



Escuela de Ingeniería
Ingeniería Civil Eléctrica

Sistema de monitoreo de bajo costo para agricultura

Alex Patricio Tapia Caroca
Profesor guía: Daniel Casagrande

Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Eléctrico

Rancagua, Chile
Enero 2024

Índice

1. RESUMEN	1
2. INTRODUCCIÓN.....	2
3. OBJETIVOS Y ETAPAS PRINCIPALES	4
3.1 OBJETIVO GENERAL	4
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS Y/O ACTIVIDADES PRINCIPALES.....	4
3.3 ALCANCES	4
4. MARCO TEÓRICO Y REVISIÓN DE LITERATURA.....	5
4.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	5
4.2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	8
4.3 DEFINICIÓN DE VARIABLES A MONITOREAR	13
4.4 MEDIDAS DE DESEMPEÑO.....	14
5. MARCO METODOLÓGICO	16
6. DEFINICIÓN DE ARQUITECTURAS DE MONITOREO	17
6.1 SISTEMA DE MONITOREO DE BAJO COSTO.....	17
<i>6.1.1 Arquitectura sistema de bajo costo</i>	<i>19</i>
<i>6.1.2 Revisión de plataformas de visualización</i>	<i>20</i>
<i>6.1.3 Desarrollo e implementación de interfaz de visualización en tiempo real</i>	<i>21</i>
<i>6.1.4 Consumo energético</i>	<i>22</i>
<i>6.1.5 Propuesta alimentación fotovoltaica.....</i>	<i>22</i>
<i>6.1.6 Propuesta comunicación de largo alcance</i>	<i>24</i>
6.2 SISTEMA DE MONITOREO DE GAMA COMERCIAL	25
<i>6.2.1 Arquitectura sistema de gama media</i>	<i>26</i>
6.3 SISTEMA DE MONITOREO DE GAMA CIENTÍFICA	26

6.3.1 Arquitectura sistema de gama alta	27
7. INSTALACIÓN Y REGISTRO	28
7.1 CONFIGURACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE BASE DE DATOS.....	28
7.2 INSTALACIÓN DE SISTEMAS DE MONITOREO	31
8. RESULTADOS O SECCIONES TEMÁTICAS	32
8.1 ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS.....	32
8.2 ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE COSTOS DE LOS SISTEMAS DE MONITOREO	35
8.3 DISCUSIÓN	36
CONCLUSIÓN	37
REFERENCIAS.....	40
ANEXOS	44

1. Resumen

El proyecto busca desarrollar un sistema de monitoreo de bajo costo para la agricultura, proporcionando a los agricultores una herramienta de gestión que permita supervisar parámetros clave como temperatura, humedad y niveles de dióxido de carbono (CO₂).

Según información publicada por Odepa en 2018, la superficie de plantaciones frutales en la región de O'Higgins abarca 77.303,2 ha, mientras que los cultivos hortícolas utilizan 10.592,8 ha de terreno, representando un 24,5 y 15,2% del total de los cultivos del país (Rojas Le-Bert, 2018). Por otro lado, de acuerdo con el Diagnóstico territorial de la situación hortícola en la Región de O'Higgins 2017 (Centro de Información de Recursos Naturales, 2017), alrededor de 113,4 ha corresponden a producción en invernaderos. La producción de frutas y hortalizas en ambientes controlados/monitoreados como huertos o invernaderos permite la optimización de recursos, aumento de la productividad y mejora en la calidad del cultivo.

El proyecto se organiza en tres fases. En primer lugar, se realiza una revisión bibliográfica y comercial, donde se indaga acerca de sistemas para la medición de parámetros ambientales. La revisión comercial tiene por objetivo comparar distintos modelos de sensores, microcontroladores disponibles en el mercado local. La segunda fase se centra en el desarrollo e implementación del sistema como tal. Para luego, en la tercera fase, analizar y validar los resultados obtenidos en contraste a sistemas de monitoreo comerciales especializados y una línea base proporcionada por un sistema científico.

Los resultados obtenidos demuestran que el sistema de bajo costo presenta el menor desempeño en comparación a los sistemas comerciales tanto en temperatura como humedad relativa. Sin embargo, sus registros no presentan errores significativos. A pesar de las limitaciones, el prototipo desarrollado cumple con el objetivo planteado, destacando la importancia de la calibración de los sensores para mejorar las mediciones y disminuir el error con respecto a la línea base.

Palabras clave — low-cost, greenhouse monitoring, orchard monitoring, temperature and humidity monitoring

2. Introducción

La agricultura es una de las principales actividades económicas de la sexta región, por lo cual, frente a condiciones climáticas adversas y en continuo cambio, los invernaderos se muestran como una alternativa para mantener el control de ciertas variables que afectan el comportamiento y desarrollo de los cultivos y plantas en general.

Un adecuado monitoreo de las condiciones climáticas al interior del invernadero permite a los agricultores controlar las variables que determinan dichas condiciones, como lo son la temperatura y humedad tanto del suelo como del ambiente. Al hacerlo, se crea un microclima con las condiciones adecuadas para las plantas independiente de las condiciones externas.

La agricultura ha evolucionado significativamente gracias a los avances tecnológicos en términos de monitoreo y control. No obstante, los sistemas de monitoreo y sensores científicos, si bien son altamente efectivos, en términos generales están fuera del alcance de muchos agricultores debido a su elevado precio.

Desde el punto de vista del mercado, este trabajo se inserta en el sector de la agricultura chilena, más específicamente está en el contexto de la producción hortalizas y frutas que representa un aporte relevante para la economía nacional. Efectivamente, durante enero de 2023 se registra un total de exportaciones de fruta de 384 mil toneladas, por un valor de USD 1.622 millones FOB. De este total en valor, 90,4% corresponde a fruta fresca. La fruta fresca alcanza ventas por 330 mil toneladas, equivalente a USD 1.465 millones FOB para enero de 2023. Dentro de las principales especies exportadas en el período de análisis, la cereza registra un volumen de 239.500 toneladas, equivalente a USD 1.219,5 millones FOB (esta fruta representa 83% del total de las exportaciones de fruta fresca en el período de análisis). El principal destino es China (91% del valor de las exportaciones de cereza chilena se enviaron a ese país). Le sigue en importancia el arándano, con envíos por 35.614 toneladas equivalentes a USD 161,3 millones FOB (esta fruta representa 11% del valor total de la fruta fresca exportada), el principal destino fue EE.UU. (42,5%), y Países Bajos (25,1%). En tercer lugar, se encuentra la uva de mesa, con 21 mil toneladas equivalentes a USD 31,38 millones FOB, y donde el principal comprador en este período fue EE.UU. (70%), seguido de Japón (15%) (ODEPA, 2023).

Con base en lo anterior, y en vista de que la región de O'Higgins es un importante centro de producción agrícola en nuestro país, con una significativa extensión de terreno dedicada a plantaciones frutales y cultivos hortícolas. Como una medida para optimizar los recursos, aumentar la productividad y mejorar la calidad de los cultivos, se ha desarrollado un sistema de monitoreo de bajo costo que permitiría a los agricultores supervisar de manera efectiva y en tiempo real parámetros climatológicos de interés como la temperatura y humedad tanto del suelo como del ambiente, además de los niveles de CO₂ en invernaderos y huertos.

Los sensores científicos destacan por su alta precisión, entregando mediciones confiables y reproducibles. Por lo cual, se ha implementado un sistema de monitoreo con sensores de este tipo que, en simultáneo, mide las mismas variables que el prototipo de bajo costo. Los datos recopilados son analizados y comparados con el fin de determinar la precisión y fiabilidad del prototipo desarrollado, las mediciones del sistema científico actúan como línea base o valor real esperado. De esta manera, se busca concluir si la solución llevada a cabo representa una alternativa factible frente a sistemas científicos o comerciales de un valor más elevado.

3. Objetivos y etapas principales

3.1 Objetivo general

- Desarrollar un sistema de monitoreo de bajo costo para agricultura mediante sensores y un microcontrolador para proporcionar a los agricultores una herramienta efectiva de gestión para sus cultivos

3.2 Objetivos específicos y/o actividades principales

- Etapa 1: Identificación de variables, sensores y sistemas de control
 - A1.1 Revisión bibliográfica de sistemas de monitoreo de bajo costo para agricultura
 - A1.2 Revisión de sistemas comerciales para monitoreo de cultivos
 - A1.3 Revisión de sensores y placas de desarrollo disponibles en el mercado local
 - A1.4 Definición de variables a monitorear
 - A1.5 Identificación de sensores y sistemas comerciales apropiados
- Etapa 2: Desarrollo e implementación de prototipo de monitoreo
 - A2.1 Definición de la arquitectura de hardware de los sistemas a implementar
 - A2.2 Desarrollo e implementación del código para cada sensor
 - A2.3 Configuración e implementación de base de datos
 - A2.4 Desarrollo e implementación de interfaz de visualización en tiempo real
- Etapa 3: Registro y análisis de datos
 - A3.1 Instalación de sistema de monitoreo científico, comercial y prototipo de bajo costo
 - A3.2 Registro de datos
 - A3.3 Análisis y comparación de resultados obtenidos con la línea base
 - A3.4 Análisis y comparación de costos de los sistemas de monitoreo

3.3 Alcances

- No se abordarán procesos agrícolas más allá del monitoreo de determinadas variables.
- No se implementarán estrategias de control para las variables escogidas.
- No se abordarán aspectos relacionados con la comercialización o distribución del sistema.

4. Marco teórico y revisión de literatura

4.1 Revisión bibliográfica

La fase de desarrollo de distintas frutas y hortalizas determinan las temperaturas y niveles de humedad óptimas para la planta. Estos son parámetros inversamente proporcionales, mientras que en el día la temperatura se eleva y la humedad disminuye, durante la noche sucede lo contrario (Rodríguez, 1972). Al igual que en la actualidad, para lograr controlar las condiciones internas del invernadero se cuenta con tres métodos o acciones principales: ventilación, calefacción y riego. Tradicionalmente y aún en gran medida actualmente, dichas acciones se realizan de forma manual y no se cuenta con instrumentos sofisticados de medición.

En este contexto de agricultura tradicional, el muestreo de temperatura y humedad relativa puede realizarse con un termohigrógrafo, un instrumento mecánico con un pliego de papel cuadriculado rotatorio sobre el cual se dibujan las variaciones de estos parámetros a lo largo de un día y permite identificar cuándo es necesario regar los cultivos. La calefacción, por otro lado, depende de estufas convencionales de petróleo o gas, de igual forma, se utilizan distintos equipos eléctricos generadores de aire caliente o intercambiadores de calor (Rodríguez, 1972) al interior o adosados a las paredes del invernadero, las cuales son construidas en vidrio o láminas de polietileno. Por último, la ventilación del espacio depende del nivel de apertura de las ventanas frontales o laterales, al igual que de los ductos de ventilación y climatización, los cuales se encuentran en el techo o bajo el piso de la construcción.

Hacia el año 1983, y basándose en estudios previos (Copet & Videau, 1981), (Kozai, 1982), Hoshi & Kozai, miembros de la Facultad de Horticultura en la Universidad Chiba, Japón, presentan un artículo donde describen el diseño de un sistema de control online para invernaderos y la gestión de los cultivos. La instalación diseñada está compuesta por tres subsistemas organizados de manera jerárquica. En primer lugar, se encuentran los subprocesadores ubicados en cada invernadero, los cuales aplican técnicas de control de manera remota y transmiten diariamente la información recopilada por medio de cables de fibra óptica hacia un procesador host. En este punto, se almacenan los datos durante semanas, para finalmente, transmitirlos a un “procesador

core”, encargado de analizar y almacenar la información de los dos dispositivos anteriores (Hoshi & Kozai, 1983).

Durante los siguientes años, el foco de la investigación se centra en incorporar los más recientes avances tecnológicos en cuanto a dispositivos de monitoreo, sensores y procesadores, a los prototipos desarrollados durante la década pasada. El uso de Controladores lógicos programables (PLC, por sus siglas en inglés), programas de simulación, interfaces de control simplificadas, automatización de operaciones, monitoreo en tiempo real y redes de conexiones inalámbricas se vuelve frecuente. Es posible notar la influencia de los nuevos sistemas de comunicaciones, sensores y microcontroladores aplicados al ámbito del monitoreo y control de invernaderos y/o huertos, buscando alternativas más económicas y eficientes para realizar las tareas afines. El monitoreo ya no solo se centra en un único equipo, sino que se da la posibilidad de analizar las condiciones ambientales a través de cualquier dispositivo conectado a Internet y surgen conceptos como Internet de las cosas (IoT), agricultura 4.0, modelos de Deep Learning e inteligencia artificial aplicados al área.

