|----|------------------------|------------------------|--------------------------|---------------------------|----------------------------------------|
| 7  | 1.024                  | 53.71                  | 12.544                   | 54.999                    | 67.543                                 |
| 8  | 2.048                  | 47.375                 | 25.088                   | 97.024                    | 122.112                                |
| 9  | 4.096                  | 42.44                  | 50.176                   | 173.834                   | 224.01                                 |

|    |       |      |         |         |         |
|----|-------|------|---------|---------|---------|
| 10 | 8.192 | 38.5 | 100.352 | 315.392 | 415.744 |
|----|-------|------|---------|---------|---------|

Fuente: Autoría Propia

Para la configuración SF11 y SF12 se utiliza la optimización de baja tasa de datos (DE) en 1 como se muestra la Tabla 29:

**Tabla 29**

*Cálculos Teóricos para ToA SF11 y SF12*

| SF | Tiempo de símbolo (ms) | Símbolos de carga útil | Tiempo de preámbulo (ms) | Tiempo de carga útil (ms) | Tiempo en el aire (ToA) calculado (ms) |
|----|------------------------|------------------------|--------------------------|---------------------------|----------------------------------------|
| 11 | 16.384                 | 41.33                  | 200.704                  | 677.15                    | 877.854                                |
| 12 | 32.768                 | 37.5                   | 401.408                  | 1228.8                    | 1630.208                               |

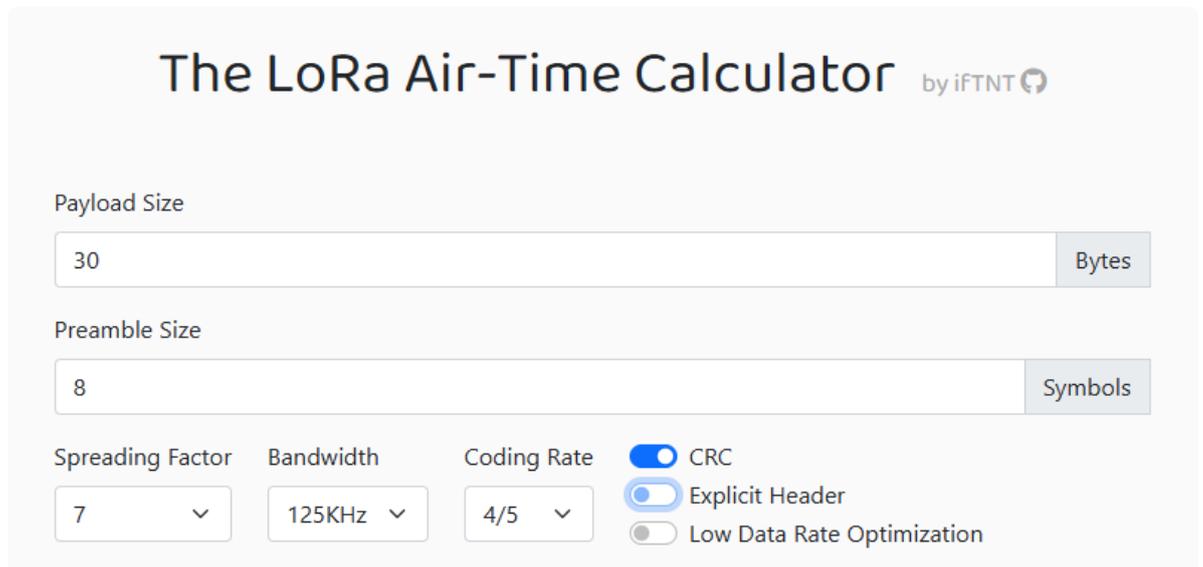
Fuente: Autoría Propia

Se observa que al aumentar el valor de Spreading Factor (SF), el tiempo en el aire (ToA) también se incrementa. Esto se debe a que, con SF7, la velocidad de transmisión de datos es mayor, lo que resulta en un menor tiempo en el aire, aunque con un alcance reducido. En cambio, al incrementar el SF, la velocidad de datos disminuye, el ToA aumenta y, simultáneamente, se logra un mayor alcance en la comunicación.

Para validar los resultados obtenidos a través de los cálculos teóricos, se utiliza una herramienta para calcular el ToA. Esta calculadora de LoRa para el tiempo en el aire permite ingresar los parámetros de configuración y obtener el valor correspondiente de manera rápida y eficiente.

**Figura 41**

*Calculadora LoRa para el ToA*



The LoRa Air-Time Calculator by iFTNT

Payload Size: 30 Bytes

Preamble Size: 8 Symbols

Spreading Factor: 7

Bandwidth: 125KHz

Coding Rate: 4/5

CRC

Explicit Header

Low Data Rate Optimization

Los resultados que se obtienen en la calculadora con las configuraciones del tamaño de Payload, el tamaño de preámbulo y definir el SF en 7, ancho de banda y Coding Rate se obtienen los valores que se muestra en la Figura 42.

**Figura 42**

*Resultados del cálculo de ToA*

## Result

| Property      | Value    | Unit                  | Description                                                           |
|---------------|----------|-----------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| Symbol Time   | 1.024    | Millisecond (ms)      | How much time does it take to transmit a symbol.                      |
| Symbol Rate   | 976.563  | Symbol per second     | How much symbol can be transmitted in one second.                     |
| #Preamble     | 12.25    | Symbols               | How much symbols does the preamble take place.                        |
| Preamble Time | 12.544   | Millisecond (ms)      | How much air-time does the preamble take.                             |
| #Payload      | 53       | Symbols               | How much symbols does the remain part in packet take place.           |
| Payload Time  | 54.272   | Millisecond (ms)      | How much air-time does the payload take.                              |
| Air-Time      | 66.816   | Millisecond (ms)      | How much air-time does the whole packet take.                         |
| Throughput    | 3591.954 | Bits per second (bps) | How much data can you transmit through LoRa with above configuration. |

A continuación, se presenta en la Tabla 30 el cálculo del ToA calculado en diferentes Spreading Factor (SF):

**Tabla 30**

*Cálculos de ToA mediante calculadora ToA*

| SF | Tiempo de símbolo (ms) | Tiempo del preámbulo (ms) | ToA calculadora LoRa (ms) |
|----|------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 7  | 1.024                  | 12.544                    | 66.816                    |
| 8  | 2.048                  | 25.088                    | 123.392                   |
| 9  | 4.096                  | 50.176                    | 226.304                   |
| 10 | 8.192                  | 100.352                   | 411.648                   |

|    |        |         |          |
|----|--------|---------|----------|
| 11 | 16.384 | 200.704 | 905.216  |
| 12 | 32.768 | 401.408 | 1646.592 |

Fuente: Autoría propia

A través del uso de la calculadora, se confirmó que el tiempo en el aire aumenta a medida que se incrementa el Spreading Factor (SF). Además, los valores obtenidos utilizando las fórmulas coincidieron estrechamente con los resultados proporcionados por la calculadora, lo que demuestra que los cálculos se realizaron correctamente según los parámetros establecidos.

#### ***4.1.3 Análisis de envío de datos LoRa***

El envío de datos mediante la tecnología LoRa (Long Range) es un proceso esencial para garantizar la comunicación eficiente entre las estaciones de monitoreo y el nodo Gateway. En este proyecto, se utilizan parámetros y configuraciones específicas para optimizar la transmisión de datos ambientales y nutricionales recolectados en tiempo real desde el cultivo de cáñamo medicinal.

Este análisis detalla cómo se gestiona el flujo de información, los desafíos enfrentados y las soluciones implementadas para garantizar la integridad y eficiencia de los datos transmitidos.

##### ***4.1.3.1 Proceso de envío de datos desde las estaciones***

- **Recolección de datos de sensores:** Cada estación de monitoreo recopila la información de múltiples sensores. En este proyecto, se incluyen:
  - **Temperatura** mediante el sensor DS18B20.
  - **Luminosidad** mediante el sensor DH1750.
  - **pH del Agua** con el sensor PH-4502C.

- **pH del suelo, y macronutrientes (Nitrógeno, Fósforo, Potasio)** con el sensor YGC-SM.

Estos datos son esenciales para evaluar las condiciones ambientales y nutricionales del cultivo durante la etapa vegetativa.

- Formateo de los datos en JSON

Los datos recolectados se estructuran en un mensaje JSON mediante la librería *ArduinoJson*. Este formato garantiza que la información se organice de manera clara y comprensible, facilitando su deserialización en el Gateway.

- Transmisión mediante LoRa

Una vez que los datos están listos, se transmiten utilizando el módulo LoRa configurado con los siguientes parámetros clave:

- **Frecuencia de transmisión:** 915 MHz, ideal para entornos rurales.
- **Potencia de transmisión:** 14 dBm, lo que equilibra el consumo energético y el alcance de la señal.
- **Factor de expansión:** configurado en 7, que proporciona una buena relación entre la tasa de datos y la sensibilidad del receptor.
- **Ancho de banda:** 125 kHz, adecuado para asegurar la recepción en entornos con poca interferencia.

El sistema utiliza un *buffer* de 512 bytes para garantizar que los mensajes JSON puedan transmitirse completos, evitando la pérdida de información.

- Gestión de Eventos de Transmisión

Durante la transmisión, se manejan eventos clave mediante funciones dedicadas como se presenta en la Tabla 31:

**Tabla 31**

*Eventos en la transmisión de datos LoRa.*

| <b>Evento</b> | <b>Descripción</b>                                                                        |
|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| OnTxDone      | Indica que la transmisión ha finalizado correctamente                                     |
| OnTxTimeout   | Gestiona los casos en los que se excede el tiempo de espera para completar la transmisión |

Fuente: Autoría Propia

Estas funciones aseguran que el sistema pueda manejar interrupciones o fallos en el proceso de transmisión de forma eficiente.

#### **4.1.3.2 Recepción y Procesamiento en el Gateway**

El nodo Gateway, configurado con los mismos parámetros LoRa, recibe los datos enviados por las estaciones. En este nodo se realiza lo siguiente:

- **Deserializa los Datos JSON:** Utiliza la librería *ArduinoJson* para convertir el mensaje recibido en un formato legible por el sistema.
- **Publica MQTT:** Los datos se publican en tópicos específicos dentro del bróker MQTT, identificados por el ID de la estación. Esto facilita la organización y el acceso a la información en tiempo real.

- Almacena en InfluxDB: Los datos también se almacenan en la base de datos de InfluxDB, organizada en un bucket llamado **Cannabis**, con etiquetas como dispositivo, ubicación y el ID de la estación. Este esquema permite filtrar y analizar la información de manera eficiente.

#### 4.1.3.3 Desafíos en el envío de Datos

- Interferencias: La banda de 915 MHz puede ser susceptible a interferencias, especialmente en áreas con dispositivos operando en la misma frecuencia. Esto se mitiga utilizando un factor de expansión adecuado y un ancho de banda estrecho como se muestra en la Tabla 32.

**Tabla 32**

*Parámetros configurados de LoRa para SF y BW*

|                         |         |
|-------------------------|---------|
| <b>Spreading Factor</b> | 7       |
| <b>Bandwidth</b>        | 125 kHz |

Fuente: Autoría Propia

- Pérdida de Paquetes: Aunque la configuración asegura una transmisión confiable, puede ocurrir pérdida de paquetes debido a obstáculos o condiciones adversas. Para solucionar esto, se deben implementar estrategias como la retransmisión automática y la corrección de errores en el receptor.

El análisis del envío de datos LoRa muestra que, con la configuración adecuada, es posible garantizar una transmisión confiable y eficiente, incluso en un entorno rural. La estructura modular del sistema facilita la ampliación del proyecto con nuevas estaciones de monitoreo o la integración de sensores adicionales.

Este sistema proporciona un flujo de datos continuo y confiable, lo que permite una monitorización precisa y oportuna del cultivo de cáñamo medicinal, apoyando la toma de decisiones basada en datos y mejorando el rendimiento general del cultivo.

#### ***4.1.4 Recepción de la señal LoRa usando herramienta de Radio Definida por Software***

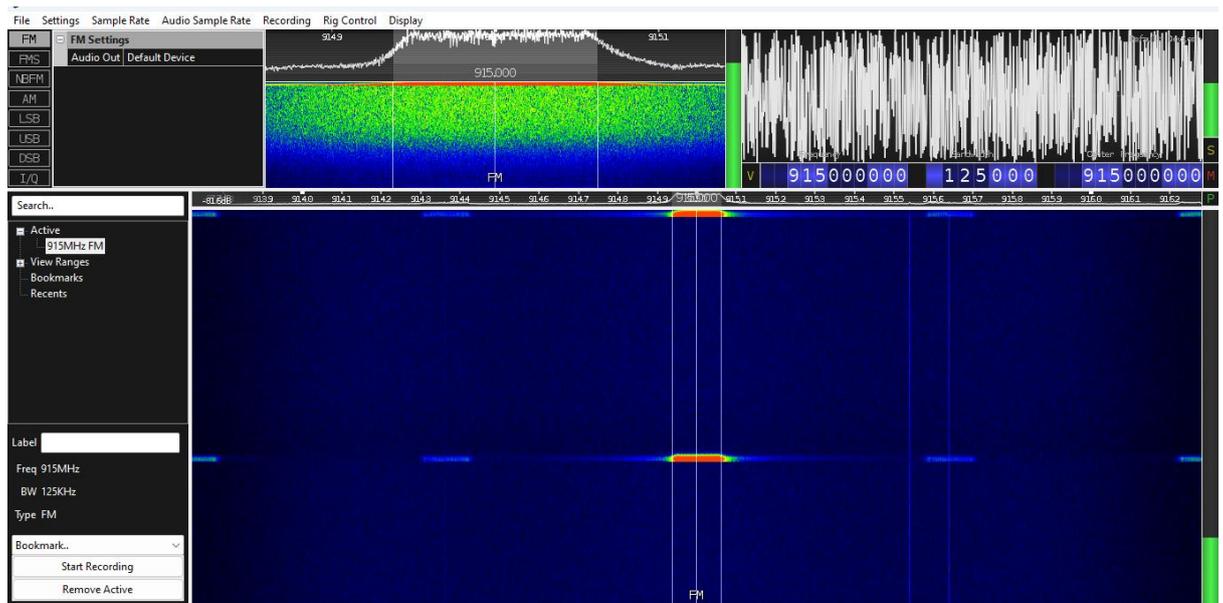
Con el propósito de realizar pruebas que permitan validar las transmisiones de paquetes mediante la tecnología LoRa, se tomó en cuenta la ubicación del cultivo. Para llevar a cabo estas verificaciones, se decidió utilizar herramientas de software y hardware basadas en Radio Definida por Software (SDR). En este contexto, se emplearon las aplicaciones SDR Console y CubicSDR, que hicieron posible la captura de los paquetes receptados por el Gateway desde las estaciones de monitoreo mediante el módulo receptor RTL-SDR.

Para las transmisiones, se trabajó con un Spreading Factor (SF) 7 y el ancho de banda de 125 kHz. Esta configuración se estableció considerando la cantidad de información que puede ser transmitida y las cortas distancias entre las estaciones y el Gateway. Con estos parámetros, se logra una cobertura efectiva de hasta 1 km, lo que resulta óptimo para las características del entorno.

La Figura 43 ilustra el espectro generado durante la transmisión de un paquete LoRa. En ella, se aprecia con claridad el espectro ensanchado, una característica distintiva de esta tecnología. En este caso, la frecuencia central empleada fue de 915 MHz, junto con un ancho de banda de 125 kHz.

#### **Figura 43**

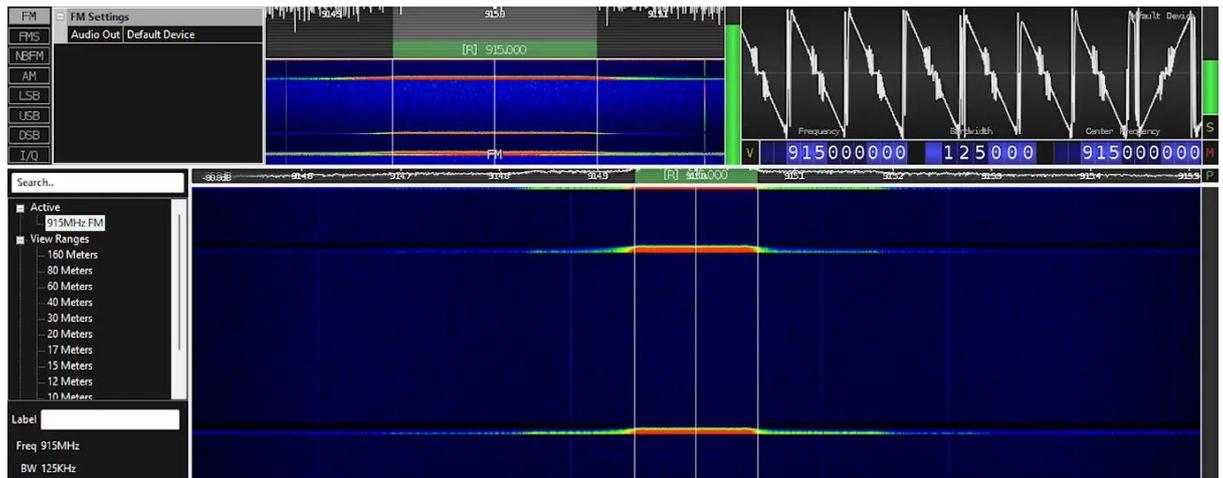
*Captura de paquete LoRa mediante CubicSDR*



Para comprobar la visualización de un paquete LoRa recibido, se empleó el software CubicSDR, como se ilustra en la Figura 43. En esta representación, se puede identificar la frecuencia central de 915 MHz, utilizando el Spreading Factor 7 y ancho de banda de 125 kHz.

Se evidencia que el paquete recibido cumple con las características del espectro ensanchado propias de la tecnología LoRa. Esto se observa en la Figura 44 en la parte superior derecha. Además, se puede evidenciar los picos simétricos que corresponden al comportamiento de la señal LoRa. Esto es consistente con la técnica de espectro ensanchado por chirp (CSS) utilizada por LoRa, donde los datos se transmiten mediante chirps modulados que se expanden en el ancho de banda configurado. Esto significa que la señal es visible como un conjunto de componentes espectrales que varían en frecuencia, lo cual puede ser observado en esta gráfica

**Figura 44** Visualización de paquete LoRa CubicSDR



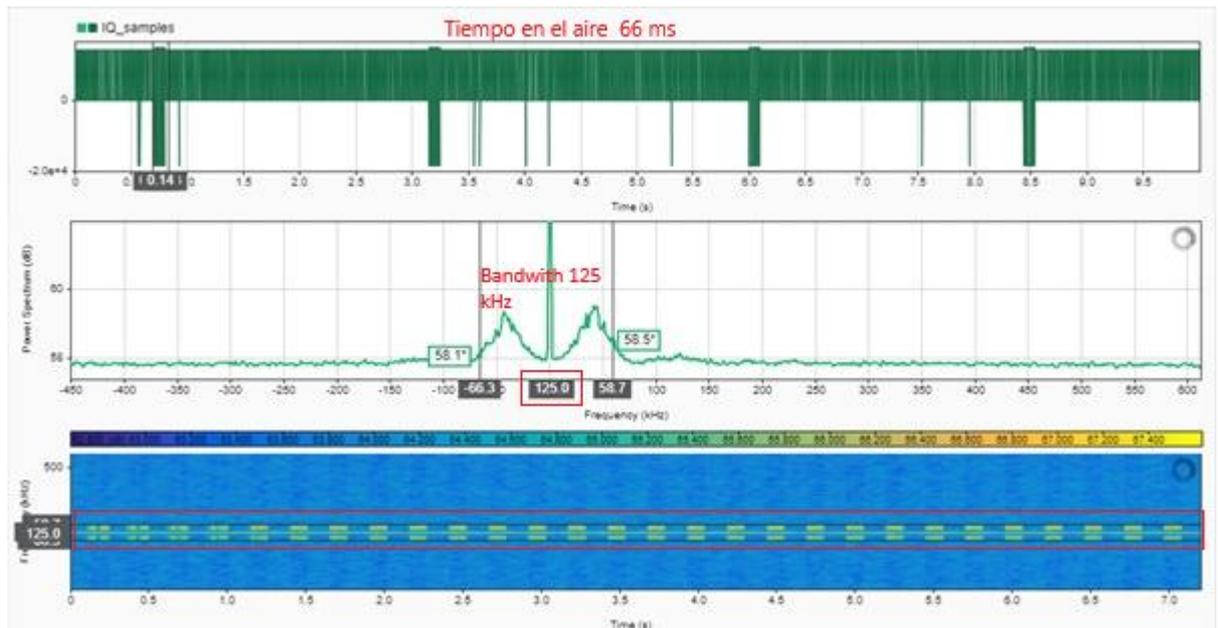
Tomamos las muestras mediante la captura por cinco minutos de la señal LoRa para posteriormente analizarla en Matlab.

#### 4.1.4.1 Demostración en software de Matlab

Dado que se ha proporcionado un archivo .wav para convertirlo a .bin en el que se obtendrá las muestras para analizar la señal, se procede a realizar las pruebas para SF7. Con lo cual se utiliza la herramienta Signal Analyzer, que permite visualizar las muestras y posteriormente extraer el espectro de frecuencias de la señal como se muestra en la Figura 45.

### Figura 45

*Muestra de la señal SF7 en el dominio del tiempo y frecuencia*



A partir de la gráfica presentada, se puede inferir que el tiempo en el aire de un paquete LoRa es de 66 ms, un valor que aproximadamente coincide con el estimado de 66.816 ms que se encuentra en la Tabla 29. Además, la gráfica confirma el ancho de banda utilizado es de 125 kHz.

#### 4.2 Evaluación del Sistema de Monitoreo en la Etapa Vegetativa

La etapa vegetativa de un cultivo de cáñamo medicinal es una de las fases más críticas del ciclo de vida de la planta, ya que durante este período se desarrollan el tallo y el follaje, los cuales son esenciales para la producción de flores de alta calidad en etapas posteriores. Dado que esta etapa depende de gran medida de condiciones ambientales óptimas y una nutrición adecuada, el sistema de monitoreo implementado cumple un rol fundamental al permitir la medición y el control continuo de variables clave como temperatura, luminosidad, pH del suelo y agua, así como los niveles de nutrientes esenciales como Nitrógeno (N), Fósforo (P) y Potasio (K).

En esta sección se verificará el correcto funcionamiento del sistema de monitoreo, tanto en la recolección de datos como en su transmisión y almacenamiento, además, determinar la

precisión de los sensores empleados al medir las variables críticas para el desarrollo de las plantas en la etapa vegetativa. Se validará que los datos recopilados permitan un análisis adecuado para la toma de decisiones relaciones con el manejo de cultivo.

#### ***4.2.1 Monitoreo de Variables Ambientales del cultivo de cáñamo medicinal***

El monitoreo de variables ambientales es fundamental para garantizar un entorno óptimo que permita el desarrollo adecuado del cultivo de cáñamo medicinal durante su etapa vegetativa. Las condiciones ambientales influyen directamente en el proceso de fotosíntesis, la absorción de nutrientes y la prevención de enfermedades, por lo que contar con un sistema que realice mediciones precisas en tiempo real es crucial para lograr un cultivo exitoso.

##### ***4.2.1.1 Temperatura del cáñamo medicinal***

La temperatura es uno de los factores ambientales más relevantes en el desarrollo del cáñamo medicinal, especialmente durante la etapa vegetativa, donde el crecimiento de la planta es más activo y acelerado. A diferencia de los cultivos al aire libre, donde las condiciones climáticas son variables y difíciles de controlar, el entorno indoor permite un manejo más preciso de las variables ambientales, lo que resulta en un mejor rendimiento del cultivo y una menor exposición a factores de estrés.

Mantener una temperatura adecuada asegura el equilibrio de los procesos fisiológicos fundamentales, como la fotosíntesis, la respiración y la transpiración. Durante la etapa vegetativa, el cáñamo requiere un entorno con temperaturas estables ya que fluctuaciones extremas pueden provocar estrés térmico, reduciendo la eficiencia del metabolismo de la planta y afectando el crecimiento del follaje. Si la temperatura es demasiado alta, se incrementa la transpiración, lo que puede llevar a una pérdida excesiva de agua y, en casos extremos, a marchitamiento. Por el contrario, temperaturas demasiado bajas ralentizan los procesos enzimáticos, reduciendo la tasa de fotosíntesis y afectando el desarrollo del cultivo.

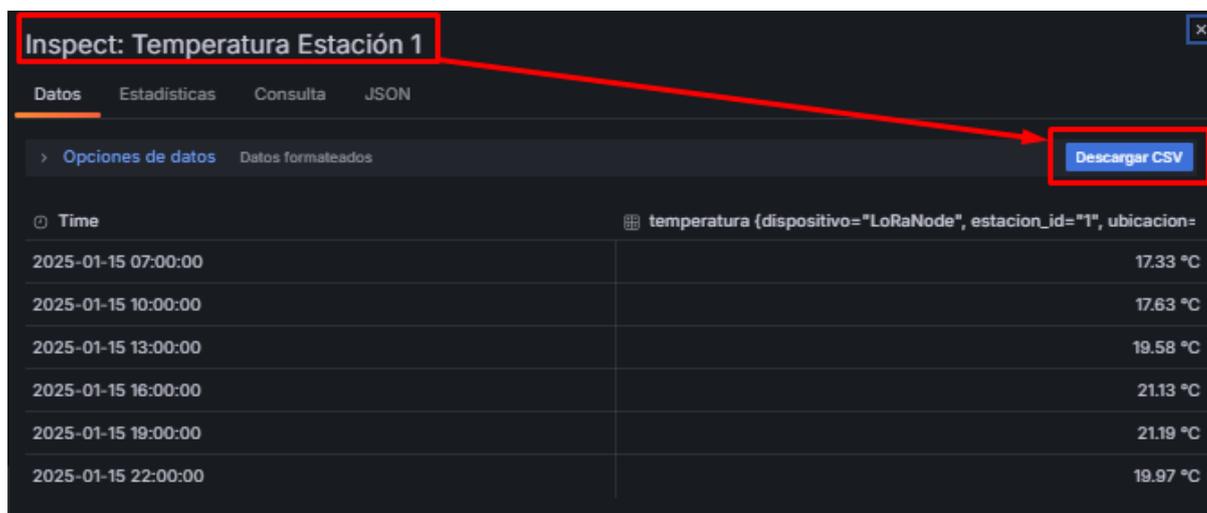
Los rangos óptimos de temperatura para el cáñamo durante esta fase oscilan entre 20 °C y 25 °C, como se estableció en estudios previos. Dentro de este rango, la planta logra un crecimiento vigoroso, con una adecuada expansión de las hojas, que son esenciales para la captura de luz y la producción de energía.

El sistema desarrollado emplea un sensor Dallas DS18B20 conectado a cada estación LoRa para medir la temperatura ambiente. Este sensor es ideal para aplicaciones agrícolas debido a su alta precisión y capacidad de operar en entornos con humedad elevada.

Cada estación de monitoreo transmite los valores de temperatura en intervalos regulares mediante la comunicación LoRa a un nodo Gateway, donde se almacenan en una base de datos InfluxDB y se visualizan mediante gráficos en Grafana. La Figura 46 presenta la obtención de los datos desde Grafana para los registros de Temperatura en el período de monitoreo establecido.

### Figura 46

*Obtención de registros para Temperatura Estación 1*



| Time                | temperatura {dispositivo="LoRaNode", estacion_id="1", ubicacion= |
|---------------------|------------------------------------------------------------------|
| 2025-01-15 07:00:00 | 17.33 °C                                                         |
| 2025-01-15 10:00:00 | 17.63 °C                                                         |
| 2025-01-15 13:00:00 | 19.58 °C                                                         |
| 2025-01-15 16:00:00 | 21.13 °C                                                         |
| 2025-01-15 19:00:00 | 21.19 °C                                                         |
| 2025-01-15 22:00:00 | 19.97 °C                                                         |

**Nota:** La Figura 45 es una muestra de la obtención de registros en la variable Temperatura, la cual se realiza el mismo procedimiento para cada variable medida en el sistema.

La Tabla 33 presenta un resumen de los valores de temperatura registrados en la Estación 1 durante un período de monitoreo de siete días. Las mediciones se realizaron cada tres horas, desde las 6:00 am hasta las 10:00 pm, para garantizar un control detallado y constante de las condiciones térmicas en el entorno indoor del cultivo de cáñamo medicinal durante su etapa vegetativa.

**Tabla 33**

*Resumen de registros de Temperatura °C para Estación 1*

| <b>Días de monitoreo</b> | <b>Temperatura<br/>Mínima (°C)</b> | <b>Temperatura<br/>Promedio (°C)</b> | <b>Temperatura<br/>Máxima (°C)</b> |
|--------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|
| 2025-01-13               | 17.85 °C                           | 21.27 °C                             | 23.23 °C                           |
| 2025-01-14               | 19.61 °C                           | 21.74 °C                             | 23.37 °C                           |
| 2025-01-15               | 17.33 °C                           | 19.47 °C                             | 21.19 °C                           |
| 2025-01-16               | 17.9 °C                            | 19.93 °C                             | 21.74 °C                           |
| 2025-01-17               | 15.91 °C                           | 19.645 °C                            | 23.19 °C                           |
| 2025-01-18               | 15.55 °C                           | 19.91 °C                             | 24.09 °C                           |
| 2025-01-19               | 16.34 °C                           | 21.06 °C                             | 24.65 °C                           |

Fuente: Autoría Propia

La Tabla 34 presenta un resumen de los registros de temperatura obtenidos en la Estación 2 durante el período de monitoreo. Estos valores se registraron cada 3 horas, desde las 6:00 am hasta las 22:00 pm, para evaluar las condiciones térmicas en el entorno indoor del cultivo de cáñamo medicinal en su etapa vegetativa.

**Tabla 34***Resumen de registros de Temperatura °C para Estación 2*

| <b>Días de monitoreo</b> | <b>Temperatura<br/>Mínima (°C)</b> | <b>Temperatura<br/>Promedio (°C)</b> | <b>Temperatura<br/>Máxima (°C)</b> |
|--------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|
| 2025-01-13               | 20.25 °C                           | 21.86 °C                             | 23.41 °C                           |
| 2025-01-14               | 20.93 °C                           | 22.19 °C                             | 23.2 °C                            |
| 2025-01-15               | 21.18 °C                           | 22.16 °C                             | 23.13 °C                           |
| 2025-01-16               | 20.88 °C                           | 22.42 °C                             | 24.4 °C                            |
| 2025-01-17               | 20.04 °C                           | 23.15 °C                             | 26.38 °C                           |
| 2025-01-18               | 19.74 °C                           | 21.19 °C                             | 22.09 °C                           |
| 2025-01-19               | 19.72 °C                           | 21.56 °C                             | 23.08 °C                           |

Fuente: Autoría Propia

Un período de siete días permite analizar cómo se comporta la temperatura en diferentes momentos de la semana, identificando patrones de estabilidad o fluctuaciones que puedan influir en el crecimiento de las plantas. Esto permite evaluar factores como ajustar la ventilación del entorno y cambios en la iluminación, lo cual es crucial para prever posibles riesgos térmicos. Durante siete días, el cáñamo puede mostrar signos de adaptación o estrés frente a las condiciones térmicas. Esto permite identificar tempranamente problemas relacionados con el crecimiento, como el crecimiento retardado.

#### **4.2.1.2 Luminosidad del cáñamo medicinal**

La luminosidad es uno de los factores clave en el crecimiento y desarrollo del cáñamo medicinal, especialmente cuando el cultivo se realiza en un entorno indoor. En este tipo de

ambiente, la luz natural es limitada o inexistente, lo que hace necesario el uso de fuentes de iluminación artificial que imiten el espectro lumínico que las plantas recibirían al aire libre. Para garantizar un crecimiento adecuado del cáñamo medicinal, se emplean lámparas LED de espectro completo que ofrecen la intensidad y longitud de onda necesarias durante las diferentes etapas de desarrollo del cultivo, como la vegetativa y la floración.

El control preciso de la luminosidad es fundamental, ya que afecta directamente la fotosíntesis y, por ende, la producción de cannabinoides y terpenos. En la etapa vegetativa, el cáñamo requiere un nivel de luminosidad constante y elevado entre 15000 lux a 50000 lux durante un ciclo de luz de 16 horas encendidas y 8 horas apagadas. Un monitoreo continuo permite mantener los niveles óptimos y evitar deficiencia que podrían retrasar el crecimiento.

En este proyecto, la luminosidad se mide utilizando un sensor BH1750, que ofrece una alta precisión y estabilidad. Este sensor está configurado para operar en modo de alta resolución continua, lo que permite obtener lecturas precisas en lux. Los datos recogidos por el sensor se transmiten mediante el sistema de comunicación LoRa hacia un Gateway por medio del bróker MQTT, luego se almacena y visualiza la información en tiempo real a través de Grafana, utilizando la base de datos de InfluxDB.