Con base en lo anterior, VidyaSagar en 2012, presenta en su artículo un sistema de monitoreo de temperatura y humedad en invernaderos que utiliza una red de sensores LM45 conectados de manera inalámbrica, al igual que un arreglo de resistencias variables como sensor de humedad del suelo y un microcontrolador PIC 16F877A, a través de los cuales se activan ventiladores o rociadores de agua de acuerdo con las condiciones ambientales internas. A diferencia de los anteriores sistemas de monitoreo presentados, el modelo de VidyaSagar tiene la capacidad de comunicarse directamente a través de SMS con el usuario, enviando mensajes con los datos registrados o alertas sobre las acciones realizadas por los actuadores a través de un módulo GSM (tecnología de segunda generación o 2G) con una tarjeta SIM incorporada (VidyaSagar, 2012).

Un año más tarde, Liu et al. Incorporan el concepto de IoT para referirse a la red de sensores, software y componentes electrónicos conectados a Internet desarrollados para monitorear temperatura, luz, humedad, presión y niveles de CO₂ al interior de un invernadero. El sistema se compone de un conjunto de sensores y actuadores interconectados

inalámbicamente a un microprocesador STM8S103F3, los cuales representan los nodos, que a su vez se conectan a un procesador principal CC2530F256 equipado con una antena que se comunica con un módulo ZigBee CC2530, el cual, junto a un microprocesador Samsung S5PV210 con un módulo GPRS y un puerto ethernet, cumplen la función de Gateway, conectando al sistema a Internet y permitiendo controlarlo de manera remota a través de una interfaz web (Liu et al., 2015).

En 2020, Fuentes et al. plantea que el monitoreo de la fenología de la vid es de vital importancia para planificar correctamente las labores agrícolas asociadas. Sin embargo, las observaciones fenológicas son limitadas y se extrapolan los resultados a todo el campo, sin considerar las variaciones que puede tener el viñedo en distintas zonas. Basándose en lo anterior, desarrollan una red de sensores inalámbrica con comunicación ZigBee de topología estrella para estimar la fenología del viñedo en el periodo de floración y monitorear la variabilidad de la fenología en distintas zonas del campo. La propuesta consiste en crear una red inalámbrica de termohigrómetros DHT22 de bajo costo. El sistema se compone de 7 sensores y un nodo central distribuidos de manera estratégica a lo largo del viñedo además de una estación meteorológica a 300 m del sitio experimental, con el objetivo de comparar las mediciones y estimar el error (Fuentes Peñailillo et al., 2020).

En años más recientes, específicamente 2022, Gomez & Herrera, hacen uso de una tarjeta de desarrollo ESP32-DevKitC de Espressif, la cual actúa como nodo central del sistema y se comunica con tres nodos de sensores mediante tecnología inalámbrica ESP-NOW en una red tipo estrella. La red de sensores se compone de un sensor ultrasónico HC-SR04 que mide el nivel del tanque de agua de riego, un DHT22 de temperatura y humedad relativa y un HW-080 de humedad del suelo. Una vez que se recopilan los datos, estos se envían a Firebase, para finalmente ver las condiciones del invernadero en tiempo real en una aplicación móvil desarrollada en Android Studio. (Gomez & Herrera, 2022)

Se puede apreciar un aumento significativo en el uso de nuevas tecnologías, sensores, microcontroladores, incorporación de IoT y modelos computacionales más complejos para el

monitoreo y control de variables meteorológicas con el objetivo de mejorar la eficiencia de los cultivos a la vez que se utilizan sistemas de bajo costo y alto rendimiento.

La comercialización y distribución de instrumentos de monitoreo de distinta gama en nuestro país se da por parte de distintas empresas. En cuanto a materiales de gama científica enfocados a ciencias agronómicas, forestales y medioambientales, Ambimet LTDA cuenta con más de 20 años en el mercado local proveyendo soluciones profesionales, equipos e instrumentos científicos a distintas empresas, instituciones y universidades. Por su parte, Mouser Electronics, Inc. Es uno de los mayores distribuidores a nivel nacional e internacional de componentes electrónicos y accesorios industriales certificados, ofreciendo una amplia gama de productos dentro de un catálogo actualizado a los más recientes avances tecnológicos.

En cuanto a elementos de gama media o comercial, MCI Electronics ofrece variedad de productos entre los cuales se incluyen componentes electrónicos, equipos, herramientas y kits completos para el desarrollo de proyectos o prototipos variados de manera fácil y rápida. Dentro de su oferta, es posible encontrar marcas como Milesight, Sonoff y Ubidots, enfocadas en productos de control inteligente y automatizado, monitoreo e IoT. Finalmente, para proyectos o prototipos de bajo costo, uno de los distribuidores más recomendados es Afel, tienda online la cual en conjunto con MCI, entregan todo lo necesario para proyectos de laboratorio y electrónica en general, ofreciendo sensores, microcontroladores y accesorios variados para desarrollar proyectos de bajo presupuesto.

4.2 Fundamentos teóricos

4.2.1 Sistema de monitoreo

En el contexto de este trabajo, se entiende como sistema de monitoreo a la estructura de componentes tecnológicos diseñados y dispuestos en conjunto para supervisar de manera continua el estado de un sistema o entorno específico y las variables que lo definen. Las etapas que componen un sistema de monitoreo pueden darse en distinto orden o incluso prescindir de algunas. De acuerdo con diferentes fuentes (Singh & Saikia, 2016; Akkaş & Sokullu, 2017; Haro Vilaña, 2019) las funciones principales que componen un sistema de monitoreo son:

- **Adquisición de datos:** Mediante el uso de sensores, el sistema recopila información importante del entorno en el que se encuentra.
- **Transmisión de datos:** La información recopilada por los sensores es procesada por un microprocesador que recibe los datos mediante conexión por cable o inalámbrica, convirtiendo la información recibida en datos útiles e interpretables.
- **Procesamiento y almacenamiento de datos:** Las mediciones de los sensores generalmente se almacenan en bases de datos, hojas de cálculo o archivos de texto para su posterior análisis. La etapa de procesamiento incluye la transformación de dichos datos mediante funciones o algoritmos para obtener información relevante.
- **Visualización y presentación de datos:** Los datos recopilados son presentados de manera clara para el usuario, usando gráficos, tablas o cualquier otro tipo de representación visual. Esta etapa puede darse una vez que el monitoreo ha terminado o, por el contrario, es posible utilizar herramientas de visualización en tiempo real.
- **Alarmas y notificaciones:** Corresponden a mensajes de texto, correo electrónico o alarmas sonoras que indican sucesos importantes en el sistema monitoreado que pueden o no requerir acción del usuario.
- **Control y acción:** Ciertos sistemas de monitoreo, además de utilizar sensores, incorporan actuadores (motores, ventiladores, relés, etc.) que controlan el valor de las variables medidas en el entorno de monitoreo de acuerdo con condiciones óptimas previamente definidas.

4.2.2 Tipos de sistemas de monitoreo

El objetivo principal de los sistemas de monitoreo, más allá del campo de aplicación, es proporcionar información relevante para la toma de decisiones y/o la detección de anomalías. Los sistemas de monitoreo pueden clasificarse según cómo los sistemas recopilan, transmiten y presentan los datos, al igual que en la frecuencia o intervalos de tiempo con que lo hacen. El campo de estudio definirá el tipo de sistema de monitoreo a utilizar al igual que las variables a medir. No obstante, de acuerdo con los requerimientos de cada usuario, es posible hacer adaptaciones de cada sistema para cumplir con los objetivos solicitados.

- **Sistemas de monitoreo en tiempo real:** Proporcionan información de manera continua e instantánea, tomando acciones de manera inmediata o alertando al usuario ante cualquier eventualidad. De igual forma, los datos medidos son enviados y presentados ante el usuario al instante sin intervalos de tiempo significativos entre cada medición. Sistemas de este tipo son adecuados para el control y/o monitoreo de entornos donde una rápida respuesta es crucial o, por otro lado, cuando el usuario requiere retroalimentación directa del sistema monitoreado en cualquier momento. Son importantes en múltiples áreas y aplicaciones, gracias a que otorgan la habilidad de poder monitorear la eficiencia del sistema analizado, además de poder diagnosticar errores y fallas presentes en estos (Escobar Gallardo & Villazón, 2018).
- **Sistemas de monitoreo intermitente:** Registran datos en intervalos regulares previamente definidos, los cuales pueden ser en el rango de minutos u horas. Sistemas de este tipo están pensados para monitorear entornos por periodos prolongados y donde los cambios en las variables medidas no requieren acciones inmediatas para controlarlas. Asimismo, estos sistemas pueden ser programados para activarse solo bajo ciertas circunstancias y entrar en modos de ahorro de energía cuando el sistema no transmite información, por lo cual, en general poseen mayor autonomía y eficiencia energética.
- **Sistemas de monitoreo distribuido:** Se conforman por un conjunto de nodos dispuestos de manera estratégica en un área determinada para recopilar datos. Cada nodo recoge información de su zona específica y la transmite a otros puntos o directamente al procesador central. Un sistema distribuido es útil cuando se desea obtener información de grandes áreas evitando así extrapolar las mediciones de una zona en específico a todo el campo o sistema estudiado. De igual forma, un sistema distribuido puede ayudar a extender el alcance del sistema de monitoreo (Pérez Valencia & Alvear de La Ossa, 2022).

4.2.3 Sensores

Sensor y transductor son términos utilizados de manera indistinta. Sin embargo, existen diferencias sutiles. Los sensores corresponden a dispositivos que, en contacto directo con una magnitud física, entregan en respuesta una señal, generalmente eléctrica, interpretable por un

sistema (Haro Vilaña, 2019). A diferencia de un sensor, un transductor no está limitado a la detección. Sino que convierte la energía de una forma a otra sin necesariamente medir una variable. De esta forma, todos los sensores son transductores, pero no todos los transductores son sensores. En el marco de este trabajo, se definieron los siguientes tipos de sensores:

Sensores de bajo costo: Los sensores de bajo costo abarcan una amplia gama de aplicaciones y permiten medir distintas magnitudes físicas. Son utilizados en proyectos donde la precisión en las mediciones no es crítica y se prioriza la economía. Sensores de este tipo se utilizan en proyectos de electrónica, prototipos de laboratorio o artículos comerciales de bajo costo. Estos sensores, generalmente, no cuentan con especificaciones técnicas con suficiente amplitud de detalles y carecen en muchos casos, de estudios de calibración que puedan garantizar su correcto funcionamiento (Shadadpuri Goplani, 2018).

Sensores de gama media o comercial: Al igual que el caso anterior, pueden utilizarse en múltiples ámbitos, pero en general suelen ser menos accesibles debido a un costo más elevado justificado por una mayor precisión, robustez y conectividad. Cumplen con mayores estándares de calidad y son utilizados en hogares, empresas e industrias. Cuentan con características como conexión Wi-Fi o LoRa y en muchos casos, dependiendo del fabricante, se utilizan aplicaciones para vincular sensores y ver sus mediciones desde cualquier dispositivo conectado a Internet (Li et al., 2011).

Sensores de gama alta o científica: Están diseñados específicamente para ser utilizados en campos de investigación o industrias en las que se requiere alta precisión y mediciones reproducibles con sensores calibrados. Son desarrollados y distribuidos por empresas certificadas y cumplen con los mayores estándares de calidad en el mercado.

4.2.4 Comunicación inalámbrica

La comunicación inalámbrica puede ser definida como la transmisión de información o tramas de datos entre dispositivos electrónicos mediante la emisión y recepción de señales electromagnéticas a través del aire, sin necesidad de utilizar conexiones físicas, como cables de red o datos.