La Tabla 35 resume las lecturas de luminosidad (lux) obtenidas en la Estación 1 durante siete días de monitoreo continuo, con mediciones realizadas cada tres horas desde las 6:00 am hasta las 22:00 pm. Este enfoque permite evaluar el comportamiento de la luz en el fotoperíodo recomendado para el cáñamo medicinal (Variedad Cherry Oregon Hemp) en su etapa vegetativa, caracterizado por 16 horas de luz y 8 horas de oscuridad.

### **Tabla 35**

*Resumen de registros obtenidos de Luminosidad (lux) en Estación 1.*

| Días de monitoreo | Luminosidad  | Luminosidad    | Luminosidad  |
|-------------------|--------------|----------------|--------------|
|                   | Mínima (lux) | Promedio (lux) | Máxima (lux) |
| 2025-01-13        | 22160.97 lux | 22460.926 lux  | 22825.61 lux |
| 2025-01-14        | 20206.7 lux  | 24372.02 lux   | 27951.89 lux |
| 2025-01-15        | 19.07 lux    | 15572.87 lux   | 23343.3 lux  |
| 2025-01-16        | 10141.76 lux | 21966.68 lux   | 24525.12 lux |
| 2025-01-17        | 5.54 lux     | 15558.52 lux   | 26425.27 lux |
| 2025-01-18        | 2.98 lux     | 18354.61 lux   | 26622.4 lux  |
| 2025-01-19        | 21.41 lux    | 17690.01 lux   | 25170.05 lux |

Fuente: Autoría Propia

La Tabla 36 muestra un resumen de los registros obtenidos de luminosidad en la Estación 2 durante el período de monitoreo. Estos datos permiten comparar el comportamiento de la iluminación entre las estaciones y verificar si se mantienen dentro de los rangos necesarios para el cultivo de cáñamo medicinal en la etapa vegetativa

**Tabla 36**

*Resumen de registros obtenidos de Luminosidad (lux) en Estación 2.*

| Días de monitoreo | Luminosidad  | Luminosidad    | Luminosidad  |
|-------------------|--------------|----------------|--------------|
|                   | Mínima (lux) | Promedio (lux) | Máxima (lux) |
| 2025-01-13        | 5302.26 lux  | 11920.98 lux   | 16969.8 lux  |
| 2025-01-14        | 10170.61 lux | 16442.9 lux    | 20955.82 lux |

|            |              |              |              |
|------------|--------------|--------------|--------------|
| 2025-01-15 | 13174.27 lux | 17174.27 lux | 20800.25 lux |
| 2025-01-16 | 6319.14 lux  | 11552.99 lux | 18399.87 lux |
| 2025-01-17 | 954.46 lux   | 10966.04 lux | 16667.4 lux  |
| 2025-01-18 | 8.39 lux     | 12029.41 lux | 17079.92 lux |
| 2025-01-19 | 21.48 lux    | 12295.22 lux | 19000.51 lux |

---

Fuente: Autoría Propia

Una semana permite observar patrones lumínicos consistentes y detectar cualquier irregularidad en el sistema. Por ejemplo, variaciones en la intensidad lumínica pueden deberse a problemas como degradación de las lámparas LED o fallos eléctricos. En siete días de evaluación se puede ver cómo responde la planta al esquema lumínico implementado. Esto permite verificar si las plantas muestran algún signo de estrés lumínico que puede ser propenso la planta si las condiciones de luz no son adecuadas.

#### **4.2.2 Monitoreo de Variables Nutricionales**

El monitoreo de variables nutricionales es esencial para garantizar un óptimo desarrollo del cáñamo medicinal, especialmente en un ambiente controlado indoor donde las condiciones del suelo y del agua deben ser cuidadosamente reguladas. En este proyecto, se evalúan las principales variables nutricionales que afectan el crecimiento de la planta durante la etapa vegetativa: el pH del agua y del suelo, y la concentración de macronutrientes (Nitrógeno, Fósforo y Potasio).

El cáñamo medicinal requiere un balance adecuado de nutrientes para desarrollar un sistema radicular saludable y un follaje denso. Un desbalance en las condiciones nutricionales puede causar deficiencias, toxicidades y, en consecuencia, afectar el rendimiento del cultivo.

El monitoreo continuo permite tomar decisiones rápidas respecto a la fertilización y el riego, asegurando que las plantas dispongan de los nutrientes esenciales en el momento adecuado.

El sistema de monitoreo implementado utiliza sensores especializados para medir el pH del agua y del suelo, así como la concentración de Nitrógeno, Fósforo y Potasio en el sustrato. El sistema también permite generar alertas automáticas en caso de que algún parámetro salga del rango óptimo.

#### ***4.2.2.1 pH del Suelo del cultivo de cáñamo medicinal***

El pH del suelo es uno de los factores más importantes a considerar en el cultivo de cáñamo medicinal, ya que influyen directamente en la disponibilidad de nutrientes esenciales y en la actividad microbiológica del sustrato. En un entorno controlado como el indoor, donde las condiciones ambientales se mantienen estables, el pH del suelo debe ser monitoreado constantemente para evitar desbalances que puedan afectar el desarrollo de las plantas.

El rango de pH ideal para el cultivo de cáñamo medicinal se encuentra entre 6.0 y 7.0, ya que en este intervalo los nutrientes como el Nitrógeno, Fósforo y Potasio (esenciales durante la etapa vegetativa) están en su forma más absorbible por las raíces. Un pH fuera de este rango puede causar bloqueos nutricionales, donde ciertos elementos quedan indisponibles, aunque estén presentes en el sustrato.

- pH ácido: (>7.0): Reduce la disponibilidad de Fósforo y Molibdeno, y puede aumentar la toxicidad por Aluminio y Manganeso.
- pH alcalino (<6.0): Disminuye la solubilidad de Hierro, Cobre, Zinc y Manganeso, causando deficiencias de estos micronutrientes.

En este sistema de monitoreo automatizado, el pH del suelo se mide mediante un sensor especializado para suelo YGC-SR que se encuentra integrado al nodo LoRa. Los datos

capturados por el sensor se procesan y envían al Gateway, desde donde se publican en el tópico MQTT del bróker y se almacena en la base de datos de InfluxDB. Finalmente, los datos se visualizan en Grafana, permitiendo un seguimiento continuo de los valores registrados.

La Tabla 37 presenta un resumen de los valores de pH de suelo registrados en la Estación 1 durante el período de monitoreo, con mediciones realizadas cada tres horas desde las 6:00 am hasta las 22:00 pm. Estos datos permiten evaluar la estabilidad del pH del suelo en el entorno indoor del cultivo de cáñamo medicinal durante su etapa vegetativa.

**Tabla 37**

*Resumen de valores registrados de pH de Suelo en Estación 1*

| <b>Días de monitoreo</b> | <b>pH de Suelo</b>  | <b>pH de Suelo</b>    | <b>pH de Suelo</b>  |
|--------------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|
|                          | <b>Mínimo (lux)</b> | <b>Promedio (lux)</b> | <b>Máximo (lux)</b> |
| 2025-01-13               | 6.41                | 6.43                  | 6.45                |
| 2025-01-14               | 6.42                | 6.45                  | 6.47                |
| 2025-01-15               | 6.45                | 6.45                  | 6.45                |
| 2025-01-16               | 6.44                | 6.46                  | 6.48                |
| 2025-01-17               | 6.43                | 6.44                  | 6.46                |
| 2025-01-18               | 6.4                 | 6.42                  | 6.45                |
| 2025-01-19               | 6.42                | 6.44                  | 6.46                |

Fuente: Autoría Propia

La Tabla 38 detalla los valores de pH de suelo registrados en la Estación 2 durante un período de monitoreo. Las mediciones permiten evaluar la estabilidad del pH del suelo en esta

estación y compararlo con los datos obtenidos en la otra estación. Esto facilita la identificación de posibles diferencias en las condiciones del suelo y poder corregirlas para garantizar un entorno homogéneo y óptimo para el cultivo.

**Tabla 38**

*Resumen de valores registrados de pH de Suelo en Estación 2*

| Días de monitoreo | pH de Suelo<br>Mínimo (lux) | pH de Suelo<br>Promedio (lux) | pH de Suelo<br>Máximo (lux) |
|-------------------|-----------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| 2025-01-13        | 6.4                         | 6.44                          | 6.47                        |
| 2025-01-14        | 6.41                        | 6.43                          | 6.45                        |
| 2025-01-15        | 6.43                        | 6.45                          | 6.48                        |
| 2025-01-16        | 6.44                        | 6.45                          | 6.46                        |
| 2025-01-17        | 6.42                        | 6.44                          | 6.47                        |
| 2025-01-18        | 6.45                        | 6.45                          | 6.45                        |
| 2025-01-19        | 6.41                        | 6.43                          | 6.46                        |

Fuente: Autoría Propia

- **Si el pH disminuye (< 6.0):** Se recomienda aplicar enmiendas alcalinas como cal agrícola o dolomita para elevar el pH del sustrato.
- **Si el pH aumenta (> 7.0):** Se sugiere la adición de compuestos ácidos como sulfato de aluminio o soluciones de ácido fosfórico diluido.

Monitorear durante una semana permite analizar la consistencia del pH del suelo y detectar tendencias que puedan requerir ajustes en el manejo del cultivo, como cambios en la

fertilización o en el riego. El cáñamo medicinal es particularmente sensible a desequilibrios de pH que afectan la disponibilidad de nutrientes. El monitoreo semanal permite confirmar si el suelo permanece en un rango óptimo para el desarrollo saludable de las plantas.

#### ***4.2.2.2 pH del Agua del cultivo de cáñamo medicinal***

El pH del agua es un factor crítico en el cultivo de cáñamo medicinal, especialmente en entornos indoor, donde las condiciones son altamente controladas y cualquier variación en la calidad del agua puede afectar significativamente el desarrollo de las plantas. El agua de riego es el principal vehículo para la absorción de nutrientes, por lo que su pH debe mantenerse dentro de un rango adecuado para garantizar que los nutrientes estén disponibles de manera óptima.

El rango ideal de pH del agua para el riego del cáñamo medicinal está entre 6.0 y 7.0, ya que en este intervalo se asegura una buena solubilidad de los nutrientes esenciales. Si el pH del agua se encuentra fuera de este rango, pueden ocurrir los siguientes problemas:

- pH bajo (< 6.0): Puede causar toxicidad por metales como hierro y manganeso y reducir la disponibilidad de calcio y magnesio.
- pH alto (> 7.0): Puede provocar una precipitación de micronutrientes como hierro, manganeso y zinc, lo que lleva a deficiencias nutricionales y menor eficiencia en la absorción de nutrientes.

El sistema automatizado de monitoreo desarrollado utiliza un sensor de pH-4502C conectado a un nodo LoRa que mide el pH del agua de manera periódica antes de ser suministrada a las plantas.

La Tabla 39 muestra los valores registrados de pH de agua en la Estación 1 durante el período de monitoreo. Las mediciones se realizaron cada tres horas desde las 6:00 am hasta las

22:00 pm, para garantizar un control preciso de esta variable crítica en el cultivo indoor de cáñamo medicinal durante la fase vegetativa.

**Tabla 39**

*Resumen de valores registrados de pH de Agua para Estación 1.*

| <b>Días de monitoreo</b> | <b>pH de Agua</b> | <b>pH de Agua</b> | <b>pH de Agua</b> |
|--------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|                          | <b>Mínimo</b>     | <b>Promedio</b>   | <b>Máximo</b>     |
| 2025-01-13               | 6.41              | 6.45              | 6.45              |
| 2025-01-14               | 6.13              | 6.16              | 6.17              |
| 2025-01-15               | 6.09              | 6.565             | 6.98              |
| 2025-01-16               | 6.23              | 6.29              | 6.36              |
| 2025-01-17               | 6.16              | 6.17              | 6.18              |
| 2025-01-18               | 6.13              | 6.14              | 6.17              |
| 2025-01-19               | 6.13              | 6.16              | 6.18              |

Fuente: Autoría Propia

La Tabla 40 presenta valores registrados de pH de agua en la Estación 2 durante el período de monitoreo. Este monitoreo frecuente permite detectar fluctuaciones y posibilitar mantener un entorno ideal para el cultivo, minimizando el riesgo de problemas relacionados con la absorción de nutrientes o acumulación de sales.

**Tabla 40**

*Resumen de valores registrados de pH de Agua para Estación 2.*

| Días de monitoreo | pH de Agua |          | pH de Agua |
|-------------------|------------|----------|------------|
|                   | Mínimo     | Promedio | Máximo     |
| 2025-01-13        | 6.1        | 6.18     | 6.24       |
| 2025-01-14        | 6.06       | 6.21     | 6.52       |
| 2025-01-15        | 6.07       | 6.17     | 6.26       |
| 2025-01-16        | 6.01       | 6.07     | 6.16       |
| 2025-01-17        | 6.2        | 6.27     | 6.38       |
| 2025-01-18        | 6.18       | 6.22     | 6.27       |
| 2025-01-19        | 6.29       | 6.32     | 6.34       |

Fuente: Autoría Propia

El pH del agua puede variar a lo largo del día debido a factores como la disolución de fertilizantes, cambios de temperatura del agua o la interacción con el suelo y las raíces de las plantas. Medir cada dos horas permite identificar estas fluctuaciones con precisión y tomar medidas correctivas oportunas si se detectan desviaciones. Durante un período de siete días, es posible observar cómo afectan las prácticas de adición de fertilizantes o ajuste en la frecuencia del riego, al pH del agua y al entorno general del cultivo.

#### **4.2.2.3 Composición de Macronutrientes (Nitrógeno, Fósforo, Potasio)**

El correcto monitoreo y control de los macronutrientes esenciales Nitrógeno (N), Fósforo (P) y Potasio (K), es fundamental para el éxito del cultivo de cáñamo medicinal, especialmente durante la etapa vegetativa en un entorno indoor. Durante esta fase, la planta requiere una cantidad equilibrada de estos elementos para promover un crecimiento vigoroso y el desarrollo de una estructura robusta.

- Nitrógeno: Es el componente principal de las proteínas y los ácidos nucleicos, siendo crucial para el crecimiento de las hojas y el tallo. Durante la etapa vegetativa, una deficiencia de Nitrógeno puede resultar en un crecimiento lento y hojas amarillentas. La función es que estimula el crecimiento vegetativo y la producción de clorofila.
- Fósforo (P): Es vital para el desarrollo de raíces y el almacenamiento y transferencia de energía dentro de la planta. Su deficiencia puede causar un retraso en el crecimiento y raíces débiles.
- Potasio (K): Es el que regula el transporte de agua y nutrientes en la planta y participa en la síntesis de proteínas. La deficiencia de Potasio puede llevar a hojas débiles y bordes quemados.

El sistema de monitoreo desarrollado incluye el sensor de suelo YCG-SM que mide la concentración de Nitrógeno, Fósforo y Potasio en el suelo. Los datos recolectados por el sensor son enviados mediante tecnología LoRa al nodo Gateway, donde se almacena en la base de datos de InfluxDB y se visualiza en Grafana en tiempo real.

La Tabla 41 muestra un resumen de los valores registrados para macronutrientes esenciales (Nitrógeno, Fósforo y Potasio) en la Estación 1 durante el período de monitoreo. Las mediciones se realizaron cada tres horas, desde las 6:00 am hasta las 22:00 pm, para evaluar la disponibilidad de nutrientes clave en el entorno indoor del cultivo de cáñamo medicinal. El cáñamo medicinal absorbe macronutrientes de manera dinámica a lo largo del día, influenciado por factores como temperatura, la actividad metabólica de las plantas y el ciclo de riego. El monitoreo cada dos horas permite detectar estas variaciones y ajustar las prácticas de fertilización según sea necesario.

#### **Tabla 41**

*Resumen de valores registrados para Macronutrientes para Estación 1.*

| <b>Días de monitoreo</b> | <b>Macronutriente</b> | <b>Valor Mínimo (ppm)</b> | <b>Valor Promedio (ppm)</b> | <b>Valor Máximo (ppm)</b> |
|--------------------------|-----------------------|---------------------------|-----------------------------|---------------------------|
|                          | Nitrógeno             | 28                        | 28.84                       | 30                        |
| 2025-01-13               | Fósforo               | 38.66                     | 39.86                       | 41.11                     |
|                          | Potasio               | 95.83                     | 99                          | 102.52                    |
|                          | Nitrógeno             | 26.09                     | 31.76                       | 36.84                     |
| 2025-01-14               | Fósforo               | 36.26                     | 43.96                       | 50.85                     |
|                          | Potasio               | 90.39                     | 108.86                      | 125.72                    |
|                          | Nitrógeno             | 36.25                     | 46.42                       | 52.84                     |
| 2025-01-15               | Fósforo               | 50.25                     | 64.21                       | 73.09                     |
|                          | Potasio               | 124.9                     | 159.06                      | 180.78                    |
|                          | Nitrógeno             | 40.96                     | 44.06                       | 46.88                     |
| 2025-01-16               | Fósforo               | 56.66                     | 60.96                       | 64.91                     |
|                          | Potasio               | 140.35                    | 150.57                      | 160.53                    |
|                          | Nitrógeno             | 38                        | 39.17                       | 39.97                     |
| 2025-01-17               | Fósforo               | 52.45                     | 54.08                       | 55.04                     |
|                          | Potasio               | 130.15                    | 134.04                      | 136.54                    |
| 2025-01-18               | Nitrógeno             | 36.93                     | 37.36                       | 37.91                     |

|            |           |        |        |        |
|------------|-----------|--------|--------|--------|
|            | Fósforo   | 50.93  | 51.63  | 52.04  |
|            | Potasio   | 125.36 | 127.89 | 129.34 |
|            | Nitrógeno | 36.1   | 36.98  | 38.02  |
| 2025-01-19 | Fósforo   | 50.1   | 51.18  | 52.53  |
|            | Potasio   | 124.4  | 127.05 | 130.54 |

Fuente: Autoría Propia

La Tabla 42 detalla los valores registrados para los macronutrientes esenciales (Nitrógeno, Fósforo y Potasio) en la Estación 2 durante el período de monitoreo. El monitoreo de macronutrientes es crucial para garantizar que las plantas de cáñamo reciban los nutrientes necesarios para su crecimiento y desarrollo en la etapa vegetativa.

**Tabla 42**

*Resumen de valores registrados para Macronutrientes para Estación 2.*

| Días de<br>monitoreo | Macronutriente | Valor Mínimo<br>(ppm) | Valor                         |                       |
|----------------------|----------------|-----------------------|-------------------------------|-----------------------|
|                      |                |                       | Promedio<br>Promedio<br>(ppm) | Valor Máximo<br>(ppm) |
|                      | Nitrógeno      | 21.97                 | 27.04                         | 34.97                 |
| 2025-01-13           | Fósforo        | 30.05                 | 37.43                         | 48.29                 |
|                      | Potasio        | 74.91                 | 93.01                         | 120.11                |
| 2025-01-14           | Nitrógeno      | 20.0                  | 28.23                         | 47.33                 |

---

|            |           |        |        |        |
|------------|-----------|--------|--------|--------|
|            | Fósforo   | 27.97  | 39.15  | 65.66  |
|            | Potasio   | 69.23  | 97.11  | 162.25 |
|            | Nitrógeno | 42.95  | 63.98  | 162.42 |
| 2025-01-15 | Fósforo   | 59.03  | 80.99  | 180.31 |
|            | Potasio   | 146.5  | 172.04 | 274.85 |
|            | Nitrógeno | 38.04  | 40.24  | 42.01  |
| 2025-01-16 | Fósforo   | 52.8   | 55.69  | 58.35  |
|            | Potasio   | 131.04 | 137.95 | 144.35 |
|            | Nitrógeno | 35.03  | 36.47  | 38     |
| 2025-01-17 | Fósforo   | 48.83  | 50.51  | 52.31  |
|            | Potasio   | 120.86 | 125.22 | 129.48 |
|            | Nitrógeno | 32.35  | 33.66  | 34.91  |
| 2025-01-18 | Fósforo   | 45.01  | 46.59  | 48.01  |
|            | Potasio   | 111.66 | 115.55 | 119.22 |
|            | Nitrógeno | 31.41  | 41.865 | 57.67  |
| 2025-01-19 | Fósforo   | 43.45  | 58     | 79.63  |
|            | Potasio   | 107.59 | 143.68 | 197.5  |

---

Fuente: Autoría Propia

Un período de monitoreo de siete días permite analizar como varían los niveles de macronutrientes a lo largo del tiempo, identificando tendencias estables o fluctuaciones que

puedan afectar el desarrollo del cultivo. Durante la semana se puede verificar si las prácticas de fertilización aplicadas son efectivas o necesitan ajustarse si existen desviaciones en los niveles de nutrientes. Las plantas pueden experimentar variaciones en su absorción de nutrientes debido a factores como la temperatura o la humedad del suelo, en este período de monitoreo es posible relacionar las condiciones ambientales con los niveles de macronutrientes.

### **4.3 Resultados de las Pruebas**

El análisis de los resultados de las pruebas realizadas en el sistema de monitoreo ambiental y nutricional para el cultivo de cáñamo medicinal representa un paso crucial para validar la eficacia y funcionalidad de la solución desarrollada. Estas pruebas permitieron evaluar el comportamiento del sistema en condiciones controladas, identificando fortalezas, posibles áreas de mejora y el impacto directo en el manejo del cultivo durante la etapa vegetativa.

A través de una implementación estructurada bajo la metodología en cascada, se lograron diseñar, desarrollar y probar con éxito las funcionalidades esenciales del sistema, garantizando un monitoreo preciso y en tiempo real durante la etapa vegetativa de la planta.

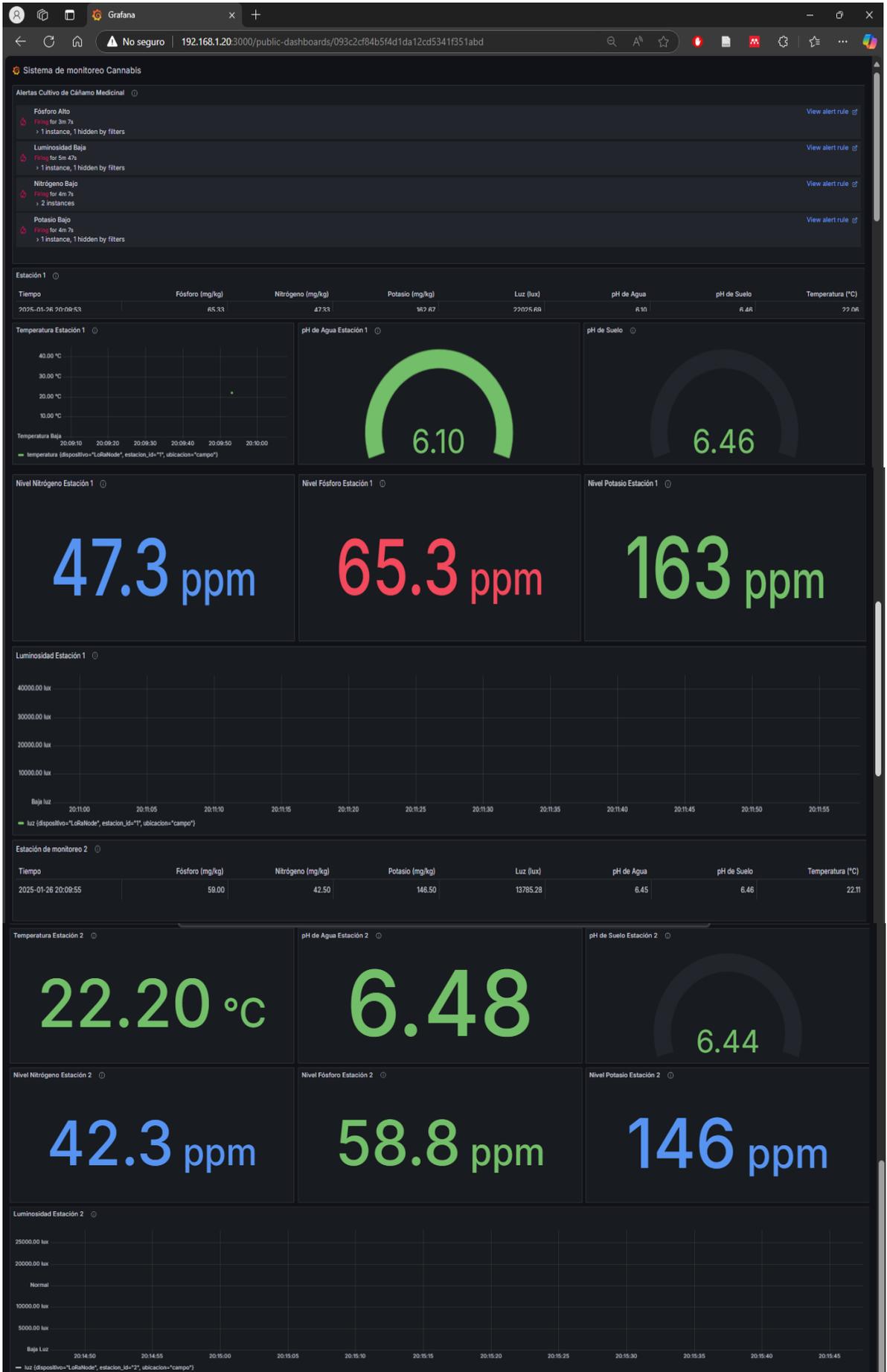
#### ***4.3.1 Análisis de Resultados Obtenidos***

El análisis de los resultados obtenidos en las pruebas del sistema de monitoreo de condiciones ambientales y nutricionales para el cultivo de cáñamo medicinal, desarrollado en un entorno indoor, permitió evaluar su desempeño y efectividad. Este análisis se basó en los datos recopilados por las estaciones LoRa equipadas con sensores que medían temperatura, luminosidad, pH de agua, pH de suelo, así como los niveles de macronutrientes (Nitrógeno, Fósforo, Potasio).

En la Figura 47 presenta como está constituido el Dashboard del sistema con los paneles de visualización para cada variable (ambiental y nutricional) monitoreada en el cultivo de cáñamo medicinal.

**Figura 47**

*Dashboard del Sistema de Monitoreo de Variables ambientales y nutricionales*



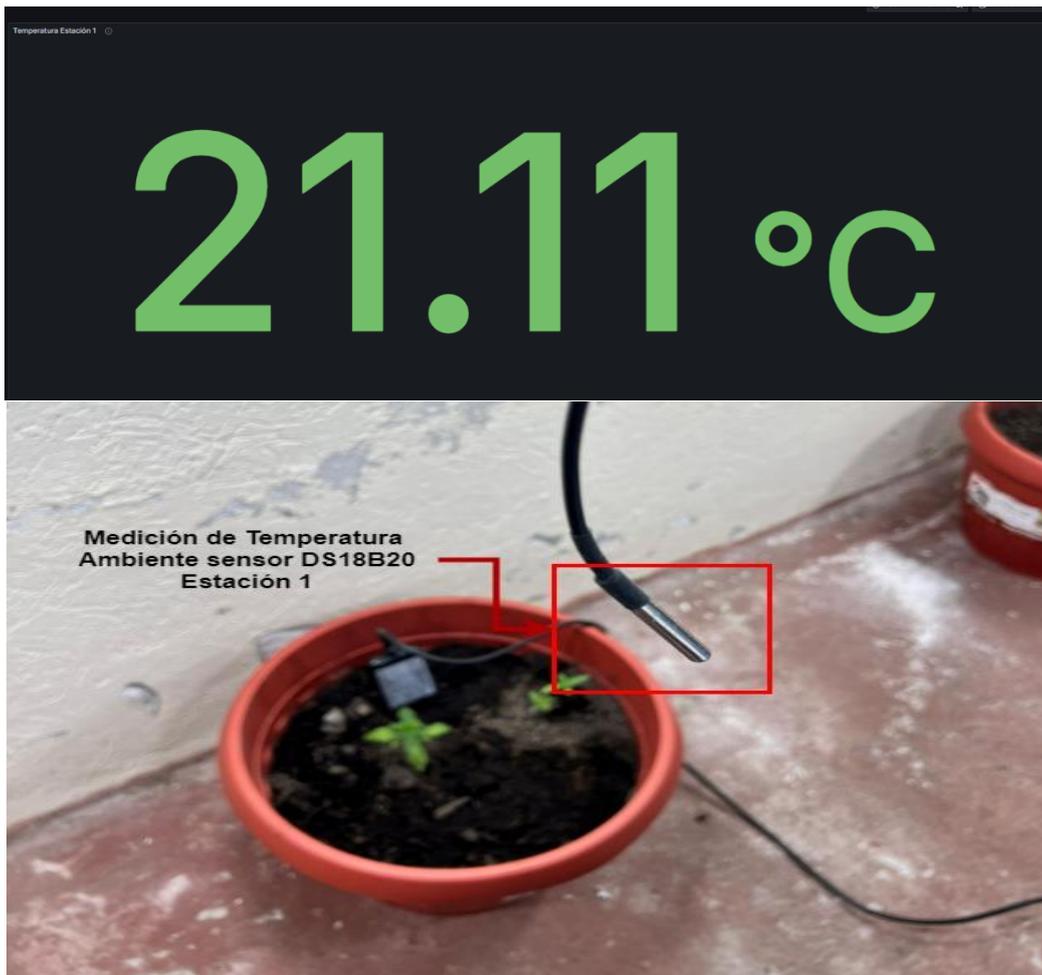
#### ***4.3.1.1 Evaluación de las variables analizadas***

Los valores de temperatura registrados durante el monitoreo se mantuvieron dentro del rango ideal de 20 °C a 25 °C, creando un ambiente propicio para el desarrollo de las plantas. Las variaciones puntuales observadas durante las horas de mayor intensidad lumínica fueron corregidas mediante ajustes en el sistema de ventilación. Con la estabilidad térmica permitió que las plantas logaran un crecimiento saludable y una fotosíntesis eficiente.

La Figura 48 muestra el panel de visualización en Grafana de la temperatura en la Estación 1 registrado en tiempo real. Se puede evidenciar que el dato reflejado en la figura se encuentra dentro del rango óptimo (20 °C a 25 °C) para promover el crecimiento saludable de las plantas.

#### **Figura 48**

*Valor en tiempo real de Temperatura (°C) Estación 1*



La Figura 49 presenta los valores de temperatura en tiempo real registrado en la Estación 2. La visualización en tiempo real permite una respuesta rápida a cualquier desviación térmica, asegurando que el entorno del cultivo se mantenga estable para un crecimiento óptimo.

**Figura 49**

*Valor en tiempo real de Temperatura (°C) Estación 2.*

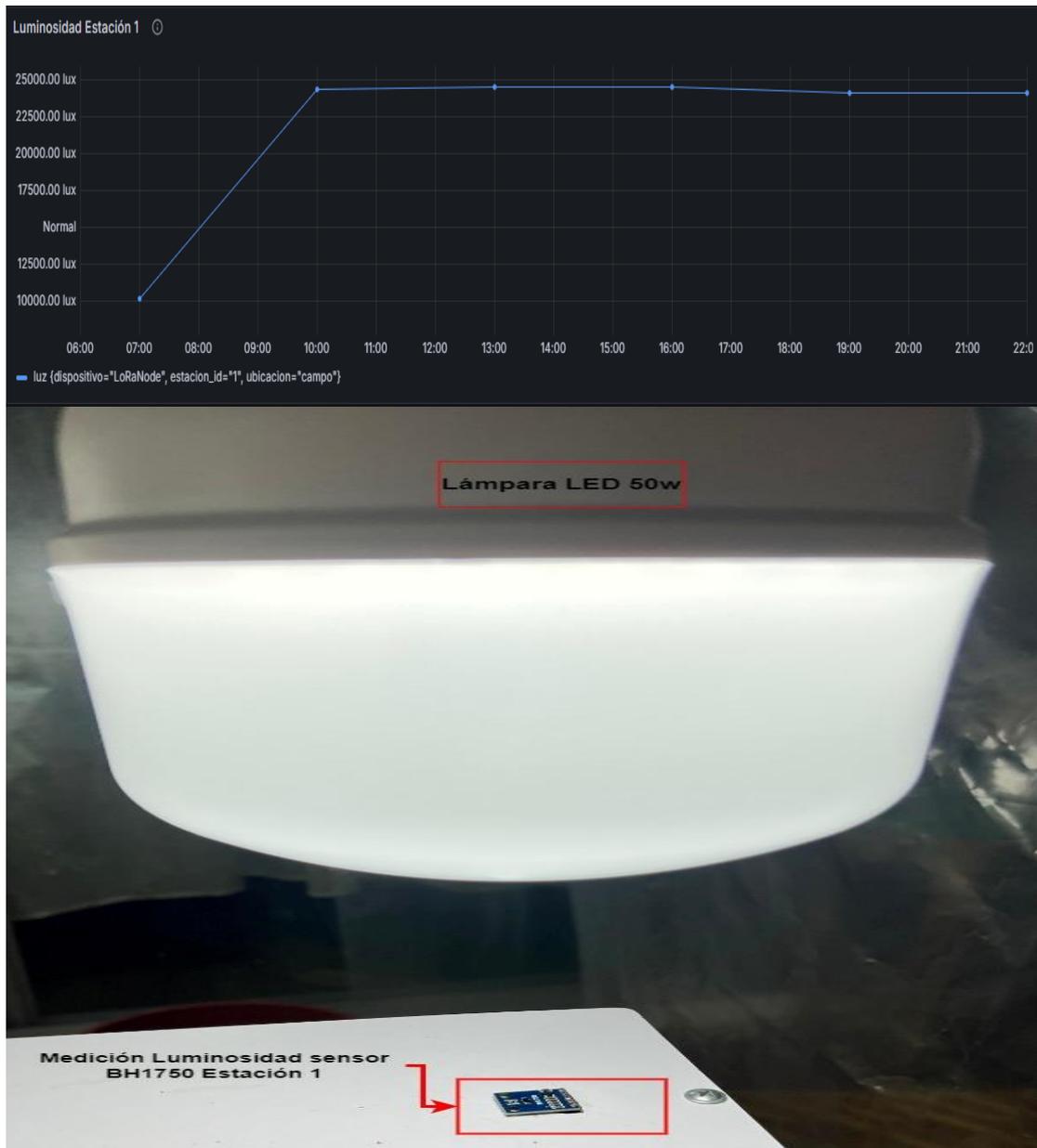


Las mediciones realizadas con el sensor BH1750 reflejaron niveles superiores a 15000 lux, adecuados para la fase vegetativa. Se detectaron ligeras variaciones en la intensidad lumínica, atribuibles al desgaste de algunas lámparas LED y a los fotoperíodos de luz que duran 16 horas del día. Esto contribuye a un desarrollo uniforme del follaje y una estructura robusta de las plantas.