Wi-Fi: Es una tecnología de red inalámbrica que utiliza ondas de radio para establecer conexiones entre dispositivos electrónicos, permitiendo la transferencia de datos y el acceso a Internet en un área determinada. Se basa en el estándar IEEE 802.11 y se utiliza en hogares, empresas y espacios públicos para proporcionar acceso a Internet e interconectar dispositivos. Las redes Wi-Fi incorporan protocolos de cifrado de datos y autenticación para proteger la integridad y privacidad de los datos transmitidos. Proporciona una cobertura en el orden de los 100 metros, velocidades de transferencia superiores a los 500 MB/s y latencia en el orden de los milisegundos (Wi-Fi Alliance, 2023).

LoRaWAN: Proveniente de Long Range Wide Area Network, LoRaWAN corresponde a un protocolo de comunicación inalámbrica de bajo consumo de energía y largo alcance diseñado para la conexión de “things” en el contexto de IoT. Su bajo consumo de energía lo hace ideal para ser utilizado con baterías y dispositivos remotos, funcionando entre 10 y 15 años sin necesidad de recarga o reemplazo (LoRa Alliance, 2023). Un dispositivo con conectividad LoRa tiene cobertura de hasta 15 Km en condiciones ideales con velocidades de transferencia de hasta 50 kbps y latencia en el orden de los segundos. Por otro lado, un Gateway LoRaWAN tiene la capacidad de conectarse con miles de dispositivos (LoRa Alliance, 2023).

4.2.5 Placas de desarrollo

Una placa de desarrollo es un dispositivo electrónico que, entre otros elementos, cuenta con un microprocesador central, memoria y pines de conexión de entrada y salida integrados en una sola placa de circuito impreso. Están diseñadas para administrar una amplia variedad de tareas en sistemas electrónicos y proyectos que requieran automatización o control (Castro & Osorio, 2011).

El microprocesador es el chip que actúa como núcleo central de procesamiento y tiene por función ejecutar las instrucciones programadas llevando a cabo operaciones aritméticas y lógicas. La memoria corresponde al sistema de almacenamiento de datos e instrucciones de manera temporal o permanente. Existen distintos tipos de memoria en una placa de desarrollo y cada una posee una función determinada e interaccionan con el procesador central de manera distinta, pueden ser volátiles o no volátiles, es decir, que los datos se borran o se conservan

respectivamente una vez que el dispositivo se apaga. Los tipos de memoria más relevantes en una placa de desarrollo son las memorias Flash, SRAM y ROM.

Los pines de conexión son los terminales que permiten integrar fácilmente a la placa de desarrollo elementos o dispositivos externos como sensores, shields, pantallas o actuadores. Cada placa incorpora una determinada cantidad de pines, los cuales a su vez tienen diferentes funciones y características, ya sean de entrada/salida, digitales, analógicos, PWM, de comunicación, alimentación, entre otros (Grupo de Investigación en Sistemas Inteligentes, 2018).

4.2.6 Visualización en tiempo real

La visualización de datos en tiempo real corresponde a la representación gráfica de la información obtenida por los distintos sensores, que se actualiza de manera continua para reflejar los cambios en las variables medidas. Utilizar herramientas de visualización en tiempo real es útil cuando se monitorean sistemas en los cuales la evolución de las variables medidas y el tiempo de respuesta frente a cambios abruptos es fundamental (Wang et al., 2019).

Una aplicación o página web de visualización suele requerir distintos códigos de autenticación que vinculan la placa de desarrollo o sensor a dicha plataforma, los datos son enviados desde el sistema de monitoreo a un Gateway, generalmente mediante algún medio de comunicación inalámbrica y luego a través de Internet hasta llegar a destino. En general, los datos recibidos son presentados en gráficos interactivos, tablas u otro tipo de diagramas y elementos visuales que permiten al usuario comprender de manera clara y ordenada los datos a medida que estos son registrados.

4.3 Definición de variables a monitorear

Debido a la influencia directa de las siguientes variables en el desarrollo y salud de los cultivos y las condiciones del entorno, se han seleccionado como variables de interés. Dichas variables determinan los elementos necesarios para el sistema de monitoreo a desarrollar.

Temperatura ambiente: Un adecuado monitoreo de temperatura permite saber cuándo y cómo ajustar los sistemas de climatización, garantizando un crecimiento óptimo de los cultivos bajo condiciones ideales. Ciertas plagas y enfermedades proliferan a determinadas temperaturas,

por lo cual un adecuado control puede ayudar a prevenirlas. Por otro lado, la temperatura es un factor importante que afecta la calidad y el rendimiento de los cultivos (Yang et al., 2022).

Humedad relativa: Un déficit de humedad relativa puede producir estrés hídrico en los cultivos. La humedad relativa afecta la tasa de transpiración de las plantas, que es el proceso por el cual el agua se mueve en su interior y se evapora de sus hojas, lo cual es un proceso esencial para el transporte de nutrientes. Por otro lado, cuando la superficie de las hojas de las hortalizas tiene una cierta cantidad de vapor de agua, estas se infectan fácilmente por enfermedades fúngicas y bacterianas (Zhang et al., 2022).

Humedad de suelo: El monitoreo de la humedad del suelo hace posible determinar cuándo y cuánto regar, previniendo el riego excesivo o insuficiente. De igual manera, ayuda a utilizar el agua de manera más eficiente, lo que puede ser especialmente importante en áreas donde el agua es escasa. Una cantidad adecuada de humedad en el suelo proporciona al cultivo el agua necesaria para el transporte de nutrientes y el desarrollo de las raíces (Okasha et al., 2021).

CO₂: El CO₂ es un componente clave de la fotosíntesis, el proceso mediante el cual las plantas convierten la luz solar en energía química. Un nivel adecuado de CO₂ puede mejorar la eficiencia de la fotosíntesis y, por lo tanto, el desarrollo de las plantas. Algunos estudios han demostrado que los niveles elevados de CO₂ pueden aumentar el rendimiento de ciertos cultivos, aunque también pueden perjudicar a otros (Bance, 2022). De igual manera, el monitoreo de este compuesto permite saber cuándo es necesario ventilar los invernaderos o ambientes de cultivo.

4.4 Medidas de desempeño

En modelos estadísticos y métodos de aprendizaje el rendimiento de un determinado modelo es evaluado de distintas formas para medir hasta qué punto sus predicciones se ajustan a los valores reales (James et al., 2013). En este contexto, en el caso de las variables de temperatura y humedad relativa, se definen las mediciones del sistema científico como valores reales o línea base, de modo que los valores obtenidos con los demás sensores actúan como predicciones. Dado que no se cuenta con sensores de gama científica para medir las variables restantes, los sensores de gama comercial actúan como línea base en dicho caso.

MAE: El error absoluto medio o MAE por sus siglas en inglés, cuantifica las diferencias absolutas entre dos variables de estudio, una predicha y una real. Proporciona una medida del error entre dos registros sin considerar la dirección o signo de estos. La sumatoria de los errores es dividida por el número de datos, obteniendo así el promedio de los errores absolutos. Se calcula como:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - y'_i| \quad (1)$$

Donde n corresponde a la cantidad de datos, y_i representa el y -ésimo dato real e y'_i es el y -ésimo dato predicho. El valor MAE es siempre no negativo y es de fácil interpretación ya que se encuentra en la misma escala que los datos estudiados. Tener un MAE cercano a cero indica un buen ajuste del modelo predictivo a la referencia (Willmott & Matsuura, 2005).

MSE: El error cuadrático medio o MSE por sus siglas en inglés, es un parámetro que cuantifica el promedio de los errores al cuadrado entre dos series de datos. Se calcula como:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y'_i)^2 \quad (2)$$

El MSE siempre es un valor no negativo que, mientras más cercano a cero indicará un mejor ajuste de las predicciones a los valores reales. Cabe destacar también, que al elevar la diferencia de las mediciones al cuadrado, los errores más significativos amplifican el MSE. Por otro lado, el valor resultante de la métrica no se encuentra en la misma escala que los datos analizados.

RMSE: La raíz del error cuadrático medio o RMSE por sus siglas en inglés no es más que la raíz cuadrada del MSE y su principal diferencia es la interpretabilidad del resultado, ya que el valor final se encuentra en la misma escala que los datos trabajados. De igual manera, penaliza los errores más significativos (Willmott & Matsuura, 2005).

Coefficiente de correlación: Es una métrica que cuantifica la relación lineal entre dos variables. Su valor puede variar entre -1 y 1 , siendo el 0 el valor de correlación más bajo. Coeficientes de correlación cercanos a 1 indican que a medida que una variable aumenta la otra también lo hace y viceversa para el caso de valores cercanos a -1 (ProbabilidadyEstadística.net, 2022). Se calcula como:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x'_i)(y_i - y'_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - x'_i)^2 * \sum_{i=1}^n (y_i - y'_i)^2}} \quad (3)$$

La elección de la o las métricas de desempeño adecuadas dependerá del conjunto de datos con que se trabaje. Si se desea penalizar los errores grandes o valores atípicos dentro de las mediciones, entonces el MSE es un buen indicativo. Por otro lado, si se requiere interpretar la magnitud del error respetando la escala de los datos ingresados, entonces el MAE y RMSE son los adecuados para ello. El coeficiente de correlación indicará si existe algún tipo de relación lineal en las variables analizadas, y el grado de esta relación, ayudando a interpretar las demás métricas calculadas. Las gráficas de series temporales también son un buen indicativo para estimar el desempeño de un sistema de monitoreo. Entre otras cosas, pueden ayudar a determinar la coherencia entre las mediciones observando patrones en la figura, detectar fallas en los sensores en ciertos puntos o valores atípicos que ejemplifican de manera visual los resultados obtenidos en las métricas de error.

5. Marco metodológico

El trabajo realizado busca diseñar e implementar un sistema de monitoreo de bajo costo para agricultura mediante la utilización de sensores y un microcontrolador. Para ello, en primer lugar se definen objetivos, actividades y alcances que enmarcan el proyecto y contribuyen al cumplimiento del objetivo general. Por otro lado, la revisión de literatura contextualiza el trabajo a realizar dando a conocer la evolución de los sistemas de monitoreo de este tipo a lo largo de las últimas décadas. Lo cual a su vez permite además, identificar las variables más importantes que definen el entorno a monitorear, dando paso a una revisión comercial de sensores adecuados, placas de desarrollo y otros sistemas de monitoreo, dentro de los cuales se identifican sistemas de gama media o comercial y sistemas de gama alta o científica.

Habiendo identificado los componentes adecuados para el desarrollo del sistema de bajo costo y la implementación de los modelos alternativos de distinta gama. Se define la arquitectura de cada sistema, donde destacan elementos como la configuración de sus componentes, transmisión de datos, almacenamiento, visualización y funcionamiento en general. En el caso específico del prototipo desarrollado se describen alternativas disponibles para la visualización y

almacenamiento de datos, así como la configuración de dichas funcionalidades. De igual forma, se calcula el consumo energético y se proponen alternativas de suministro eléctrico mediante energía solar y comunicación a larga distancia.

Habiendo configurado la estrategia de envío y almacenamiento de datos en los tres modelos de monitoreo, la instalación de los tres sistemas de monitoreo se lleva a cabo en simultáneo en las dependencias de la Fábrica Digital O'Higgins. En este punto, se realizan las mediciones de las variables definidas para posteriormente proceder al análisis, comparación y discusión de resultados en base a gráficas y distintas métricas de error para así concluir y determinar la efectividad del sistema desarrollado en comparación a modelos de gama media y alta.

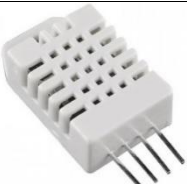
6. Definición de arquitecturas de monitoreo

La elección de las variables de interés ha determinado los sensores necesarios para su monitoreo. A continuación, se muestran los componentes de distinta gama adecuados y necesarios para implementar los distintos sistemas de medición. Se detallan características generales de cada elemento y aspectos técnicos como rangos de medición, precisión y resolución.

6.1 Sistema de monitoreo de bajo costo

AM2302 (DHT22): Es un sensor digital de temperatura y humedad relativa que ofrece buenos niveles de precisión y resolución por un bajo costo y características mejoradas respecto a otros sensores de igual gama como los DHT11. Envía datos mediante una señal digital de voltaje codificada en cadenas de 40 bits en periodos de dos segundos. El valor High depende directamente del suministro de voltaje de entrada, mientras que Low corresponde a GND.