La Figura 50 muestra los valores de luminosidad registrados en tiempo real en la Estación 1. Este gráfico refleja como varía la intensidad lumínica (lux) a lo largo del período de tiempo. La imagen permite observar si los niveles de luz permanecen dentro del rango óptimo, asegurando que las plantas reciban la iluminación adecuada para un crecimiento eficiente.

**Figura 50**

*Valor en tiempo real de Luminosidad (lux) Estación 1*



La Figura 51 presenta valores de luminosity real registrados en la Estación 2. Este gráfico destaca las variaciones en la intensidad lumínica durante un período, proporcionando información clave para evaluar la efectividad del sistema de iluminación en el entorno del cultivo.

**Figura 51**

*Valor en tiempo real de Luminosidad (lux) Estación 2*



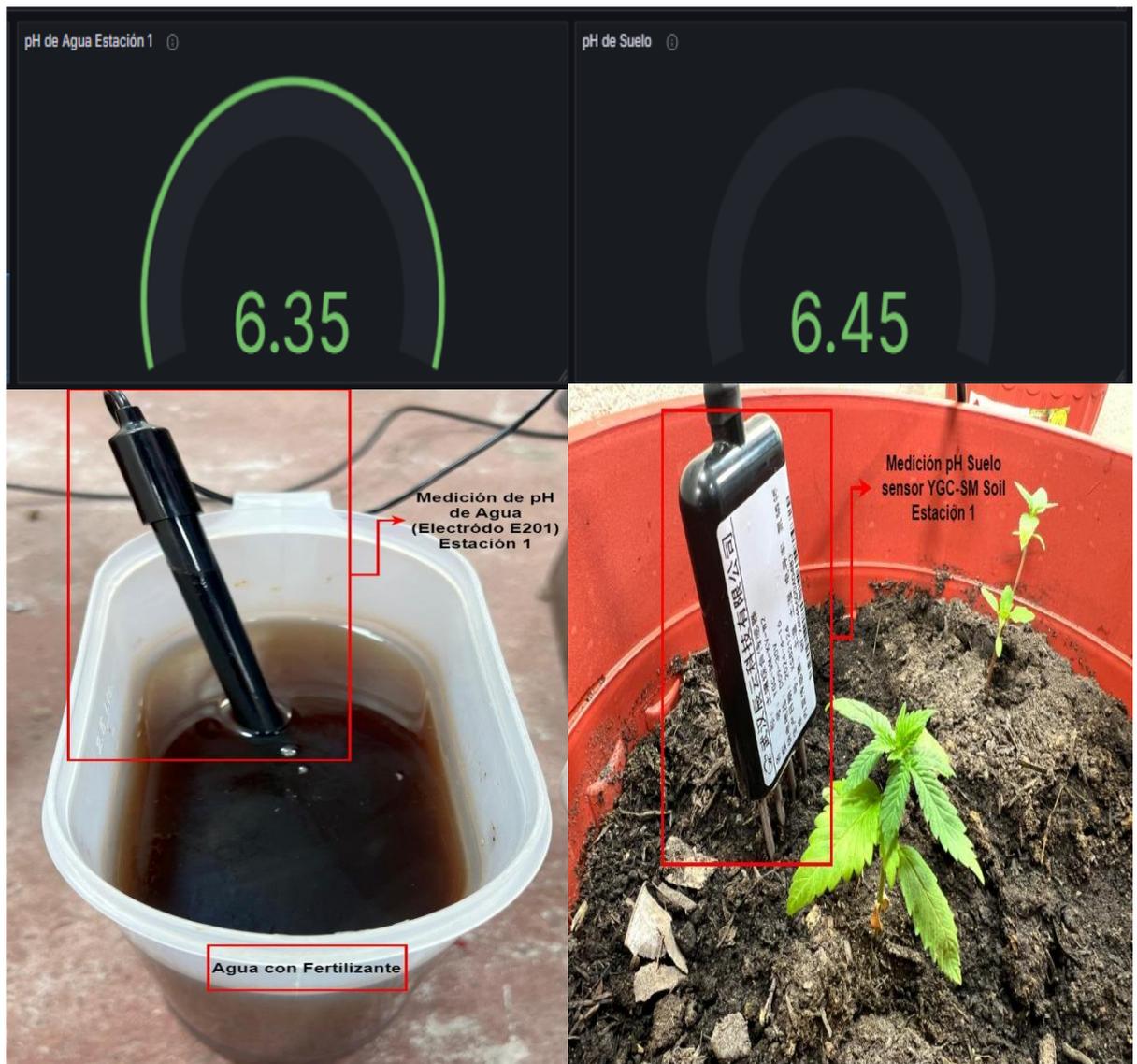
En cuanto al pH de agua, permaneció en un rango óptimo de 6.0 a 7.0, asegurando la disponibilidad de nutrientes en la solución de riego. Por su parte, el pH de suelo se mantuvo entre el rango de 6.4 y 6.5, favoreciendo la absorción eficiente de nutrientes esenciales. La regulación adecuada del pH evita deficiencias nutricionales, contribuyendo al desarrollo saludable de las raíces.

La Figura 52 muestra los valores de pH de Agua y Suelo registrados en tiempo real para la Estación 1. Estos indicadores reflejan estabilidad de las condiciones en el medio, con un pH

que se encuentra dentro del rango recomendado para el cultivo de cáñamo medicinal en su fase vegetativa.

### Figura 52

*Valor en tiempo real de pH de Agua y Suelo de Estación 1.*



La Figura 53 presenta los valores de pH de agua y suelo en la Estación 2, registrando valores que están dentro del rango óptimo para el crecimiento de cáñamo medicinal, asegurando que las condiciones del medio sean adecuadas para el desarrollo de las plantas.

### Figura 53

*Valor en tiempo real de pH de Agua y Suelo de Estación 2.*

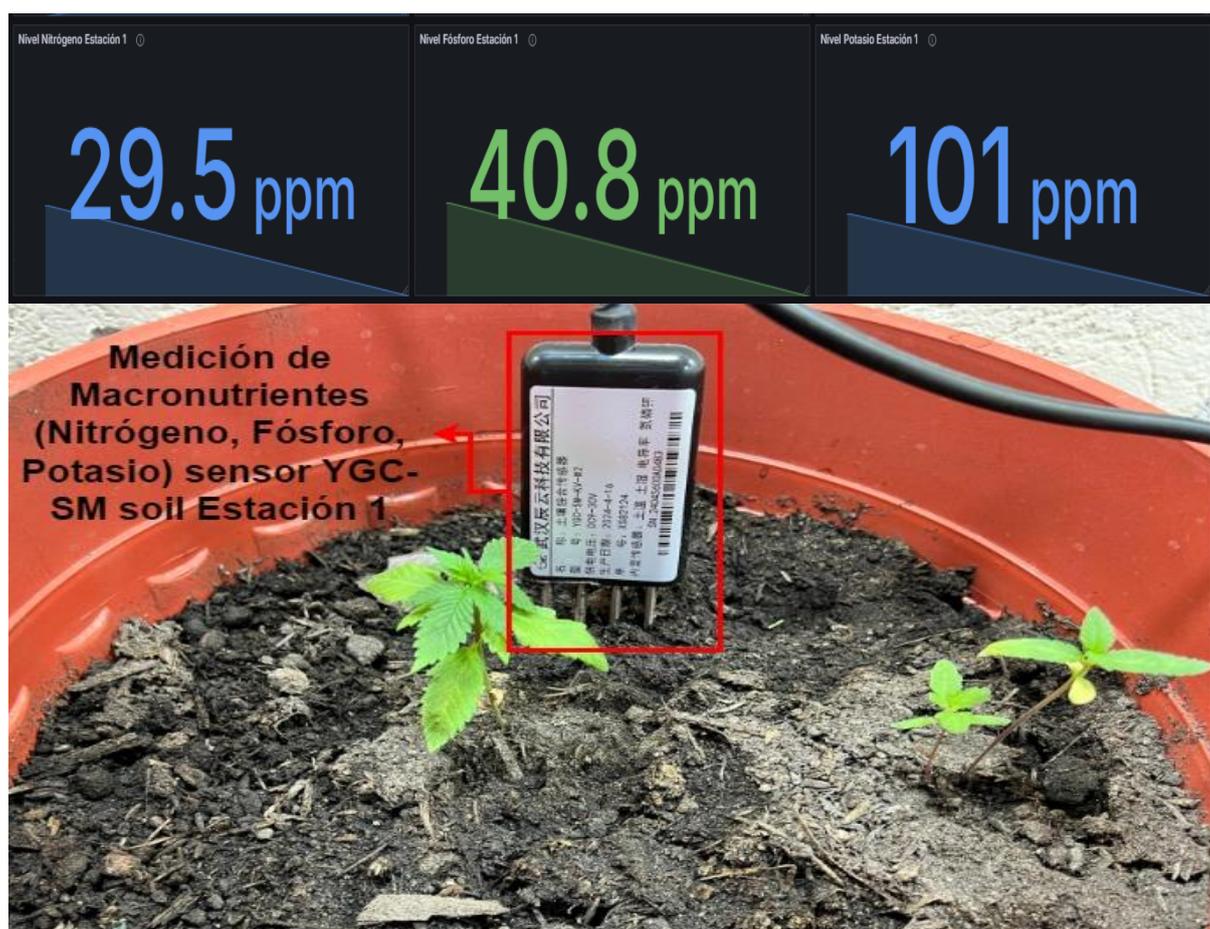


Los macronutrientes (Nitrógeno, Fósforo y Potasio) estuvieron en diferentes valores para Nitrógeno, Fósforo y Potasio. Los niveles de Nitrógeno se mantuvieron aproximadamente en 30 ppm, por debajo del rango ideal lo que implica el amarillamiento de las hojas, la cantidad de Fósforo se mantuvo considerablemente favorable entre 30 a 50 ppm, en el rango ideal, que implica la buena absorción de agua y raíces robustas y los niveles de Potasio estuvieron por debajo de los 100 ppm, por debajo del rango óptimo que implica menor resistencia y calidad celular reducida. Esto se soluciona con aditamentos en la solución líquida de riego para garantizar una nutrición balanceada que permita el desarrollo vigoroso de las plantas de cáñamo.

La Figura 54 muestra los valores de los macronutrientes registrados en la Estación 1. Los niveles registrados permiten identificar deficiencias en los nutrientes y permite realizar ajustes oportunos en las prácticas de fertilización.

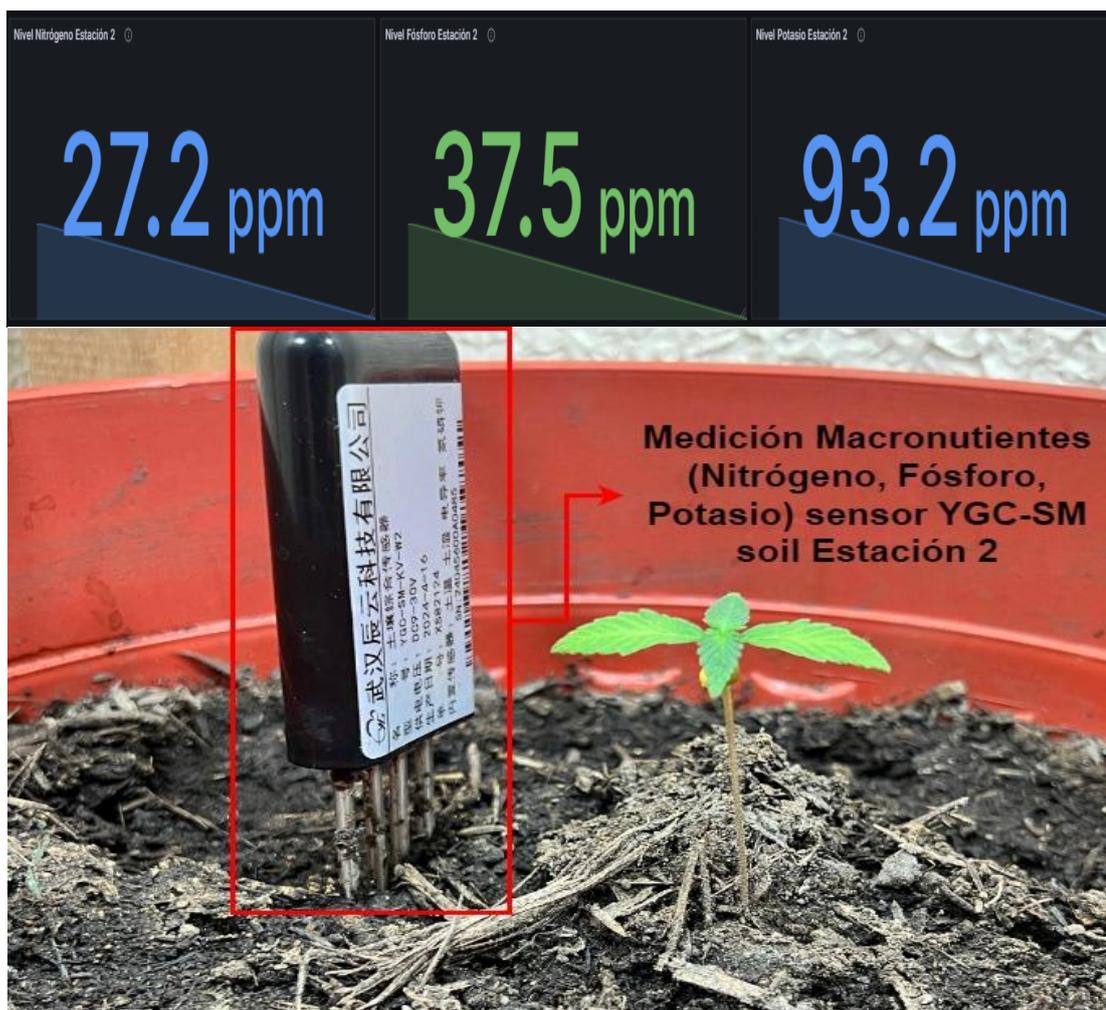
**Figura 54**

*Valores en tiempo real de Macronutrientes en Estación 1.*



La Figura 55 presenta valores de los macronutrientes registrados en la Estación 2. Estos valores permiten analizar la dinámica nutricional en esta estación y verificar si los nutrientes se encuentran dentro de los rangos óptimos. Esto es fundamental para garantizar un manejo eficiente de la fertilización, minimizando riesgos de deficiencia o toxicidad que comprometan el desarrollo del cultivo.

**Figura 55** *Valores en tiempo real de Macronutrientes en Estación 2.*



La Tabla 43 presenta un resumen de los valores promedio, máximo y mínimo registrados para las variables ambientales y nutricionales durante el período de evaluación en el cultivo de cáñamo medicinal.

**Tabla 43**

*Resumen de valores promedio, máximos y mínimos de variables ambientales y nutricionales*

| Variable    | Rango óptimo | Estación de Monitoreo | Promedio obtenido | Valor mínimo | Valor máximo |
|-------------|--------------|-----------------------|-------------------|--------------|--------------|
| Temperatura | 20-25 °C     | 1                     | 20.236 °C         | 15.55 °C     | 24.65 °C     |

|             |           |   |              |           |              |
|-------------|-----------|---|--------------|-----------|--------------|
|             |           | 2 | 22.045 °C    | 19.72 °C  | 26.38 °C     |
| Luminosidad | 15000-    | 1 | 17399.89 lux | 2.98 lux  | 27951.89 lux |
|             | 50000 lux | 2 | 12295.52 lux | 8.39 lux  | 20955.82 lux |
| pH de Agua  | 6.0-7.0   | 1 | 6.27         | 6.09      | 6.98         |
|             |           | 2 | 6.215        | 6.01      | 6.52         |
| pH de Suelo | 6.0-7.0   | 1 | 6.442        | 6.4       | 6.48         |
|             |           | 2 | 6.442        | 6.4       | 6.48         |
| Nitrógeno   | 150-200   | 1 | 37.798 ppm   | 26.09 ppm | 52.84 ppm    |
|             | ppm       | 2 | 38.78 ppm    | 20 ppm    | 162.42 ppm   |
| Fósforo     | 40-60 ppm | 1 | 52.268 ppm   | 36.26 ppm | 73.09 ppm    |
|             |           | 2 | 52.62 ppm    | 27.97 ppm | 180.31 ppm   |
| Potasio     | 150-200   | 1 | 129.496 ppm  | 90.39 ppm | 180.78 ppm   |
|             | ppm       | 2 | 126.366 ppm  | 69.23 ppm | 274.85 ppm   |

Fuente: Autoría Propia

El monitoreo de las variables ambientales y nutricionales en la fase vegetativa del cáñamo medicinal es crucial para mantener condiciones que favorezcan el desarrollo saludable de las plantas y minimicen el impacto de enfermedades y plagas. Este análisis busca establecer cómo las variables controladas en el sistema de monitoreo influyen en la prevención de estos problemas y como su manejo adecuado puede ayudar en la eficiencia del cultivo en un entorno indoor. La Figura 56 muestra el estado actual de la planta de cáñamo medicinal (variedad Cherry Oregon) luego del período de monitoreo registrado en la Tabla 43.

**Figura 56**

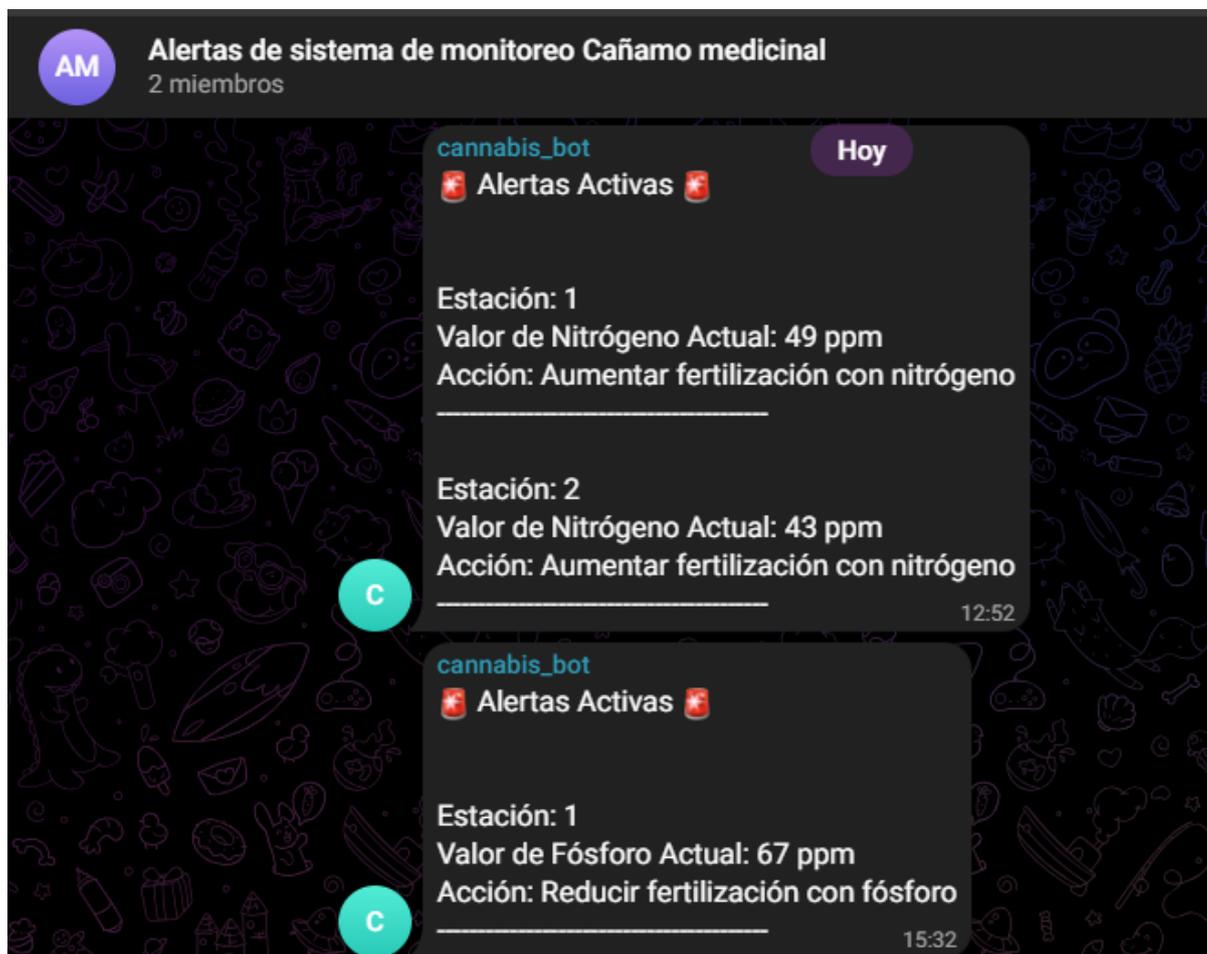
*Planta cáñamo medicinal (variedad Cherry Oregon Hemp.)*



El sistema de monitoreo instalado mide parámetros clave como temperatura, luminosidad, pH de agua y suelo, y niveles de macronutrientes esenciales (Nitrógeno, Fósforo y Potasio). Cada una de estas variables está vinculada a la capacidad del cultivo para resistir condiciones que favorezcan la aparición de plagas y enfermedades. Por esta razón, se envían las alertas a Telegram para poder actuar ante la falta de estas variables medidas como se muestra en la Figura 57.

**Figura 57**

*Envío de mensajes de alerta a Telegram*



La Tabla 43 ofrece un análisis exhaustivo de los datos registrados durante los siete días de monitoreo para las variables ambientales y nutricionales del cáñamo medicinal (*Cannabis sativa*, variedad Cherry Oregon Hemp). Al comparar estos resultados con los rangos óptimos establecidos para la etapa vegetativa, se destacan tanto fortalezas como áreas que requieren mejoras.

#### ***4.3.1.2 Minimización del impacto de enfermedades y plagas***

El monitoreo detallado de las variables ambientales y nutricionales en ambas estaciones de cultivo ha permitido identificar factores clave para mitigar el impacto de enfermedades y plagas en el cáñamo medicinal. En relación con la temperatura, los valores promedio

registrados estuvieron mayoritariamente dentro del rango óptimo de 20 a 25 °C, lo que favorece el desarrollo vegetativo. Sin embargo, se detectaron mínimos por debajo del límite inferior en ambas estaciones, llegando a 15.55 °C en la estación 1 y 19.72 °C en la estación 2. Estas condiciones podrían ralentizar la fotosíntesis y, de prolongarse, afectar negativamente el crecimiento de las plantas. Además, en la estación 2, los valores máximos superaron ligeramente el límite superior con 26.38 °C, lo que puede acelerar la proliferación de plagas como los ácaros (*Tetranychus urticae*) y los trips (*Frankliniella occidentalis*), que atacan el tejido foliar y dificultan la fotosíntesis, comprometiendo la productividad del cultivo.

En cuanto a la luminosidad, los promedios obtenidos en ambas estaciones no alcanzaron de forma constante el rango óptimo establecido entre 15000 y 50000 lux. En la estación 2, este déficit fue más notable, con un promedio de 12295.52 lux. Las condiciones de baja luminosidad, posiblemente causadas por interrupciones en el sistema de iluminación o áreas con sombras, afectan directamente la capacidad fotosintética de las plantas, debilitando sus defensas naturales. Esto aumenta la susceptibilidad a plagas como los pulgones.

Respecto a los niveles de pH, tanto en el agua como en el suelo, se mantuvieron dentro del rango ideal de 6.0 a 7.0, lo que asegura la disponibilidad de nutrientes esenciales y un equilibrio químico adecuado para el desarrollo radicular. Estas condiciones son fundamentales para prevenir alteraciones que podrían incrementar el riesgo de enfermedades asociadas a desequilibrios nutricionales.

Sin embargo, el monitoreo de macronutrientes reflejó ciertas inconsistencias. Los niveles de nitrógeno estuvieron constantemente por debajo del rango óptimo de 150 a 200 ppm, limitando la formación de hojas y el crecimiento vegetativo. En el caso del fósforo, aunque los promedios fueron adecuados, se registraron máximos excesivamente altos en la estación 2, lo que podría ocasionar toxicidad en el cultivo. Asimismo, los niveles de potasio mostraron una

distribución irregular, con promedios generalmente bajos y valores máximos elevados, lo que podría alterar la estructura química del suelo y favorecer la proliferación de nematodos. Estos desequilibrios en los niveles de nutrientes favorecen la incidencia de enfermedades como la pudrición de raíces causada por el patógeno *Pythium* spp., la cual se puede observar en la Figura 58 que se observa la proliferación de este patógeno, el cual prospera en condiciones de estrés de la planta y un manejo inadecuado de nutrientes.

### Figura 58

*Incidencia de patógeno *Pythium* spp en cáñamo medicinal*



Las observaciones realizadas destacan la necesidad de optimizar las condiciones ambientales y nutricionales del cultivo para minimizar el impacto de plagas y enfermedades.

La estabilización de las variables críticas y la implementación de estrategias de manejo proactivo (tomar la iniciativa para resolver situaciones y evitar problemas) permitirán mantener el equilibrio fisiológico de las plantas, mejorando su resistencia y reduciendo riesgos asociados a condiciones adversas.

#### ***4.3.1.3 Fortalezas identificadas en el Sistema***

El análisis del sistema de monitoreo implementado para el cultivo de cáñamo medicinal en un entorno indoor resalta diversas fortalezas que contribuyen a su efectividad. Estas fortalezas se reflejan tanto en la precisión de los datos recopilados como en la capacidad del sistema para adaptarse a diversas necesidades agrícolas, considerándolo como una herramienta eficiente para la agricultura de precisión.

Entre las principales fortalezas, el monitoreo en tiempo real. La integración de InfluxDB para el almacenamiento de datos y Grafana para la visualización permite acceder de manera inmediata a información clave, lo que facilita la identificación de anomalías y la toma de decisiones correctivas de manera oportuna. Este enfoque proactivo reduce los riesgos asociados al manejo del cultivo y maximiza la eficiencia operativa.

La precisión de los sensores es otro aspecto clave del sistema. El uso de dispositivos como el DS18B20 para temperatura, BH1750 para luminosidad, PH-4502C para pH del agua y YGC-SM para pH del suelo y macronutrientes garantiza mediciones confiables y consistentes, fundamentales para mantener las variables dentro de los rangos óptimos definidos para la etapa vegetativa del cáñamo medicinal. Esto no solo asegura un desarrollo saludable de las plantas, sino que también minimiza los riesgos de enfermedades y plagas.

En términos de conectividad, la comunicación LoRa entre las estaciones de monitoreo y el Gateway central proporciona una transmisión de datos estable y de largo alcance, incluso

en entornos indoor. Esto permite una supervisión constante y confiable sin interrupciones significativas, lo que resulta esencial para garantizar la continuidad del sistema.

Asimismo, el diseño modular y flexible del sistema permite adaptarlo a diferentes escenarios agrícolas. Es posible integrar nuevas estaciones de monitoreo o modificar los sensores para atender las necesidades de otros cultivos, asegurando así su versatilidad y escalabilidad en diversas aplicaciones.

Aunque el sistema presenta estas fortalezas, es importante considerar áreas de mejora para maximizar su impacto. Por ejemplo, la dependencia de una infraestructura tecnológica sólida, como acceso a redes de comunicación y una fuente de energía constante, puede limitar su implementación en zonas con recursos limitados. Adicionalmente, los costos iniciales de instalación podrían representar un desafío para pequeños agricultores. Estas áreas sugieren la necesidad de explorar opciones más accesibles y sostenibles para ampliar el alcance del sistema.

En general, las fortalezas del sistema, junto con su capacidad para integrarse en estrategias de agricultura de precisión, lo convierten en una solución tecnológica para la gestión del cultivo de cáñamo medicinal, con un gran potencial para expandirse a otros entornos agrícolas y continuar mejorando en función de las necesidades del sector.

#### **4.4 Discusión sobre los Impactos del Sistema Implementado**

La implementación del sistema de monitoreo de variables ambientales y nutricionales para el cultivo de cáñamo medicinal en un entorno indoor, ha generado impactos significativos que van más allá de su funcionamiento técnico. Este sistema no solo optimiza las condiciones de crecimiento durante la etapa vegetativa, sino que también ha generado efectos positivos en aspectos ambientales, operativos y beneficios a largo plazo relacionado con la producción del cultivo.

Analizar los impactos generados por este sistema permite evaluar de manera integral los beneficios alcanzados y detectar oportunidades de mejora para su perfeccionamiento. Además, este análisis facilita la identificación de estrategias que aseguren su escalabilidad y sostenibilidad en el tiempo.

#### **4.4.1 Impactos Ambientales**

La implementación del sistema de monitoreo ambiental y nutricional para el cultivo de cáñamo medicinal en un entorno indoor ha tenido efectos ambientales positivos. Este sistema, que utiliza tecnología LoRa para la comunicación, sensores de alta precisión y herramientas de almacenamiento como InfluxDB, ha optimizado el uso de recursos esenciales, como agua, fertilizantes y energía, reduciendo a la vez el impacto ambiental asociado al cultivo.

El monitoreo continuo de parámetros clave como el pH del agua y suelo, junto con los factores ambientales como la temperatura y la luminosidad, ha permitido una gestión más eficiente del agua. Esto es crucial en cultivos indoor, donde el riego debe ser cuidadosamente controlado para evitar tanto el exceso como la insuficiencia de agua.

El monitoreo en tiempo real de macronutrientes como Nitrógeno (N), Fósforo (P) y Potasio (K) permite una aplicación precisa de fertilizantes, ajustada a las necesidades del cultivo. Esto ayuda a prevenir la contaminación ambiental por exceso de fertilizantes en el suelo, emisiones de gases que pueden generar como el Óxido Nitroso ( $N_2O$ ), que es un potente gas de efecto invernadero. El beneficio ambiental de este sistema es que asegura que los nutrientes sean aplicados de manera dirigida, minimizando el impacto ambiental y preservando la calidad del suelo.

La implementación de este sistema no solo optimiza el uso de recursos, sino que también se alinea con las normativas actuales sobre gestión sostenible en la agricultura. Esto refuerza el compromiso con prácticas responsables y ayuda a posicionar el cultivo de cáñamo

medicinal como una opción respetuosa con el medio ambiente. La Tabla 44 resume los beneficios obtenidos en términos de uso de agua, fertilizantes y reducción de desechos.

**Tabla 44**

*Resumen de Impactos Ambientales del sistema de monitoreo.*

| <b>Área de Impacto</b> | <b>Antes del sistema</b> | <b>Después del sistema</b> | <b>Beneficio Ambiental</b>                      |
|------------------------|--------------------------|----------------------------|-------------------------------------------------|
| Uso del agua           | Alto consumo             | Reducción del 20%          | Menor desperdicio                               |
| Uso de fertilizantes   | Aplicación generalizada  | Aplicación precisa         | Reducción de contaminación y emisiones de gases |
| Residuos vegetales     | Pérdidas frecuentes      | Reducción significativa    | Menor impacto ambiental y menor desperdicio.    |

Fuente: Autoría Propia

El sistema desarrollado no solo mejora las condiciones del cultivo de cáñamo medicinal, sino que también fomenta prácticas agrícolas más sostenibles. Al minimizar el uso de recursos y reducir el impacto ambiental, el sistema presenta un avance significativo hacia un modelo de producción más respetuoso con el medio ambiente y económicamente viable.