Tabla 1: Especificaciones técnicas sensor AM2302

Sensor	Entrada	Rango	Precisión	Resolución	
AM2302	3,3 ~ 5,5 V	-40 ~ 80 °C 0 ~ 100% HR	T: +/- 0,5 °C HR: +/- 2%	T: 0,1°C HR: 0,1%	

AM2315C: Es un sensor de temperatura y humedad relativa de alta precisión, calibrado de fábrica, con salida digital e interfaz de comunicación I2C. Los valores Low de la señal digital

son como máximo de 0,4 V. Mientras que un valor High corresponde como mínimo a un 70% del valor del voltaje de entrada.

Tabla 2: Especificaciones técnicas sensor AM2315C

Sensor	Entrada	Rango	Precisión	Resolución	
AM2315C	2,2 ~ 5,5V	-40 ~ 80 °C 0 ~ 100% HR	T: +/- 0,3°C HR: +/- 2%	T: 0,01°C HR: 0,024%	

ESP32 DevKit V1: Su conectividad, bajo costo y consumo de energía, convierten a esta placa en una muy buena opción para proyectos de IoT. Posee 25 pines GPIO multipropósito con tensión de entrada de 3,3 V, 15 canales de entrada ADC y 2 canales de salida DAC con resolución de 12 bits, 25 salidas PWM, 9 entradas touch además de los pines de suministro de energía y comunicación SPI, I2C e I2S. El proyecto en cuestión requiere de 12 pines, 2 GPIO, 4 de alimentación y 6 para comunicación. Dado que la alimentación de los periféricos proviene directamente de la salida de 3,3 V incorporada en la placa, no se requiere de un circuito de adecuación de señales.

Tabla 3: Especificaciones técnicas placa de desarrollo ESP32 DevKit V1

Placa	Chip	Memoria	Conectividad	
ESP32 DevKit V1	Dual core Tensilica Xtensa LX6 32 bits, frecuencia de reloj hasta 240 MHz	4 MB Flash, 520 KB SRAM, 448 KB ROM	ESP-NOW, Bluetooth v4.2 + BLE, Wi-Fi 802.11b/g/n (2.4 GHz) con velocidad de transferencia de hasta 150 MB/s	

Sensor capacitivo de humedad de suelo V1.2: Este módulo incorpora dos electrodos que permiten medir la humedad del suelo entregando una salida analógica entre 0 y 3 V basada en la variación de la capacitancia entre ellos, la cual cambia en función de la cantidad de agua presente en la superficie.

Módulo microSD: Da la posibilidad de integrar tarjetas de memoria de tipo microSD u otras con su respectivo adaptador para leer y escribir datos. La utilización de este dispositivo permite almacenar los registros de los sensores sin necesidad de conexión a Internet.

CCS811: Este sensor digital de gases detecta una amplia gama de compuestos orgánicos volátiles (TVOC). El modelo CCS811 no mide CO₂ directamente, sino que utiliza un algoritmo para calcularlo a partir del contenido de TVOC. Su rango de medidas para CO₂ es 400/8192 ppm. Requiere 48 horas de calibración desde su iniciación antes de obtener medidas precisas. Se alimenta con un voltaje entre 1,8 y 3,3 V. Su salida digital Low es como máximo de 0,6 V. Mientras que un valor High corresponde como mínimo a la diferencia $V_{in} - 0,7$ V.

6.1.1 Arquitectura sistema de bajo costo

El sistema de monitoreo de bajo costo corresponde a una solución basada en IoT con un único nodo que mide y envía datos en periodos de 15 minutos. El nodo de registro de datos incorpora una placa de desarrollo ESP32 DevKit V1, montada sobre una placa de pruebas, que actúa como procesador central y coordina tanto la adquisición como la comunicación de los datos recopilados. Dos sensores de temperatura y humedad relativa modelos AM2302 y AM2315C son los encargados del monitoreo del clima, mientras que un sensor capacitivo de humedad de suelo permite conocer el porcentaje de agua presente en el terreno a la vez que el módulo CCS811 obtiene mediciones aproximadas de los niveles de CO₂ para así determinar la calidad del aire. De igual forma, se integra un módulo microSD para el almacenamiento local de los registros. La transmisión de datos entre el sistema de monitoreo y las plataformas de visualización y almacenamiento se realiza por medio de conexión Wi-Fi. Se incorpora un regulador de voltaje Step Down DC-DC que reduce la tensión de entrada a 5 V para un suministro estable de energía, lo cual permite la conexión del sistema a la red principal por medio de un cargador-transformador o un arreglo de baterías de mayor voltaje.

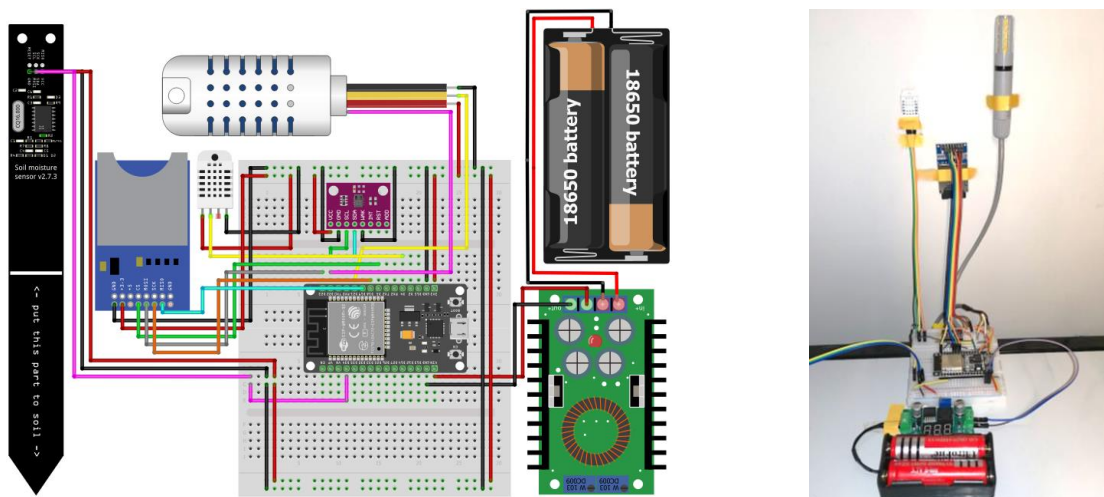


Fig. 1 – Nodo de registro de datos.

6.1.2 Revisión de plataformas de visualización

Blynk: Permite la creación de paneles de control y visualización de datos en tiempo real tanto en su plataforma web como aplicación móvil. Es una plataforma en la nube que da a los usuarios la posibilidad de controlar y monitorear dispositivos de manera remota a través de Internet con una interfaz simplificada. Es compatible con una gran variedad de placas de desarrollo, ya que solo requiere conexión Wi-Fi. En su versión gratuita permite solo 2 dispositivos, 5 usuarios, uso de widget básicos tanto en la versión web como móvil, 3 plantillas con 10 widget cada una y una semana de almacenamiento de datos. Para características mejoradas sus planes individuales comienzan desde \$6,99 USD/Mes.

ThingSpeak: Es una opción popular para proyectos de IoT en los que se necesite recopilar y visualizar datos de sensores en tiempo real, realizar análisis de datos y tomar medidas basadas en la información recopilada. Al ser una plataforma desarrollada por MathWorks, se integra de buena manera con MATLAB para el posterior análisis de los datos recopilados. Dentro de las limitaciones del plan gratuito están el envío de 3 millones de mensajes al año, 4 canales e intervalo mínimo de actualización de datos de 15 segundos, para acceder a más características los planes para estudiantes comienzan desde \$45 USD/Año.

Grafana: Es una plataforma de código abierto utilizada para la visualización y el análisis de datos en tiempo real. Es utilizada en el campo de la monitorización y visualización de sistemas, aplicaciones y servicios. Permite crear una gran variedad de paneles de control y conexión a

múltiples fuentes de datos. En su plan gratuito permite almacenar hasta 50 GB de registros mensualmente para 3 usuarios, incluye plugins y retención de datos por 14 días. El plan pro comienza en un valor de \$29 USD/Mes, no obstante su versión gratuita es suficiente para la mayoría de las aplicaciones de baja escala.

6.1.3 Desarrollo e implementación de interfaz de visualización en tiempo real

Se optó por utilizar dos plataformas de visualización. Blynk, por un lado, ofrece un dashboard web sencillo, personalizable y fácil de implementar. De igual forma, su aplicación móvil es gratis y permite al usuario ver las condiciones del ambiente monitoreado en su smartphone y desde cualquier sitio con conexión a Internet. Por otra parte, se utiliza ThingSpeak para hacer uso de su función de registro de datos, característica que Blynk solo incluye en sus planes de paga.

La configuración de las interfaces de visualización requiere en primer lugar las librerías de cada plataforma al igual que conexión Wi-Fi. De igual manera, la creación de cada canal de transmisión de datos tiene asociado uno o varios códigos de autenticación, los cuales son necesarios para comunicar el sistema de monitoreo con la herramienta de visualización. Una vez que se establece conexión Wi-Fi y se ha iniciado la comunicación con ambas plataformas, se ejecutan las funciones de registro de datos definidas anteriormente y se envían las mediciones a cada canal de destino para su escritura, visualización y almacenamiento.

En el caso de Blynk, el procedimiento consiste en crear una nueva plantilla, definir las variables de monitoreo especificando entre otras cosas el tipo de dato, unidad de medida y valores mínimos y máximos. Luego de la creación de la plantilla y definición de variables, se generan 3 códigos de autenticación que serán necesarios para enviar los datos desde el sistema de monitoreo.

El código implementado en la placa de desarrollo utiliza la librería de Blynk diseñada para ESP32, la cual simplifica la transmisión. Una vez que todo se ha guardado y ejecutado, solo resta diseñar el dashboard web y móvil para la visualización de los datos enviados. La implementación del canal de transmisión en ThingSpeak no presenta mayor diferencia. Los dashboard web y móvil de ambas plataformas se pueden apreciar en los Anexos [1](#) y [2](#) respectivamente.

6.1.4 Consumo energético

Basándose en las especificaciones técnicas dadas en la hoja de datos de cada elemento presente en el circuito, es posible estimar el consumo energético aproximado del sistema.

Tabla 6: Consumo energético sistema de bajo costo

	Voltaje operación [V]	Consumo [mA]
ESP32 DevKit V1 + WiFi	3,3	≈200
AM2315C	2,2 – 5,5	10
AM2302 (DHT22)	3 – 5,5	1,5
Sensor capacitivo humedad de suelo	3,3 – 5	5
Módulo microSD	4,5 – 5,5	80
CCS811	1,8 – 3,3	30

Al realizar mediciones utilizando un multímetro se pudo comprobar que el consumo de corriente real del sistema alimentado a 5 V es de 160 mA al momento de enviar datos vía WiFi, mientras que en el intervalo de 15 minutos entre cada medición, el consumo se ve reducido a solo 100 mA.

La utilización del sensor CCS811 supone un consumo de energía adicional ya que es incompatible con modos de ahorro de energía. Este dispositivo debe ser iniciado por única vez previo al muestreo de datos ya que requiere un tiempo de calibración de 48 horas, luego de las cuales ofrece mediciones precisas. Los modos de ahorro de energía Lightsleep o Deepsleep reinician el sistema constantemente luego de los periodos de reposo, por lo cual el sensor entraría en un bucle de calibración indefinido entregando medidas erróneas en cada iteración.

6.1.5 Propuesta alimentación fotovoltaica

Utilizando las fórmulas proporcionadas por Brokering & Palma (Brokering & Palma, 2018) se dimensiona un sistema fotovoltaico para energizar el sistema. En el apartado anterior se determinó que el consumo de corriente es de 160 mA en estado activo y 100 mA en el intervalo de espera. Para efectos del cálculo se ha utilizado solo el valor activo, por tanto, el sistema funciona con 160 mA a 5 V, es decir, una potencia $P = 0,8 \text{ W}$.

El tiempo de uso es de 24 horas, por lo cual la energía diaria utilizada viene dada por:

$$E = P \times t = 0,8 \text{ W} \times 24 \text{ h} = 19,2 \text{ Wh}$$

La capacidad necesaria del banco de baterías para cargas de corriente continua viene dada por el cociente entre el consumo de la carga CC y el voltaje del sistema:

$$C = \frac{\text{Consumo CC}}{V_{cc}} = \frac{19,2 \text{ Wh}}{5 \text{ V}} = 3,84 \text{ Ah}$$

El sistema está dimensionado para tener una autonomía de 2 días. Por lo tanto, la capacidad del banco de baterías aumenta de manera proporcional al número de días de autonomía:

$$C' = C \times \text{días autonomía} = 7,68 \text{ Ah}$$

Aplicando un factor de descarga máxima del 50% con el objetivo de extender la vida útil de las baterías, se tiene que la capacidad total del banco es:

$$C'' = \frac{C'}{\text{factor descarga max}} = \frac{7,68 \text{ Ah}}{0,5} = 15,36 \text{ Ah}$$

Por último, la cantidad de baterías a utilizar conectadas en serie y paralelo viene dada por:

$$N_{\text{par}} = \frac{C''}{\text{Capacidad nominal batería}} = \frac{15,36 \text{ Ah}}{6800 \text{ mAh}} = 2,259 \approx 3$$

$$N_{\text{ser}} = \frac{C''}{V_{cc}} = \frac{15,36 \text{ Ah}}{5 \text{ V}} = 3,072 \approx 3$$

De este modo, se determina que son necesarias 9 baterías 18650 de 6800 mAh.

Se ha seleccionado un panel fotovoltaico CcLamp de 8W, 6V y 1,3A. Para determinar el número de paneles a utilizar, en primer lugar se debe determinar la corriente peak, la cual viene dada por la división entre el consumo diario del sistema C, la eficiencia de la batería y las horas sol peak (HSP) del mes con menor radiación solar. Haciendo uso del explorador solar, herramienta proporcionada por el Ministerio de Energía (Ministerio de Energía de Chile, s.f.), es posible verificar que en la Región de O'Higgins junio es el mes con menor radiación, con valores que oscilan entre 2 y 3 [kWh/m²/día].

Asumiendo una eficiencia de batería del 80%, la corriente peak se determina como sigue:

$$I_{\text{peak}} = \frac{C}{\frac{\text{eficiencia batería}}{\text{HSP}}} = \frac{3,84}{\frac{0,8}{2}} = 2,4 \text{ A}$$

El número de paneles en serie y paralelo se calcula como:

$$N_{\text{par}} = \frac{I_{\text{peak}}}{I_{\text{panel}}} = \frac{2,4 \text{ A}}{1,3 \text{ A}} = 1,84 \approx 2$$

$$N_{ser} = \frac{V_{cc} \text{ sistema}}{V_{panel}} = \frac{5 \text{ V}}{6 \text{ V}} = 0,83 \approx 1$$

Por último, se calcula la corriente mínima que debe soportar el controlador de carga. Aplicando un factor de seguridad de 1,25 el valor de la corriente es:

$$I_{regulador} = I_{cc} \times N_{par} \times FS = 1,3 \times 2 \times 1,25 = 3,25 \text{ A}$$

Se propone la utilización de un módulo cargador protector BMS 2S modelo HX-2S-JH20 con corriente de operación máxima de 10 A.

6.1.6 Propuesta comunicación de largo alcance

La utilización de un sistema de monitoreo cuyo único medio de conexión inalámbrica es una red Wi-Fi supone una desventaja frente a ambientes remotos. Si bien existen dispositivos para extender el alcance de la red, estos pueden ser costosos y la cobertura extra proporcionada en la mayoría de los casos no será suficiente. Ante esto, existen distintas alternativas que permiten conectar el sistema a Internet de manera directa o indirecta, con el objetivo de registrar y visualizar datos.

Internet satelital: Si bien corresponde a la alternativa más costosa en términos económicos, también es la más eficaz. La contratación de un servicio de Internet satelital permite conectividad en zonas remotas y de difícil acceso donde las operadoras convencionales no disponen de cobertura.

Dispositivos GSM/GPRS: Para ambientes de monitoreo más accesibles y con cobertura de redes de telefonía e Internet móvil, la utilización de dispositivos tales como la placa de desarrollo Arduino MKR 1400, ESP32 TTGO T-SIM7000G o shields GSM/GPRS pueden suponer una solución en términos de conectividad y otras funcionalidades. Mediante el uso de una tarjeta SIM en uno de estos módulos el sistema de monitoreo tendrá la capacidad de enviar/recibir mensajes de texto, además de conectarse a Internet para subir las mediciones a cualquier servidor en la nube.

Conexión LoRa: La utilización de shields LoRa o placas de desarrollo que incorporan este medio de comunicación, permite la transmisión de datos a distancias de hasta 15 Km en condiciones ideales entre distintos nodos. Debido a características como conectividad LoRa y Wi-Fi, la placa de desarrollo Heltec Wireless Stick Lite es una opción adecuada para sistemas de monitoreo de bajo costo. Al utilizar dos placas de este modelo es posible realizar una conexión

punto a punto entre un nodo de registro de datos y un nodo central conectado a Internet. Lo cual es ideal para ambientes de monitoreo remotos o sin conexión directa a la red.

6.2 Sistema de monitoreo de gama comercial

Dragino LHT65N: Corresponde a un dispositivo con un sensor interno de temperatura y humedad relativa el cual posee un puerto adicional disponible para conectar un tercer sensor externo, además del sensor modelo SHT20 que alberga en sus interior, incorpora un sensor de temperatura externo modelo DS18B20 de amplio rango y buena resolución. Está equipado con una batería de 2400 mAh que, dependiendo de los periodos de muestreo y condiciones ambientales, posee una vida útil de hasta 10 años. Incorpora un sistema de almacenamiento de respaldo y utiliza comunicación LoRaWAN clase A en la banda de frecuencia de 915 MHz.

Tabla 4: Especificaciones técnicas sensor Dragino LHT65

Sensor	Rango	Precisión	Resolución	
Dragino LHT65	TI: -40 ~ 80 °C HR: 0 ~ 99,9 % TE: -55 ~ 125 °C	TI: +/- 0,3 °C HR: +/- 3 % TE: +/- 0,5 °C	TI: 0,01 °C HR: 0,04 % TE: 0,0625 °C	

Dragino SE01-LB: Este es un sensor diseñado para la agricultura IOT, es capaz de medir de manera eficiente la humedad, temperatura y conductividad del suelo para posteriormente transmitir los datos a larga distancia usando comunicación LoRaWAN clase A. Posee Bluetooth para configurar el dispositivo de manera remota a través de un celular y al igual que modelos anteriores, posee una carcasa impermeable con certificación IP67 y una batería de 8500 mAh de larga duración.

Tabla 5: Especificaciones técnicas sensor SE01-LB

Sensor	Rango	Precisión	Resolución	
Dragino SE01-LB	T: -40°C ~ +85 °C H: 0 ~ 100 % C: 0 ~ 20000 µS/cm	T: +/- 0,3 °C H: +/- 3 % C: 2% FS	T: 0,01 °C H: 0,01 % C: 1 µS/cm	

Milesight UG67 LoRaWAN Gateway: Este dispositivo es el encargado de transmitir los mensajes desde los distintos sensores hasta TTS (The Things Stack). Está equipado con el chip

LoRa SX1302 y una CPU de cuatro núcleos de alto rendimiento, permite conectar más de 2.000 nodos en un radio de 15 km en entornos ideales y 2 km en entornos urbanos (Milesight, s.f.).

6.2.1 Arquitectura sistema de gama media

El sistema implementado utiliza un Gateway Milesight UG67 conectado a la red mediante cable ethernet en las dependencias de la Fábrica Digital O'Higgins en conjunto con dos sensores LoRa marca Dragino, un LHT65N de temperatura y humedad, además de un SE01-LB de temperatura, humedad y conductividad de suelo. Ambos sensores se conectan al Gateway de manera inalámbrica utilizando el protocolo LoRaWAN a la vez que envían sus registros en intervalos de 15 minutos.

Los datos son transmitidos desde el Gateway a la plataforma TTS, la cual se interconecta con Node-RED, que a su vez decodifica y retransmite la información hacia InfluxDB, una base de datos en línea. Finalmente, desde este punto, se realiza una conexión entre la base de datos y Grafana para la visualización de las mediciones.



Fig. 2 – Sistema de monitoreo de gama media.

6.3 Sistema de monitoreo de gama científica

Campbell Scientific T-107: Este sensor es un dispositivo de medición de temperatura diseñado para aplicaciones de monitoreo y control ambiental especializado. Ofrece una gran precisión incluso bajo condiciones ambientales adversas, no requiere calibración y es de bajo consumo energético.

Tabla 6: Especificaciones técnicas sensor T-107

Sensor	Rango	Precisión
Campbell Scientific T-107	-35 ~ 50 °C	(0 ~ 50 °C) ±0,2 °C

Vaisala HMP60: El sensor Vaisala HMP60 es un dispositivo de medición de humedad relativa y temperatura diseñado para aplicaciones de monitoreo y control ambiental especializado. Ofrece una gran precisión bajo distintas condiciones, lo cual se especifica en su hoja de datos, no requiere calibración, es de fácil instalación y de bajo consumo energético.

Tabla 7: Especificaciones técnicas sensor HMP60

Sensor	Rango	Precisión Temperatura	Precisión Humedad Relativa	
Vaisala HMP60	40~60°C 0~100%RH	(10~30 °C) ±0,5 °C (-40~10°C)/(30~60°C) ±0,6 °C	(0~40°C) ±3 %RH (0~90 %RH) (-40~0°C)/(40~60°C) ±5 %RH (0~90 %RH)	

Campbell Scientific CR300 Datalogger: Utilizado tanto en investigación científica como en monitoreo ambiental e industrial, el CR300 corresponde a un Datalogger multipropósito que permite conectar y registrar datos de una gran variedad de sensores disponibles en el mercado. Es posible programarlo de acuerdo con necesidades específicas y permite descargar los datos registrados para su posterior análisis.

6.3.1 Arquitectura sistema de gama alta

El sistema de monitoreo científico actuará como línea base de medición de temperatura y humedad, registrando los valores de dichas variables a través de los sensores HMP60 de Vaisala y T-107 de Campbell Scientific y almacenando las mediciones en un Datalogger CR300 de la misma marca. Al igual que los dos sistemas anteriores, el periodo de registro de datos es de 15 minutos. Por su parte, el sistema de monitoreo de gama científica utiliza el software LoggerNet para su programación y uso. Requiere de una computadora a la cual conectar el Datalogger y configurar el programa de monitoreo, para posteriormente conectar sensores y registrar sus mediciones. Este sistema no requiere conexión a Internet ni alimentación eléctrica desde la red principal, ya que es capaz de registrar sus mediciones en su sistema de almacenamiento interno y la energía requerida para su funcionamiento es suministrada por una batería. El diagrama de conexiones generado por LoggerNet se encuentra disponible en el [Anexo 3](#).



Fig. 3 – Sistema de monitoreo de gama científica.

7. Instalación y registro

7.1 Configuración e implementación de base de datos

El almacenamiento de los datos registrados por los distintos sensores es una etapa crucial para el desarrollo del proyecto. Permite analizar posteriormente y con herramientas más avanzadas el comportamiento de los diferentes sistemas de monitoreo para así identificar diferencias en las medidas y variaciones climatológicas en el ambiente estudiado.

En cuanto al sistema de monitoreo de bajo costo, se implementaron tres estrategias de almacenamiento de datos. En primer lugar, además de ofrecer herramientas de visualización en tiempo real, la plataforma ThingSpeak permite registrar y exportar los resultados en formatos json, xml o csv. Por otro lado, y como respaldo de la primera opción, se implementó por medio de Apps Script de Google una conexión entre el sistema y Google Spreadsheet para registrar tanto las mediciones como la fecha y hora de cada una. El código de esta implementación se encuentra disponible en el [Anexo 4](#). Finalmente, dado que las dos primeras opciones requieren de conexión a Internet, se utilizó un módulo microSD que guarda los registros de cada sensor en un archivo de texto tabulado de manera local.

El envío de datos de forma secuencial hacia Google Spreadsheet se hace a través de una conexión mediante el protocolo TCP y solicitudes usando el protocolo HTTP. Se incluye el identificador único de la hoja de cálculo a utilizar así como el servidor al que se harán solicitudes mediante la función GET usando una url dinámica, la cual se actualiza constantemente de acuerdo con las mediciones de cada sensor. Finalmente, una vez que se estableció la conexión Wi-Fi, se miden las variables de interés y se envían los datos a las distintas plataformas. El código completo del programa utilizado se encuentra disponible en el [Anexo 5](#).