#### **4.4.2 Impactos Operativos**

La incorporación del sistema de monitoreo de variables ambientales y nutricionales en el cultivo de cáñamo medicinal, diseñado para un entorno indoor, ha generado mejoras significativas en la gestión operativa del cultivo. Este sistema, que utiliza sensores específicos avanzados, tecnología LoRa para la comunicación y herramientas de visualización en tiempo

real como Grafana, ha optimizado los procesos, minimizando errores y reducido la dependencia del monitoreo manual, transformando la forma en que se manejan las actividades diarias.

Una de las ventajas operativas principales es la automatización que introduce en los procesos de monitoreo. Antes de su implementación, muchas de las actividades relacionadas con el seguimiento de las condiciones del cultivo requerían supervisión manual constante. Ahora, los sensores recopilan datos en tiempo real sobre Temperatura, Luminosidad, pH de agua y suelo, y niveles de macronutrientes, eliminando la necesidad de mediciones manuales.

El acceso a datos en tiempo real mediante el Dashboard interactivo mejora significativamente la capacidad del encargado o encargados del cultivo para tomar decisiones rápidas y precisas. Este enfoque basado en datos permite identificar y resolver problemas antes de que afecten gravemente el desarrollo de las plantas. Las alertas en tiempo real notifican al usuario cuando una variable esta fuera de rango óptimo, permitiendo tomar medidas correctivas de inmediato.

El sistema permite múltiples estaciones de monitoreo desde un punto centralizado. Esto es especialmente útil en cultivos indoor, donde las condiciones pueden variar entre estaciones y necesitan ser gestionadas de manera específica. La automatización no solo mejora la precisión de las mediciones, sino que también reduce los errores asociados con el manejo del cultivo, como la aplicación incorrecta de fertilizantes. La Tabla 45, detalla los beneficios clave relacionados con la automatización, la eficiencia y optimización de recursos.

**Tabla 45**

*Resumen de Impacto Operativo del sistema de monitoreo*

| <b>Área de Impacto</b> | <b>Antes del sistema</b> | <b>Después del sistema</b> | <b>Beneficio Operativo</b> |
|------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|
|------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|

|                           |                                    |                               |                                        |
|---------------------------|------------------------------------|-------------------------------|----------------------------------------|
| Monitoreo                 | Requería mediciones manuales       | Automatizado y en tiempo real | Reducción de tiempo y esfuerzo manual  |
| Toma de decisiones        | Basada en observaciones subjetivas | Basada en datos precisos      | Respuesta más rápida y efectiva        |
| Uso de recursos           | Aplicaciones excesivas o inexactas | Optimización basada en datos  | Reducción de costos y mayor eficiencia |
| Supervisión de estaciones | Necesidad de inspecciones físicas  | Gestión centralizada          | Simplificación de las operaciones      |

---

Fuente: Autoría Propia

El sistema de monitoreo ha revolucionado las operaciones relacionadas con el manejo del cultivo de cáñamo medicinal. Al reducir la dependencia del monitoreo manual, aumentar la precisión en la recopilación de datos y permitir una toma de decisiones basada en información confiable, este sistema ha logrado optimizar las actividades diarias del cultivo. Su impacto operativo no solo mejora la eficiencia, sino que también establece un modelo de trabajo más rentable y sostenible para el futuro.

#### ***4.4.3 Beneficios a Largo Plazo y Sostenibilidad***

La implementación del sistema de monitoreo de variables ambientales y nutricionales en el cultivo de cáñamo medicinal, desarrollado en un entorno indoor, ha demostrado no solo resolver necesidades inmediatas, sino también establecer una base sólida para beneficios sostenibles a largo plazo. Gracias a la integración de tecnologías avanzadas como sensores de precisión, comunicación LoRa y análisis en tiempo real a través de Grafana, este sistema contribuye significativamente a mejorar la viabilidad económica, ambiental y tecnológica del cultivo.

El sistema tiene un impacto directo en la rentabilidad del cultivo al optimizar el uso de recursos esenciales como agua y fertilizantes, reduciendo costos operativos. Además, la capacidad de detectar problemas de manera temprana disminuye las pérdidas y asegura una producción consistente de alta calidad.

El sistema fomenta prácticas agrícolas responsables al minimizar el impacto ambiental del cultivo mediante un uso eficiente de los recursos y una reducción de residuos y emisiones. El diseño del sistema permite su fácil expansión y adaptación a otros cultivos o configuraciones de cultivo indoor. Esto lo convierte en una herramienta versátil que puede ser escalada para cubrir mayores áreas o ajustarla a diferentes necesidades del usuario.

Por su parte, la incorporación de tecnologías avanzadas en este sistema no solo mejora la gestión del cultivo, sino que también impulsa la innovación en el sector agrícola. Esto fomenta un enfoque progresivo en la agricultura de precisión y abre oportunidades para integrar nuevas herramientas tecnológicas en el futuro.

Los beneficios del sistema, como la sostenibilidad y la consistencia en la producción, ayudarían a mejorar la reputación del productor en el mercado. Esto es particularmente valioso en un contexto donde los consumidores valoran cada vez más las prácticas agrícolas sostenibles. El sistema permitiría cumplir con normativas ambientales y de calidad, lo que puede facilitar la apertura a nuevos mercados. En la Tabla 46 se describe los impactos en que incidiría el sistema para los aspectos económicos, ambientales y tecnológicos.

**Tabla 46**

*Resumen de los Impactos, Sostenibilidad y Beneficios a Largo Plazo*

| <b>Categoría</b> | <b>Beneficio a Largo Plazo</b> | <b>Impacto</b> | <b>en</b> | <b>la</b>             |
|------------------|--------------------------------|----------------|-----------|-----------------------|
|                  |                                |                |           | <b>Sostenibilidad</b> |

---

|                |                                                                      |                                                |
|----------------|----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| Económica      | Reducción de costos operativos y estabilidad en la producción.       | Mejora de la rentabilidad y eficiencia.        |
| Ambiental      | Uso eficiente de agua y fertilizantes, menor generación de residuos. | Promoción de prácticas agrícolas responsables. |
| Tecnológica    | Escalabilidad y compatibilidad con herramientas                      | Fomenta la innovación en la agricultura nuevas |
| Competitividad | Mayor aceptación en el mercado por prácticas sostenibles.            | Incremento de oportunidades comerciales.       |

---

Fuente: Autoría Propia

El sistema implementado no solo responde a las necesidades actuales del cultivo de cáñamo medicinal, sino que también establece un marco para garantizar su sostenibilidad futura. La optimización de recursos, la reducción del impacto ambiental y la promoción de la innovación tecnológica harían de este sistema una solución integral para la agricultura de precisión. Su escalabilidad y adaptabilidad lo convertiría en una herramienta fundamental para enfrentar los desafíos futuros del sector agrícola.

## Conclusiones y Recomendaciones

### Conclusiones

El sistema desarrollado ha demostrado ser una herramienta efectiva para el monitoreo de las variables ambientales y nutricionales esenciales en la etapa vegetativa del cáñamo medicinal (*Cannabis sativa*, variedad Cherry Oregon Hemp). Su implementación ha permitido recolectar datos en tiempo real, procesarlos y visualizarlos de manera clara, proporcionando información valiosa para mejorar las condiciones del cultivo. Las tecnologías IoT integradas, como LoRa para la comunicación de largo alcance y bajo consumo, MQTT para la transmisión de datos y Grafana para la visualización, han garantizado la confiabilidad y eficiencia del sistema en un entorno controlado. Esto respalda el cumplimiento del objetivo general de monitorear y controlar las condiciones del cultivo, minimizando el impacto de enfermedades y plagas.

Las inconsistencias en variables como temperatura, luminosidad y macronutrientes afectan el desarrollo óptimo del cáñamo medicinal, comprometiendo su crecimiento y aumentando su vulnerabilidad a plagas y enfermedades. Temperaturas fuera del rango ideal (20-25 °C) generan estrés térmico, favoreciendo la proliferación de ácaros y trips, que dañan el tejido foliar y reducen la fotosíntesis. Los déficits de luminosidad limitan el vigor de las plantas, aumentando su susceptibilidad a infecciones. En cuanto a los macronutrientes, las deficiencias de nitrógeno afectan el crecimiento vegetativo, mientras que los desequilibrios de fósforo y potasio alteran la salud del suelo, facilitando la aparición de plagas como nematodos subterráneos y la afectación de patógenos como el *Pythium spp* que ocasiona el debilitamiento de raíces, lo que lleva al amarillamiento de las hojas.

La implementación del sistema de monitoreo evidenció que la metodología utilizada para diseñar y validar cada componente fue adecuada, logrando un equilibrio entre funcionalidad y precisión. Esto permite que el sistema satisfaga las necesidades específicas del cultivo, al

proporcionar información detallada que respalda la toma de decisiones y mejore el manejo del cáñamo medicinal durante su etapa vegetativa.

El sistema desarrollado permitió identificar la relación directa entre las variables ambientales y nutricionales y su impacto en el crecimiento del cáñamo medicinal, cumpliendo con el objetivo de realizar un monitoreo continuo que facilite el análisis de las condiciones del cultivo. La integración de sensores especializados y la visualización en tiempo real de los datos aseguran un control efectivo, minimizando riesgos asociados a enfermedades, plagas y desequilibrios nutricionales.

### **Recomendaciones**

Es imprescindible optimizar el sistema de control de temperatura mediante la implementación de sistemas de climatización o ventilación que mantengan las temperaturas dentro del rango ideal de 20-25 °C. Esto reducirá el estrés térmico, fortaleciendo las plantas y disminuyendo su vulnerabilidad a plagas como ácaros y trips, así como a enfermedades fúngicas como *Botrytis cinerea*.

La mejora en la distribución e intensidad de la iluminación también es crucial. Es necesario garantizar niveles de luminosidad en el rango de 15000-50000 lux durante los fotoperíodos, utilizando sistemas de iluminación eficientes, como luces LED ajustables. Esto asegurará una fotosíntesis óptima, previniendo debilidades en las plantas que puedan favorecer infecciones por *Fusarium* o *Pythium*.

Se debe revisar y mejorar las prácticas de fertilización para lograr un equilibrio adecuado de macronutrientes, especialmente Nitrógeno, Fósforo y Potasio. Los niveles bajos de Nitrógeno limitan el desarrollo foliar y las defensas naturales de las plantas, mientras que los excesos de Fósforo y Potasio pueden alterar la composición del suelo, favoreciendo la proliferación de plagas como nematodos.

Finalmente, el fortalecimiento del sistema de monitoreo y alertas es fundamental. Se recomienda configurar notificaciones automatizadas más detalladas en el Dashboard de Grafana, permitiendo que los operadores del cultivo identifiquen y respondan rápidamente a cualquier desviación de los umbrales establecidos para las variables críticas.

## Referencias Bibliográficas

Bao, Y.; Liu, F. (2019). Planting Density and Fertilization Evidently Influence the Fiber Yield of Hemp (*Cannabis sativa* L.). *Agronomy*, 9, 368.

Landi, S.; Berni, R.; Capasso, G.; Hausman, J.-F.; Guerriero, G.; Esposito, S. (2019). Impact of Nitrogen Nutrition on *Cannabis sativa*: An Update on the Current Knowledge and Future Prospects. *Int. J. Mol. Sci*, 20, 5803.

Williams, D.W. and R. Mundel. (2018). An Introduction to Industrial Hemp and Hemp Agronomy. Cooperative Extension Service Publication ID-250. College of Agriculture, Food and Environment, University of Kentucky.

Ponce Bueno, C. G., & Jordán Zamora, E. F. (2023). Diseño e implementación de un sistema de monitoreo nutricional inteligente mediante servicio IoT de cultivo de maíz con protocolo de comunicación LoRaWAN (Bachelor's thesis).

Yépez Vásquez, J. E. (2023). Sistema de monitoreo de cultivos de arándanos basado en Wi-Sun Fan Mesh Network (Bachelor's thesis).

Gómez, J. E., Castaño, S., Mercado, T., Fernandez, A., & Garcia, J. (2017). Sistema de internet de las cosas (IoT) para el monitoreo de cultivos protegidos. *Ingeniería e innovación*.

Gomez, S. B., & Herrera, H. J. R. (2022). Sistema IoT basado en ESP32 para el control y monitoreo de cultivos en invernadero con enfoque de agricultura 4.0. *INGENIERÍA INVESTIGA*.

Marín, M. R., Padilla, L. S., & Gómez, J. G. (2016). Sistema De Monitoreo Agrícola Mediante Redes Inalámbricas De Sensores Para El Monitoreo De Variables Ambientales–Sismoagro. Ingeniería al Día.

Herdoíza Diaz, A. H. (2023). Sistema de monitoreo de fertirriego en producción de arándanos en ‘La Delicia’–San José de Chaltura utilizando tecnología IEEE 802.15.4g y SUN-FSK Capa Física (Bachelor's thesis).

Galindo Ruiz, D., Fajardo Téllez, S., & Peña Cano, D. (2022). Agricultura de Precisión y Sistemas basados en IoT: caso de estudio Cannabis medicinal.

Llanos Mena, L. A., & Quelal Paillacho, K. M. (2021). Estudio de factibilidad para la producción y exportación de cultivos de cáñamo en el cantón San Miguel de Urucuquí, provincia de Imbabura, Ecuador.

Castrillón, M., Osorio C. (2021). Monitoreo de temperatura y humedad relativa en un laboratorio de experimentación de cannabis usando tecnologías de IOT.

Alonso, D., Menoni, C., & Saravia, F. (2022). Sistema de monitoreo y control de cultivo indoor de cannabis.

*BH1750FVI DC 5V Digital Light Intensity Sensor Module Stable For Arduino | eBay.* (s/f). Recuperado el 11 de mayo de 2024, de <https://www.ebay.com/itm/274428389040?itmmeta=01HXQVP0N8NGNNMN78S9TK5810&hash=item3fe534e6b0:g:UYQAAOSw-LtfDr6b&itmprp=enc%3AAQAJAAAawD1gP%2FDjDv5kWsS%2FyCKBhyBgkaOwkGKYa5pjFO5RsQb%2FZ0ktaVZ6wMW2gwVL60WYVvQSwAjvH%2BSdpmNoOZDF%2BHuhLpGbyO7WbkI8z9B%2BJyZkjmK2EXJ4gOZ%2FxoOs2ry0lPF%2FiGvUiKGek%2BY4qOgISc6ujJfcqMz9VKDRjIVPUvApXv4FGcH5MTbQ0JKmDwiLnCKuPBRTKX6UxxZVNF8CIp7GIAai0ANSwqP7POFeF4%2FyYaGUckTIA2%2B1kCY6nzYw%3D%3D%7Ctkp%3ABk9SR-qK2PvtYw>

*DS18B20 Waterproof Temperature Sensor Module Probe+Terminal Adapter For Arduino | eBay.* (s/f). Recuperado el 11 de mayo de 2024, de <https://www.ebay.com/itm/325953189563?itmmeta=01HXQR5PX1BA0NFFHVF09KYPWD&hash=item4be452f6bb:g:QAUAASwH9FilyI3&itmprp=enc%3AAQAJAAA4J3oOjDSsEWAz0MUGNL7L8HasSzGKd22QEod7hSpGfsecyDGSN>

cTmqC82kXypF0apQ8r3O8aHzAYVuI%2BpiB%2FAvtG6%2FFua4MY%2F%2B4cLdD1keeFQI1siMkqImvmi5YsnYjRlXdNsAbA8sSYsy9MdDkK9bHtZM6k2AfR0OuyWDe9HD7cAHSX2fY%2B8AzO%2BhczvxlJXjal2D1rCxxujO9kWIT5HJzYs99w8aXVtm%2Fs1LyfHDQ2ywgHS6KwfhJNs4S2193XPuBGAtTITNyO8iP1i5AlQfWMWTMHF%2FWsJMXtVLUe4O1%7Ctkp%3ABFBM5u6W-O1j

- Homegrown Cannabis Co. (2024). *Etapa vegetativa del cannabis: en crecimiento*. <https://leafwell.com/es/blog/etapa-vegetativa-del-cannabis>
- Laverde, J. A., & Laverde, C. G. (2021). Internet de las cosas aplicado en la agricultura ecuatoriana: Una propuesta para sistemas de riego. *Dilemas contemporáneos: Educación, Política y Valores*. <https://doi.org/10.46377/dilemas.v8i2.2542>
- LoRa Alliance. (2022). *LoRaWAN® Regional Parameters RP002-1.0.4 LoRaWAN® Regional Parameters RP002-1.0.4 1 2 NOTICE OF USE AND DISCLOSURE 3 4*.
- Mazón, B. (2023). *Una arquitectura para la recopilación, integración y análisis de información en el contexto de la Internet de las Cosas*.
- MedlinePlus. (2024). *Marihuana*. <https://medlineplus.gov/spanish/marijuana.html>
- Muñoz, P. (2022). *Situación actual para la producción del cultivo Cáñamo (Cannabis sativa) en Ecuador*. UNIVERSIDAD TÉCNICA DE BABAHOYO.
- Ortega, B. (2022). *Manejo del cultivo de cáñamo (Cannabis sativa) para fines medicinales*.
- Palmira, C. (2020). “ANÁLISIS DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE CANNABIS MEDICINAL CON ALTO PORCENTAJE DE CANNABIDIOL”.
- Rodríguez, C. B. (2019). *TRABAJO DE GRADO MONOGRAFIA PRODUCCIÓN DE CANNABIS MEDICINAL COMO MECANISMO DE DESARROLLO ECONÓMICO Y SOCIAL DE LOS CAMPESINOS E INDÍGENAS UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA ESCUELA DE CIENCIAS ADMINISTRATIVAS, CONTABLES, ECONÓMICAS Y DE*.
- Rodríguez, E., & Fontaine, J. (2020). Situación actual de Cannabis sativa, beneficios terapéuticos y reacciones adversas. *Revista Habanera de Ciencias Médicas*, 2020(2020). <https://www.redalyc.org/journal/1804/180465572007/html/>
- Sunoj Valiarambil Sebastian, J., Dong, X., Trostle, C., Pham, H., Joshi, M. V., Jessup, R. W., Burow, M. D., & Provin, T. L. (2023). Hemp Agronomy: Current Advances, Questions, Challenges, and Opportunities. *Agronomy*, 13(2), 475. <https://doi.org/10.3390/agronomy13020475>
- UIT-T. (2012). *UIT-T Rec. Y.2060 (06/2012) Descripción general de Internet de los objetos*. <http://handle.itu.int/11.1002/1000/11830-en>.
- Vallejo, G., & Cuesta, C. (2022). *DISEÑO DE UNA RED LPWAN PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE MEDIDORES INTELIGENTES EN EL CANTÓN SAN CRISTÓBAL, PROVINCIA DE GALÁPAGOS*. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE QUITO.