Los sensores de gama comercial utilizados en el proyecto incorporan conectividad LoRa, por lo cual, en primer lugar, se requiere de un Gateway LoRaWAN que reciba los datos y los suba a un servidor en la nube. Dicho dispositivo debe ser registrado previamente usando los códigos de autenticación únicos de cada equipo en The Things Stack, una red global que comunica dispositivos de IoT mediante el protocolo LoRaWAN desarrollada por The Things Industries.

Una vez que se ha registrado la puerta de enlace, se procede a crear una nueva aplicación. Este apartado será el encargado de almacenar la configuración de los distintos sensores asociados a cada proyecto, así como también las mediciones de cada dispositivo de manera temporal. Cabe destacar que la carga útil de los mensajes recibidos por el canal de transmisión se codifica en formato CBOR (Concise Binary Object Representation), por lo cual, para términos de visualización y almacenamiento de las mediciones, se requiere decodificar dicha información a un formato comprensible por el usuario.

Una de las ventajas de utilizar plataformas como TTS es la posibilidad de integrar una gran variedad de aplicaciones externas, las cuales son útiles al momento de trabajar los datos. En específico, se ha utilizado el protocolo MQTT para interconectar con Node-RED el canal creado, con el objetivo de decodificar y retransmitir los mensajes hacia otras plataformas.

El protocolo MQTT (Message Queue Telemetry Transport) es ampliamente utilizado en el campo de IoT debido a su eficiencia en el uso de recursos, lo cual lo hace adecuado para utilizar en redes de baja potencia. Los mensajes MQTT se envían desde un *broker* o nodo central hacia los clientes, utilizando el *topic* como identificador de destino (Mahedero Biot, 2020).

Por otro lado, Node-RED es una plataforma de programación basada en flujos enfocada en simplificar el diseño, administración e interconexión de sistemas. Su interfaz permite asignar funciones a distintos nodos y crear flujos de trabajo definiendo la interacción entre ellos. Los nodos a su vez presentan, entre otras cosas, entradas de datos para realizar procesamiento, integración de servicios externos y salidas que definen la secuencia de tareas a realizar. La interfaz de Node-RED utilizada en este proyecto corre sobre una computadora ubicada en la Fábrica Digital O'Higgins que actúa como servidor.

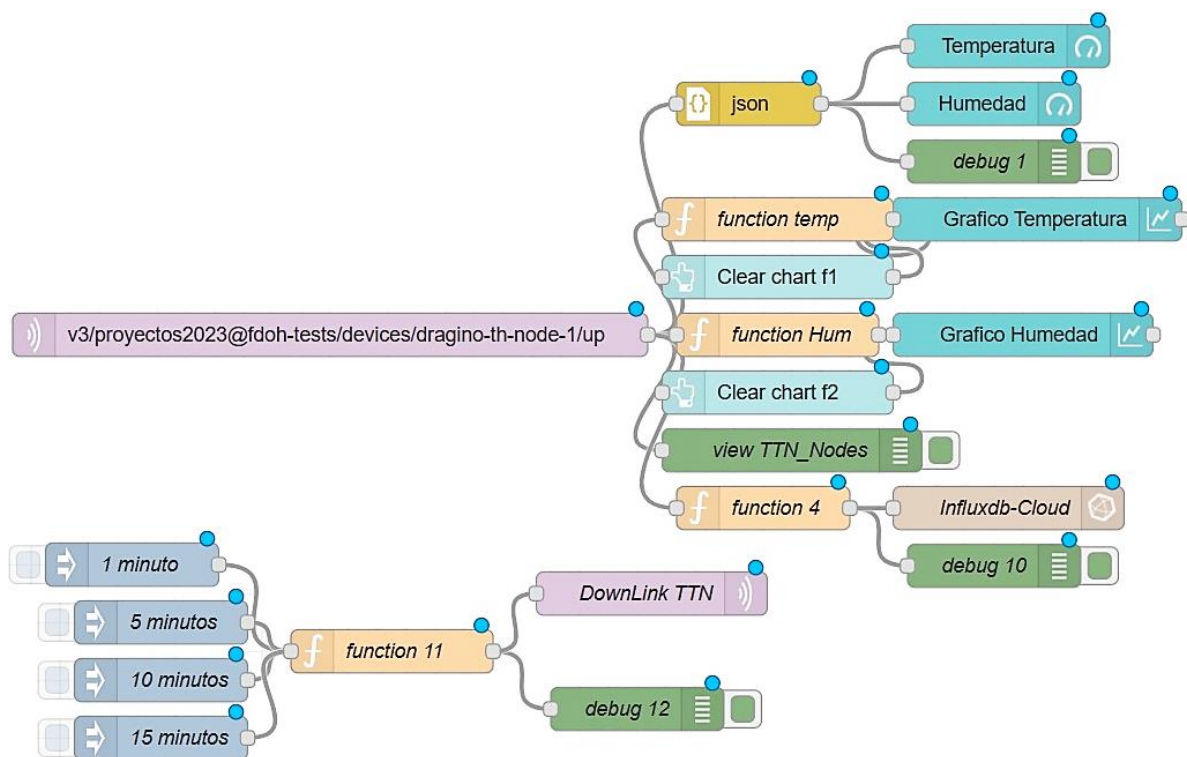


Fig. 4 – Flujo de datos TTS / Node-RED

Dentro de la plataforma de Node-RED, se integra un nodo de entrada MQTT que, usando las credenciales de TTS, comunica ambas plataformas para el intercambio de información. En este punto, se utilizan distintas funciones para decodificar la información proveniente de TTS y enviar dichos datos a un repositorio en la nube, InfluxDB en este caso. A pesar de que Node-RED incorpora una herramienta de visualización de datos, los registros históricos no se almacenan, razón por la cual, tan pronto el servidor se ha desconectado, los mensajes recibidos son borrados y las gráficas reiniciadas.

InfluxDB es una base de datos en la nube que dentro de su plan gratuito ofrece, entre otras cosas, dos buckets o repositorios y retención de datos de 30 días. Mediante esta herramienta es posible almacenar las mediciones obtenidas por cada sensor LoRa y exportarlas en formato csv para su análisis.

La visualización de datos es llevada a cabo por Grafana, una plataforma de código abierto que permite crear paneles interactivos y gráficos para analizar y visualizar datos provenientes de diversas fuentes. Dentro de Grafana, se configura InfluxDB como fuente de datos y se personaliza

el dashboard web que se actualizará de manera periódica y automática a medida que se registren nuevas entradas.

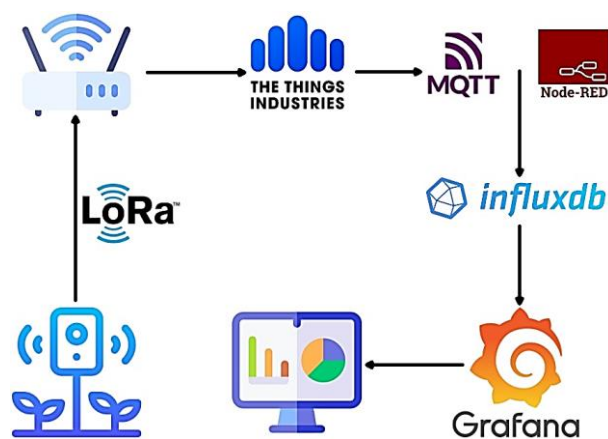


Fig. 5 – Flujo de datos sistema de monitoreo de gama media.

7.2 Instalación de sistemas de monitoreo

Cada sistema de monitoreo fue instalado en simultáneo en las dependencias de la Fábrica Digital O'Higgins con la finalidad de testear los aparatos en un ambiente controlado y para asegurar que las mediciones obtenidas sean directamente comparables. El registro de datos se llevó a cabo durante 5 días no consecutivos en intervalos de registro de 15 minutos. La información obtenida en este proceso fue utilizada para realizar un análisis comparativo entre los diferentes sistemas, permitiendo determinar la precisión de los sensores utilizados en contraste con la línea base de monitoreo.

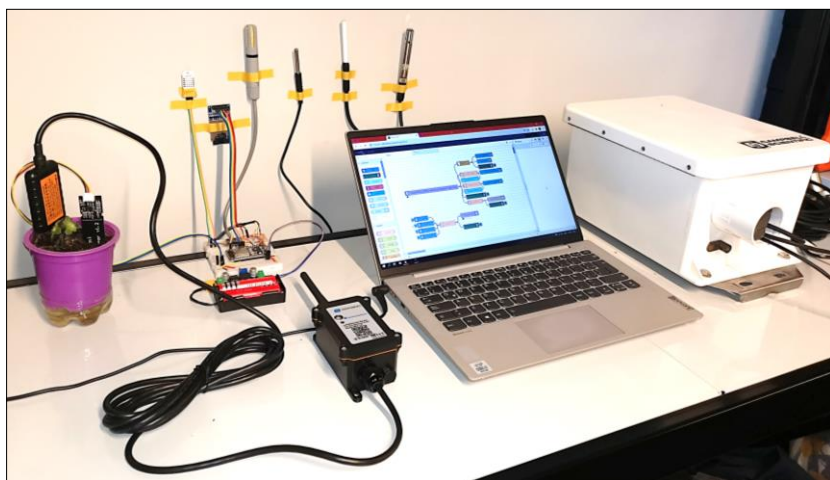
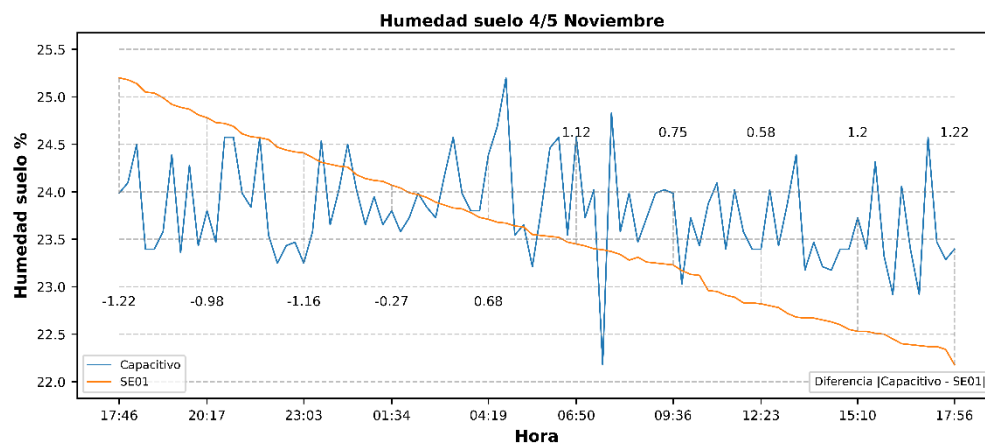
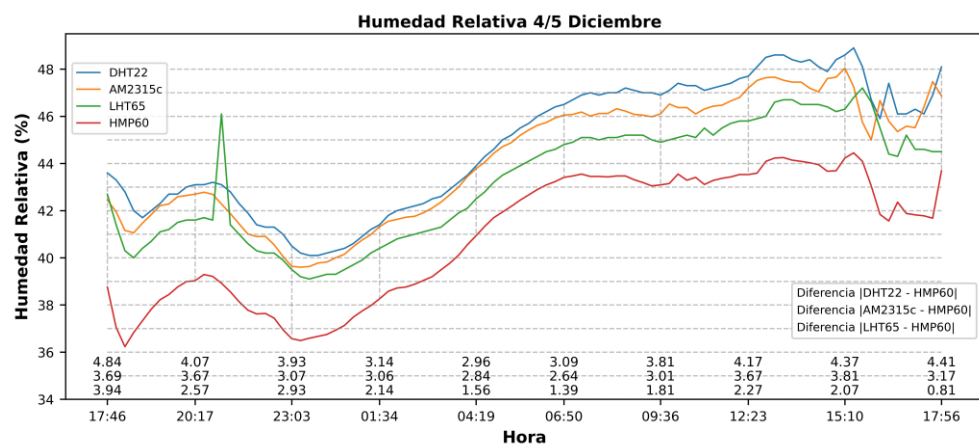
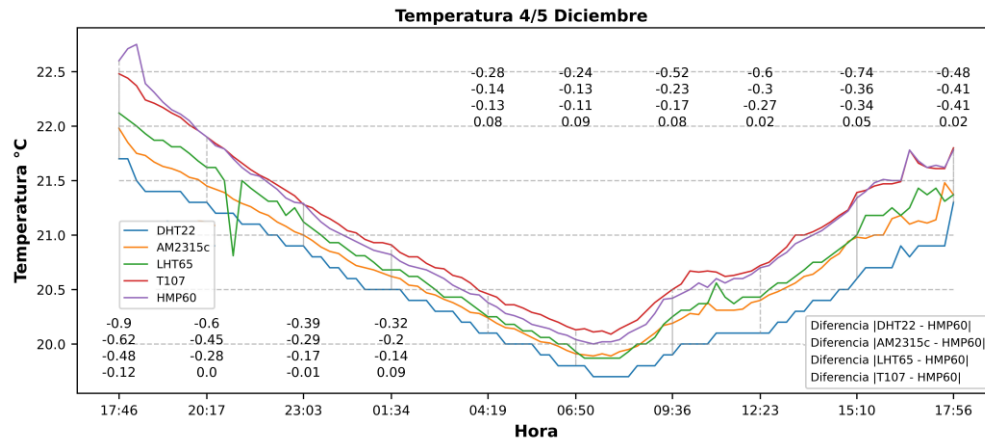


Fig. 6 – Sistemas de monitoreo midiendo en simultáneo.

8. Resultados o secciones temáticas

8.1 Análisis y comparación de resultados

Las mediciones fueron llevadas a cabo de manera simultánea entre los días 24 y 27 de noviembre, desde las 17:54 hrs del día 24 hasta las 10:00 hrs del día 27, utilizando el sensor T107 como línea base de temperatura y el sensor LHT65 como línea base de humedad relativa. Posteriormente, entre el 4 y 5 de diciembre se incorporó un sensor Vaisala HMP60 cuyos registros cumplen la función de valor real esperado. Los resultados obtenidos fueron trabajados en primera instancia utilizando el software Excel debido a disparidades en los formatos de las distintas bases de datos. Una vez obtenido un conjunto uniforme con los registros de los 3 sistemas, utilizando el entorno de programación Google Colab, se han desarrollado gráficas y tablas comparativas que presentan las métricas de error entre los sensores implementados. Las gráficas muestran los valores obtenidos por los sensores a lo largo del periodo para cada variable estudiada, de igual forma, se muestra el error con respecto a la línea base de monitoreo en determinados momentos del día. Tal como se muestra en el recuadro, las columnas de diferencias muestran de arriba a abajo el error de medición del primer sensor con respecto a la línea base y así de manera consecutiva hasta el último elemento de la columna que representa el error del último sensor. Se pueden apreciar diferencias tanto positivas como negativas, lo cual evidencia un valor predicho mayor o menor respectivamente del valor entregado por la línea base. De esta manera, es posible estudiar de manera visual y analítica las diferencias entre cada sistema. Las gráficas del periodo 24/27 de noviembre al igual que las métricas de error se encuentran disponibles en los Anexos [6](#) y [7](#) respectivamente.



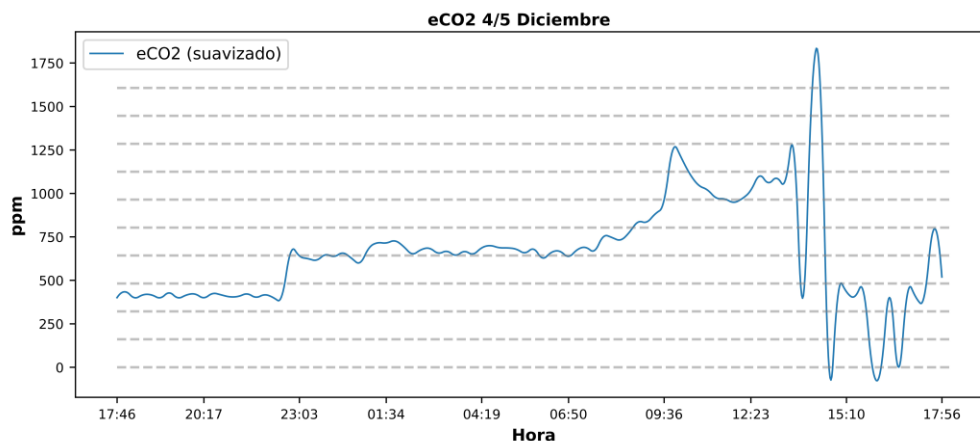


Fig. 7 – Registros simultáneos periodo 4/5 diciembre.

Tabla 8: Métricas de error periodo 4/5 diciembre

Temperatura				
Sensor vs. HMP60	MAE	MSE	RMSE	Correlación
DHT22	0.505	0.301	0.549	0.970
AM2315c	0.296	0.116	0.341	0.989
LHT65	0.213	0.066	0.256	0.985
T107	0.067	0.007	0.086	0.997
Humedad relativa				
Sensor vs. HMP60	MAE	MSE	RMSE	Correlación
DHT22	3.857	15.326	3.915	0.969
AM2315c	3.235	10.848	3.294	0.973
LHT65	2.335	6.107	2.471	0.953
Humedad suelo				
Sensor vs. SE01	MAE	MSE	RMSE	Correlación
Capacitivo	0.736	0.776	0.881	0.241

Los registros de humedad de suelo requieren de un procesamiento previo al análisis de las métricas. Dado que las medidas del sensor capacitivo de humedad de suelo son analógicas en el rango 0–4095, es necesario mapear los valores al rango 0–100% de acuerdo con los registros máximo y mínimo del sensor SE01–LB. Las medidas obtenidas entre el 4/5 de diciembre no muestran una tendencia clara, lo cual, en principio, se debe a las notables fluctuaciones que presenta el sensor capacitivo en sus registros. El coeficiente de correlación obtenido cuantifica el grado de disparidad entre ambas mediciones. Analizando los datos previos, es posible notar que las medidas entregadas por el sensor capacitivo en general son bastante variables. Sin embargo,

luego de un adecuado mapeo es posible obtener una clara tendencia de valores que disminuyen al paso del tiempo. Las métricas de error mejoran y el índice de correlación entre ambas series de datos aumenta considerablemente.

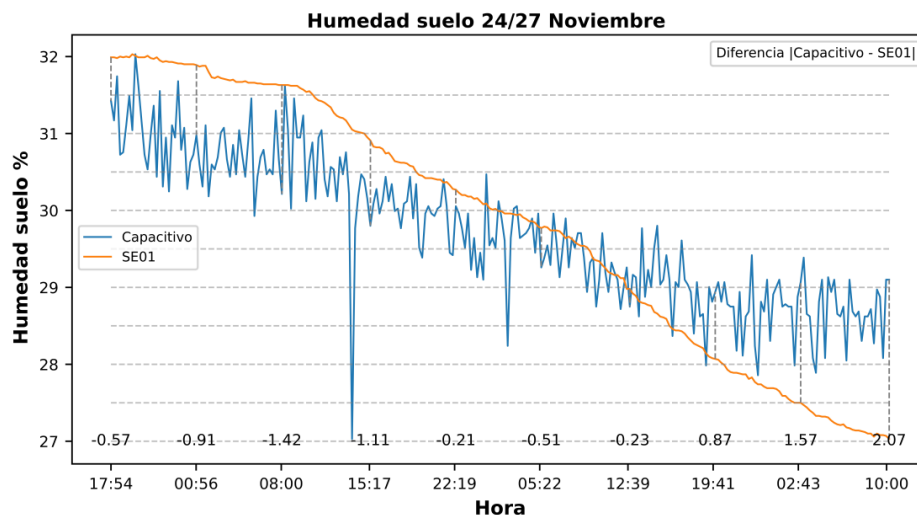


Fig. 8 – Humedad de suelo periodo 24/27 noviembre.

Tabla 9: Métricas de error Humedad de suelo periodo 24/27 noviembre

Sensor vs. SE01	MAE	MSE	RMSE	Correlación
Capacitivo	0,787	0,906	0,952	0,876

Debido a que no se poseen sensores con los cuales comparar los registros del sensor CCS811, no se han analizado métricas de desempeño para dicha variable.

8.2 Análisis y comparación de costos de los sistemas de monitoreo

Tabla 10: Comparación de costos sistemas de monitoreo

Sistema de monitoreo de bajo costo	
AM2302 (DHT22)	\$ 4.300
AM2315C	\$ 32.500
ESP32 DevKit V1	\$ 10.000
Sensor capacitivo humedad suelo V1.2	\$ 2.800
Módulo microSD	\$ 2.000
CCS811	\$ 12.000
9 Baterías 18650 6800 mAh	\$ 22.500
Regulador de voltaje LM2596	\$ 4.500
Cargador protector BMS 2S HX-2S-JH20 10A	\$ 2.500
Panel fotovoltaico CcLamp 8W	\$ 10.000
Total	\$ 103.100

Sistema de monitoreo gama media o comercial	
Dragino LHT65	\$ 60.000
Dragino SE01-LB	\$ 140.000
Milesight UG67 LoRaWAN Gateway	\$ 833.000
Total	\$ 1.033.000
Sistema de monitoreo gama científica	
Campbell Scientific T-107	USD 170 + IVA
Vaisala HMP60	USD 603,90 + IVA
Campbell Scientific CR300 Datalogger	USD 1.265 + IVA
Caja ENC8/10-SC-MM	USD 341,75 + IVA
Batería BP7	USD 101,20 + IVA
Total	USD 2.491,85 + IVA

Como se puede observar, el costo del prototipo desarrollado, considerando las especificaciones descritas en secciones anteriores, corresponde a una décima fracción del valor del sistema de gama media. El cual a su vez, corresponde a la mitad aproximadamente del valor de un sistema de monitoreo de gama científica.

El análisis de costos señala que, dada la similitud en los resultados obtenidos, el sistema de monitoreo de bajo costo es la elección más adecuada en relación precio-resultados. No obstante, la elección entre estos sistemas dependerá de consideraciones adicionales, como las características específicas de cada sistema y las necesidades particulares del usuario, las cuales podrían incluir funcionalidades específicas proporcionadas por los sistemas más costosos. Por una parte, el prototipo de bajo costo requiere de mayor conocimiento técnico sobre el sistema en sí, sobre la adecuación de la placa y elección de sensores para el lugar de instalación. Por otro lado, el sistema comercial podría ser una buena opción para productores de mediana escala o cooperativas que puedan utilizar el mismo router para administrar una gran cantidad de nodos o usuarios. Ya que el Gateway es el elemento más costoso del sistema.

8.3 Discusión

Las gráficas de temperatura en general muestran un comportamiento uniforme a lo largo de ambos periodos de registro. Si bien existen fluctuaciones importantes en ciertos puntos por parte de los sensores LHT65 y AM2315c, las métricas indican que siguen correctamente la referencia. En el caso específico de estos dos sensores, el LHT65 registra un MAE menor, lo que

indica que, en promedio, sus mediciones están más cerca de los valores reales que las del AM2315c. Sin embargo, el AM2315c muestra una correlación ligeramente más alta, lo que sugiere que sus mediciones siguen una tendencia lineal levemente más cercana a las mediciones reales en comparación con el LHT65 a pesar de tener mayores métricas de error.

El sensor AM2302 o DHT22, si bien obtuvo el menor desempeño en comparación a los demás sensores, demuestra tener un rendimiento óptimo respecto del sensor HMP60 en contraste a la gama de ambos dispositivos, con un MAE de solo 0,5°C y RMSE cercano al mismo valor, lo cual indica que la magnitud de los errores es constante y no existen fluctuaciones importantes que penalizar, igualmente, un índice de correlación de 0,97 es un buen indicio de su desempeño. Por otro lado, el sensor T107 de Campbell Scientific demuestra ser el de mejor rendimiento con respecto al sensor HMP60, con valores de error muy cercanos a cero y un coeficiente de correlación casi perfecto.