Vélez, A. (2019). *ARQUITECTURAS DE REFERENCIA PARA IOT CON TRANSFERENCIA SEGURA DE INFORMACIÓN.*

YGC-SM 土壤综合传感器 / 仪谷传感器厂家. (s/f). Recuperado el 15 de mayo de 2024, de <https://www.yigood.net/ygc-sm%E5%9C%9F%E5%A3%A4%E7%BB%BC%E5%90%88%E4%BC%A0%E6%84%9F%E5%99%A8>

## **Anexos**

### **Anexo1. Requerimientos de Stakeholders**

Para elaborar este anexo, se realizó una reunión presencial con los principales interesados en el proyecto para identificar las necesidades y requerimientos técnicos del sistema de monitoreo en el cultivo indoor de cáñamo medicinal (Cherry Oregon Hemp). La reunión se enfocó en analizar aspectos técnicos esenciales para garantizar el éxito del sistema implementado.

#### **Diálogo en la Reunión: Requerimientos Técnicos**

##### **Participantes:**

- **Ing. Fernando Hidalgo:** Asesor técnico especializado en cultivos de cáñamo.
- **Sr. Ismael Castro:** Desarrollador del proyecto.

##### **Requerimientos del Asesor Técnico**

**Pregunta 1:** ¿Qué necesidades específicas busca resolver con el sistema de monitoreo?

**Asesor técnico:** Es indispensable contar con datos en tiempo real para prevenir condiciones adversas que puedan afectar el rendimiento del cultivo, asegurando que todas las variables críticas se mantengan dentro de los rangos ideales para el cáñamo medicinal.

**Pregunta 2:** ¿Qué variables considera esenciales para el desarrollo del cultivo?

**Asesor técnico:** Además de la temperatura y luminosidad, se deben medir el pH del agua, el pH del suelo y los niveles de macronutrientes (nitrógeno, fósforo y potasio), ya que estas variables son determinantes para la absorción de nutrientes y el desarrollo saludable del cáñamo.

**Pregunta 3:** ¿Es fundamental medir el pH del agua y suelo?

**Asesor técnico:** Absolutamente, ya que un pH fuera del rango óptimo puede generar deficiencias o toxicidad en las plantas, afectando el rendimiento del cultivo y la calidad del producto final.

**Pregunta 4:** ¿Qué método prefiere para recibir notificaciones de alertas?

**Asesor técnico:** Las notificaciones en tiempo real mediante Telegram son una opción eficiente y económica para tomar decisiones inmediatas ante cualquier anomalía detectada.

**Pregunta 5:** ¿Cómo prefiere que se presenten los datos en el dashboard?

**Asesor técnico:** Sugiero que los gráficos sean claros y utilicen códigos de color para identificar rápidamente condiciones óptimas, de escasez o críticas de aumento. Esto facilitará la interpretación de los datos y la toma de decisiones.

**Pregunta 6:** ¿Requiere control manual desde el dashboard?

**Asesor técnico:** No considero necesario incluir controles manuales por los costes que representa montarlo.

## **Anexo 2. Desarrollo y Configuración del Sistema**

El diseño y desarrollo del sistema de monitoreo se realizó aplicando una metodología en cascada, estructurando el proyecto en fases claramente definidas para garantizar su éxito técnico.

### **Fase de Identificación de Requerimientos**

El asesor técnico destacó la importancia de monitorear las siguientes variables:

- **Temperatura y luminosidad:** Para optimizar las condiciones del entorno indoor.

- **pH del agua y suelo:** Para garantizar la absorción eficiente de nutrientes esenciales.
- **Niveles de macronutrientes (nitrógeno, fósforo y potasio):** Indispensables para el desarrollo vegetativo del cáñamo medicinal.

### **Fase de Diseño**

El desarrollador propuso el diseño de un sistema basado en nodos de monitoreo distribuidos, para lo cual se propuso que estén conectados mediante tecnología LoRa. Los datos recopilados se almacenan en una base de datos **InfluxDB** y se visualizan en tiempo real mediante un dashboard desarrollado en **Grafana**, con alertas automáticas enviadas a través de **Telegram**.

- Instalación de Servicio Base de Datos de InfluxDB y Grafana

Se presenta el repositorio Github para la instalación de los servicios usados en este trabajo: <https://github.com/ismaelcastrod/Instalacion-de-Servicios.git>

### **Fase de Implementación**

Se instalaron estaciones de monitoreo en puntos estratégicos, equipadas con sensores que miden:

- Temperatura y luminosidad para controlar el factor ambiental interior.
- pH del agua y suelo para garantizar la química adecuada del medio.
- Niveles de nitrógeno, fósforo y potasio para asegurar la nutrición óptima del cultivo.

### **Fase de Verificación**

El desarrollador realizó la evaluación del sistema para validar la precisión de los sensores, la consistencia de los datos y la confiabilidad del sistema. También se verificó que las alertas fueran claras y útiles para los usuarios.

### **Fase de Mantenimiento**

Como sugerencia, el plan de mantenimiento que incluye la calibración periódica de sensores y la revisión del gateway central. Esto garantiza la operación continua y eficiente del sistema en el tiempo.

Con la orientación del asesor técnico, el sistema implementado asegura un monitoreo preciso de las variables críticas para el cultivo de cáñamo medicinal, brindando herramientas confiables para su gestión durante la etapa vegetativa.

### **Anexo 3. Instalación de las Estaciones de Monitoreo**

Se llevó a cabo la instalación de las estaciones de monitoreo dentro del entorno indoor destinado al cultivo de cáñamo medicinal (Cherry Oregon Hemp), asegurando su adecuada ubicación en relación con el Gateway central. Las estaciones fueron colocadas en ubicaciones estratégicas para garantizar una comunicación efectiva, manteniendo una línea de vista directa y despejando la primera zona de Fresnel, optimizando así la transmisión de datos mediante tecnología LoRa.

Cada estación fue equipada con sensores distribuidos en puntos clave del área de cultivo. Los sensores fueron posicionados de manera que proporcionaran datos precisos y representativos del entorno de las plantas:

- El sensor de pH del suelo y macronutrientes se instaló en la proximidad de las raíces para capturar datos precisos de la química del suelo en contacto con las plantas.

- Los sensores de luminosidad fueron posicionados en lugares elevados para registrar la intensidad lumínica recibida en la zona de cultivo de manera homogénea.

Esto aseguró que los datos reflejaran con precisión las condiciones reales en las zonas donde el cultivo está en desarrollo. En las siguientes imágenes se pueden observar los detalles del proceso de instalación:

**Figura 59** *Instalación del sensor YGC-SM para macronutrientes (nitrógeno, fósforo y potasio) y pH de suelo en la Estación de monitoreo 2.*



Esta configuración garantiza que los datos recopilados sean representativos y permitan un monitoreo exhaustivo, facilitando la toma de decisiones en tiempo real para mantener las condiciones óptimas del cultivo.

#### **Anexo 4. Configuración e Implementación de Alarmas**

Para la configuración de las alarmas del sistema, se tomaron como referencia los intervalos establecidos en la Tabla 24, donde se especifican los rangos ideales para las variables ambientales y nutricionales del cultivo. Estas alarmas fueron diseñadas para alertar al usuario de manera inmediata sobre cualquier desviación de los valores óptimos relacionados con la temperatura, la luminosidad, el pH y los niveles de macronutrientes.

El sistema de alarmas fue implementado en la plataforma Grafana, utilizando un esquema de notificaciones visuales basado en códigos de color:

- **Verde:** Indica que las variables están dentro de los rangos óptimos.
- **Azul:** Señala una condición baja a los rangos óptimos.
- **Rojo:** Alerta de que la variable ha superado los valores críticos establecidos.

### Figura 60

*Código de colores para las variables ambientales en Grafana*

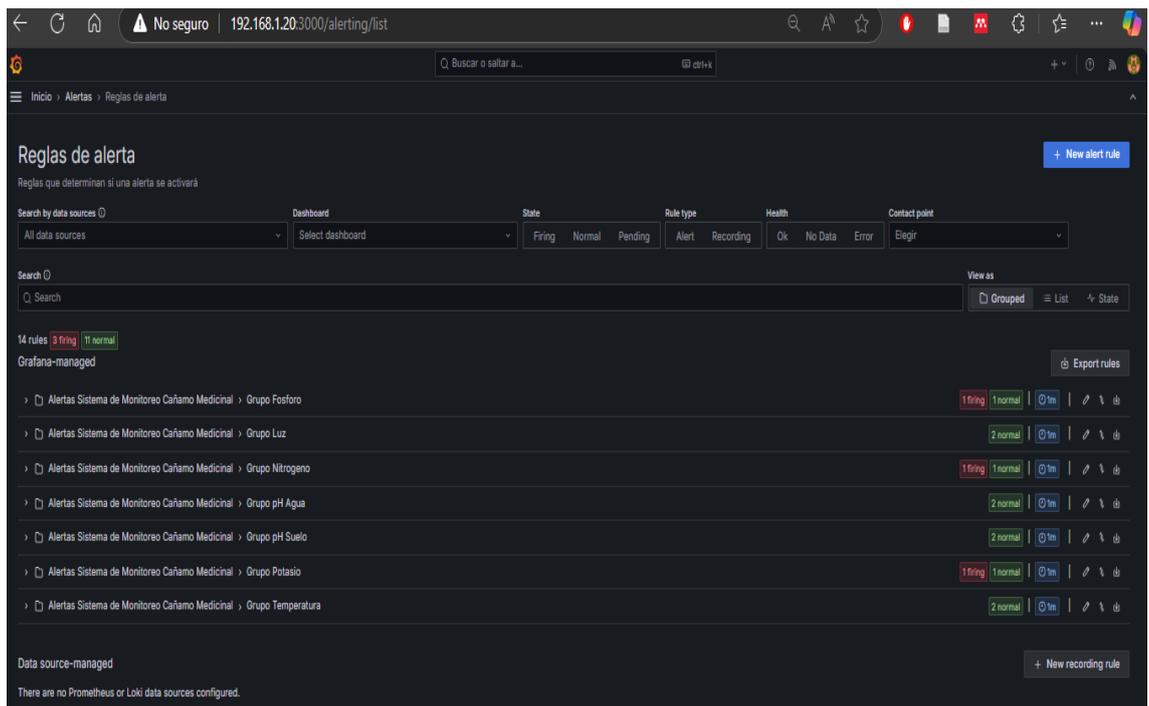


Estas alarmas están configuradas para enviar notificaciones automáticas a través de Telegram, permitiendo a los usuarios recibir actualizaciones inmediatas sobre cualquier anomalía detectada. Esto garantiza que las condiciones del cultivo sean monitoreadas de manera proactiva, facilitando las acciones correctivas necesarias para

preservar el entorno ideal. En la Figura se presenta la configuración de las alertas en Grafana.

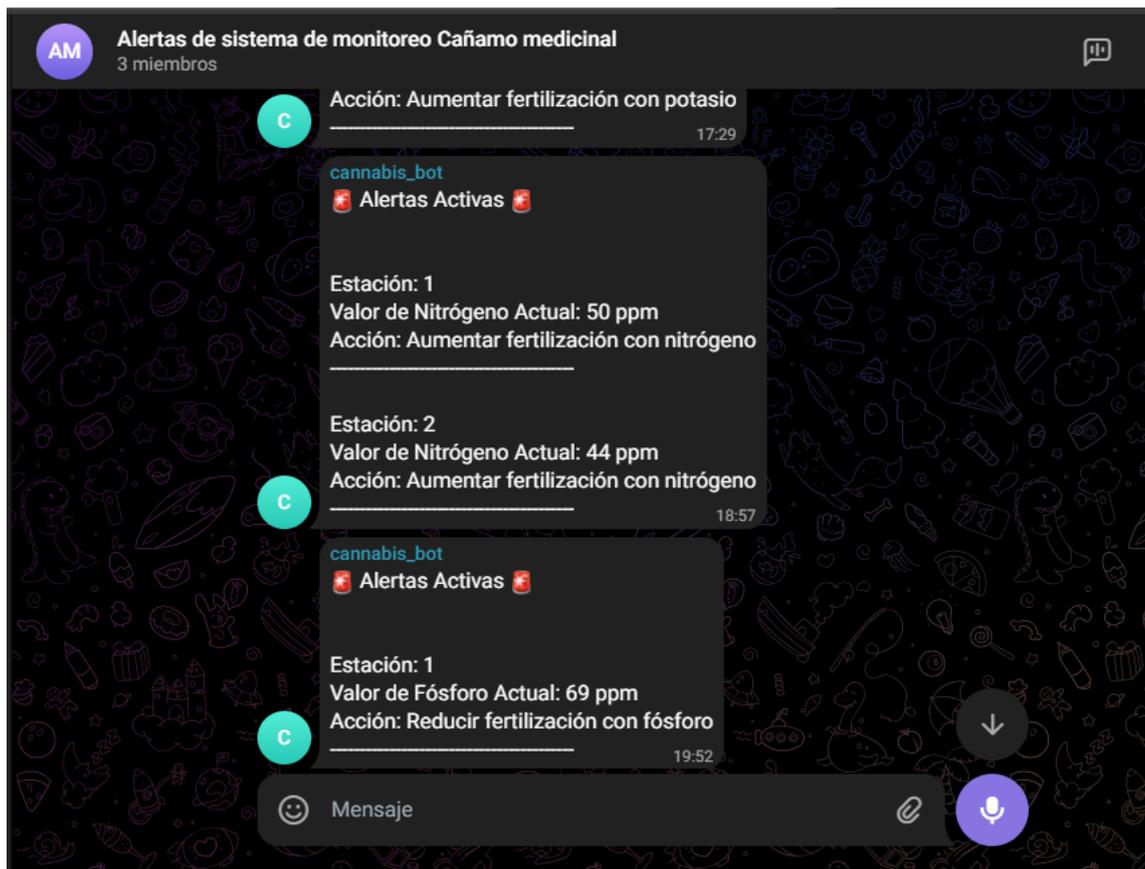
### Figura 61

*Configuración de las alertas para las variables ambientales y nutricionales en Grafana.*



### Figura 62

*Notificación generada y enviada por Telegram alertando sobre un nivel crítico de macronutrientes.*



Este sistema de alertas proporciona a los usuarios una herramienta efectiva para supervisar las condiciones del cultivo en tiempo real, asegurando un entorno controlado y optimizado para el desarrollo del cáñamo medicinal.