En cuanto a las mediciones de humedad relativa se evidencia una notable baja del rendimiento de los sensores en comparación a la referencia. Con un MAE de 3,8 y MSE de 15,3 el sensor DHT22 registra el mayor error en las mediciones de esta variable, indicando que en promedio sus valores están 3,8% por sobre el valor real, lo cual a su vez amplifica el MSE. Si bien el índice de correlación de todos los sensores es alto, las métricas indican que siguen la referencia con valores de humedad relativa mayores a lo esperado. En este caso, el sensor Dragino LHT65 muestra el mejor desempeño con un MAE de 2,3%.

Si bien los registros obtenidos por los sensores de bajo costo fueron los de menor desempeño en comparación a la línea base de monitoreo, un adecuado mapeo y calibración pueden ayudar a mejorar los resultados.

Conclusión

Se ha detallado el proceso de diseño e implementación de un sistema de monitoreo para agricultura basado en componentes de bajo costo. Las distintas etapas y actividades llevadas a cabo han permitido adquirir mayor conocimiento sobre el desarrollo de los sistemas de monitoreo de invernadero y ambientes agrícolas en general, dando a conocer los componentes necesarios y las variables a tener en cuenta.

El sistema desarrollado consiste en una solución de IoT que utiliza los componentes de gama baja con mejor relación calidad-precio en el mercado local. Consta de un único nodo conectado a WiFi que mide y envía datos de temperatura, humedad relativa, humedad de suelo y CO₂ en intervalos de 15 minutos a Blynk, ThingSpeak y Google Spreadsheet, plataformas de visualización y almacenamiento de datos en la nube. De igual forma, consta de un módulo lector microSD que actúa como almacenamiento local.

Se ha propuesto una alternativa de comunicación a larga distancia mediante el uso de placas de desarrollo Heltec Wireless Stick Lite en configuración punto a punto, debido a características como conectividad LoRa y WiFi por un bajo costo. De igual forma, se han realizado cálculos para determinar las características óptimas de un sistema de alimentación eléctrica mediante energía solar.

En conjunto al sistema de bajo costo, se han implementado dos sistemas de monitoreo adicionales de gama media y científica. El sistema de gama media se compone de sensores de temperatura, humedad relativa y humedad de suelo con conectividad LoRa en conjunto a un Gateway que comunica los sensores con la plataforma TTS, para posteriormente interconectar plataformas de gestión de datos, almacenamiento y visualización. El sistema de monitoreo científico por su parte se compone de un datalogger, un termistor y un termohigrómetro encargados de registrar los datos reales o línea base de monitoreo.

Las mediciones llevadas a cabo por los sistemas de bajo costo y gama media han sido comparadas con la línea base de manera gráfica y analítica, utilizando series temporales y métricas como MAE, MSE, RMSE y Coeficiente de correlación.

Los resultados obtenidos demuestran que el sistema de bajo costo presenta el menor desempeño en comparación al sistema científico tanto en temperatura como humedad relativa. Sin embargo, sus registros solo distan alrededor de 0,2°C en promedio con respecto a la referencia de temperatura del periodo 4/5 diciembre. Al medir humedad relativa los errores de todos los sensores se incrementaron, lo cual demostró una falta tanto de precisión como de resolución por parte de los sensores de gama baja y media al medir esta variable.

El sensor capacitivo de humedad de suelo se muestra como el menos preciso, las variaciones constantes en los valores entregados hacen que sus registros en principio sean difíciles de interpretar. Sin embargo, al utilizar una referencia y mapear adecuadamente los datos se puede observar una mejora en su rendimiento.

En general, luego de analizar los resultados obtenidos en los periodos 24/7 noviembre y 4/5 diciembre, se puede concluir que un incremento en la cantidad de datos analizados mejora considerablemente el rendimiento del sensor capacitivo de humedad de suelo. Por otro lado, un mayor número de registros detalla aún más las distintas métricas de error, permitiendo analizar de mejor manera la efectividad del sistema.

El sistema de monitoreo de bajo costo cumple el objetivo planteado, pero requiere calibración en sus sensores para entregar medidas más ajustadas a la línea base de monitoreo. Su desempeño es adecuado al medir temperatura y humedad relativa, no obstante, las mediciones de humedad de suelo no son interpretables sin un procesamiento previo con una línea base de referencia. La interpretación de los valores obtenidos por cada uno de los sistemas dependerá del contexto de estudio. En el caso de aplicaciones agrícolas, el cultivo monitoreado determinará los valores óptimos de cada variable para garantizar el correcto desarrollo del cultivo.

En resumen, el sistema desarrollado demuestra eficacia en la medición de temperatura, humedad relativa, humedad de suelo y CO₂. A pesar de que se han cumplido los objetivos propuestos, se identifican áreas de mejora, como una calibración más avanzada para obtener mediciones más precisas e integración alguna de las alternativas propuestas para aumentar el rango de cobertura y transmisión de datos. Este trabajo proporciona una base para futuras investigaciones que contribuyan al campo de la agricultura de precisión y bajo costo. La validación en terreno del sistema de monitoreo es esencial, y se enfatiza la importancia de la retroalimentación de agricultores para adaptar el sistema a necesidades específicas. Se proyecta la posibilidad de publicaciones científicas y divulgación en terreno para fomentar la adopción de tecnologías similares. En conjunto, este trabajo representa un paso inicial hacia sistemas de monitoreo más sofisticados y adaptados, integrando avances técnicos con la experiencia práctica de agricultores para optimizar la producción agrícola.

Referencias

Rojas Le-Bert, G. (2018). Informe sobre la Región del Libertador Bernardo O'Higgins 2018. Serie de Informes de la Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (Odepa). Ministerio de Agricultura, Gobierno de Chile. Santiago, Chile.

Centro de Información de Recursos Naturales (Chile). (2017). Diagnóstico territorial de la situación hortícola Región de O'Higgins (Pub. CIREN N°200).

ODEPA (Oficina de Estudios y Políticas Agrarias). (2023, febrero). Boletín de fruta, febrero 2023. Recuperado de [Boletín de fruta, febrero 2023 – ODEPA | Oficina de Estudios y Políticas Agrarias](#)

Rodríguez, M. S. (1972). Manejo y control del ambiente de los invernaderos.

Copet, B., & Videau, J.-A. (1981). Digital control system for greenhouses. *Acta Horticulturae*, 115, 327–334.

Kozai, T. (1982). Development of a microcomputer-based environment control and data-logging system for greenhouse and its field test. *Journal of Agricultural Meteorology*, 38(1), 45–50.

Hoshi, T., & Kozai, T. (1983). Knowledge-based and hierarchically distributed online control system for greenhouse management. In *III International Symposium on Energy in Protected Cultivation* (pp. 301–308).

VidyaSagar, B. (2012). Green House Monitoring and Automation using GSM. *International Journal of Scientific Research Publications*, 2, 1–5.

Liu, D. I. U., Xin, C., Hong, C., & Ji, L. J. (2015). Intelligent agriculture greenhouse environment monitoring system based on IoT technology. In *2015 International Conference on Intelligent Transportation, Big Data and Smart City* (pp. 487–490).

Fuentes Peñailillo, F. P., Ortega Farías, S., Rivera Abarca, M., & Morales Salinas, L. (2020). Implementación de una metodología para estimar el consumo y estado hídrico de la vid mediante teledetección y sensores inalámbricos especializados. Universidad de Talca (Chile). Facultad de Ciencias Agrarias.

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*, 4.

Singh, P., & Saikia, S. (2016). Arduino-based smart irrigation using water flow sensor, soil moisture sensor, temperature sensor and ESP8266 WiFi module. In 2016 IEEE Region 10 Humanitarian Technology Conference (R10-HTC) (pp. 1–4, December 2016).

Haro Vilaña, I. V. (2019). Implementación de un sistema de monitoreo y control automático de riego para invernaderos mediante tecnología LORA con ESP32 (Bachelor's thesis). Quito.

Akkaş, M. A., & Sokullu, R. (2017). An IoT-based greenhouse monitoring system with Micaz motes. *Procedia Computer Science*, 113, 603–608.

Escobar Gallardo, E., & Villazón, A. (2018). Sistema de monitoreo energético y control domótico basado en tecnología internet de las cosas. *Investigación & Desarrollo*, 18(1), 103–116.

Pérez Valencia, A. L., & Alvear de La Ossa, R. D. (2022). Implementación de un prototipo de Sistema de Monitoreo Distribuido de Concentración de Gases en la Industria Minera Subterránea de Carbón.

Haro Vilaña, I. V. (2019). Implementación de un sistema de monitoreo y control automático de riego para invernaderos mediante tecnología LORA con ESP32 (Bachelor's thesis). Quito.

Shadadpuri Goplani, S. (2018). Análisis, caracterización y calibración de sensores de bajo costo para Arduino.

Li, L., Xiaoguang, H., Ke, C., & Ketai, H. (2011). The applications of WiFi-based wireless sensor network in Internet of Things and smart grid. In 2011 6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (pp. 789–793, June 2011).

Wi-Fi Alliance. (2023, 29 de octubre). Discover Wi-Fi. Recuperado de <https://www.wi-fi.org/discover-wi-fi>.

LoRa Alliance. (2023, 29 de octubre). About LoRaWAN. Recuperado de <https://loralliance.org/about-lorawan/>.

Castro, C. D. P., & Osorio, S. R. (2011). Tarjetas de Desarrollo: Herramientas para el diseño. *Letras ConCiencia Tecnológica*, (11), 43–52.

Grupo de Investigación en Sistemas Inteligentes, Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, Universidad Nacional Autónoma de México. (2018). Tarjetas de desarrollo.

Wang, X., Dong, Y., Chen, M., Su, F., & Ling, L. (2019). Research on real-time temperature control method for multi-visualization of hot runner system based on internet of things. *Journal of Applied Science and Engineering*, 22(4), 683–690.

Yang, S., Liu, X., Liu, S., Chen, X., & Cao, Y. (2022). Real-Time Temperature Distribution Monitoring in Chinese Solar Greenhouse Using Virtual LAN. *Agronomy*, 12(7), 1565. <https://doi.org/10.3390/agronomy12071565>

Zhang, S., Guo, Y., Li, S., Ke, Z., Zhao, H., Yang, J., Wang, Y., Li, D., Wang, L., Yang, W., & Zhang, Z. (2022). Investigation on environment monitoring system for a combination of hydroponics and aquaculture in greenhouse. *Information Processing in Agriculture*, 9(1), 123–134. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2021.06.006>

Okasha, A. M., Ibrahim, H. G., Elmetwalli, A. H., Khedher, K. M., Yaseen, Z. M., & Elsayed, S. (2021). Designing Low-Cost Capacitive-Based Soil Moisture Sensor and Smart Monitoring Unit Operated by Solar Cells for Greenhouse Irrigation Management. *Sensors*, 21(16), 5387. <https://doi.org/10.3390/s21165387>

Bance, J. (2022). Crop Adaptation to Elevated CO₂ and Temperature. *Plants*, 11(3), 453. <https://doi.org/10.3390/plants11030453>

James, G., Witten, D., Hastie, T., & Tibshirani, R. (2013). *An Introduction to Statistical Learning*. New York, NY, USA: Springer.

Willmott, C. J., & Matsuura, K. (2005). Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Climate Research*, 30(1), 79–82. [Online]. Disponible en: <https://www.int-res.com/abstracts/cr/v30/n1/p79-82/>

ProbabilidadyEstadística.net. (2022). Coeficiente de correlación de Pearson. [Online]. Disponible en: <https://www.probabilidadyestadistica.net/coeficiente-de-correlacion-de-pearson/>

Brokering, W., & Palma, R. (2018). Atrapando el sol en los sistemas eléctricos de potencia. Santiago de Chile.

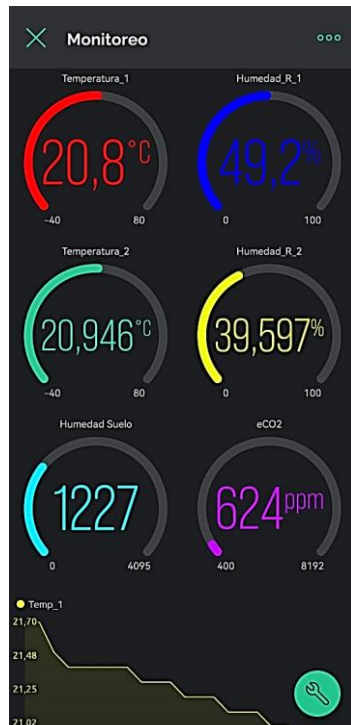
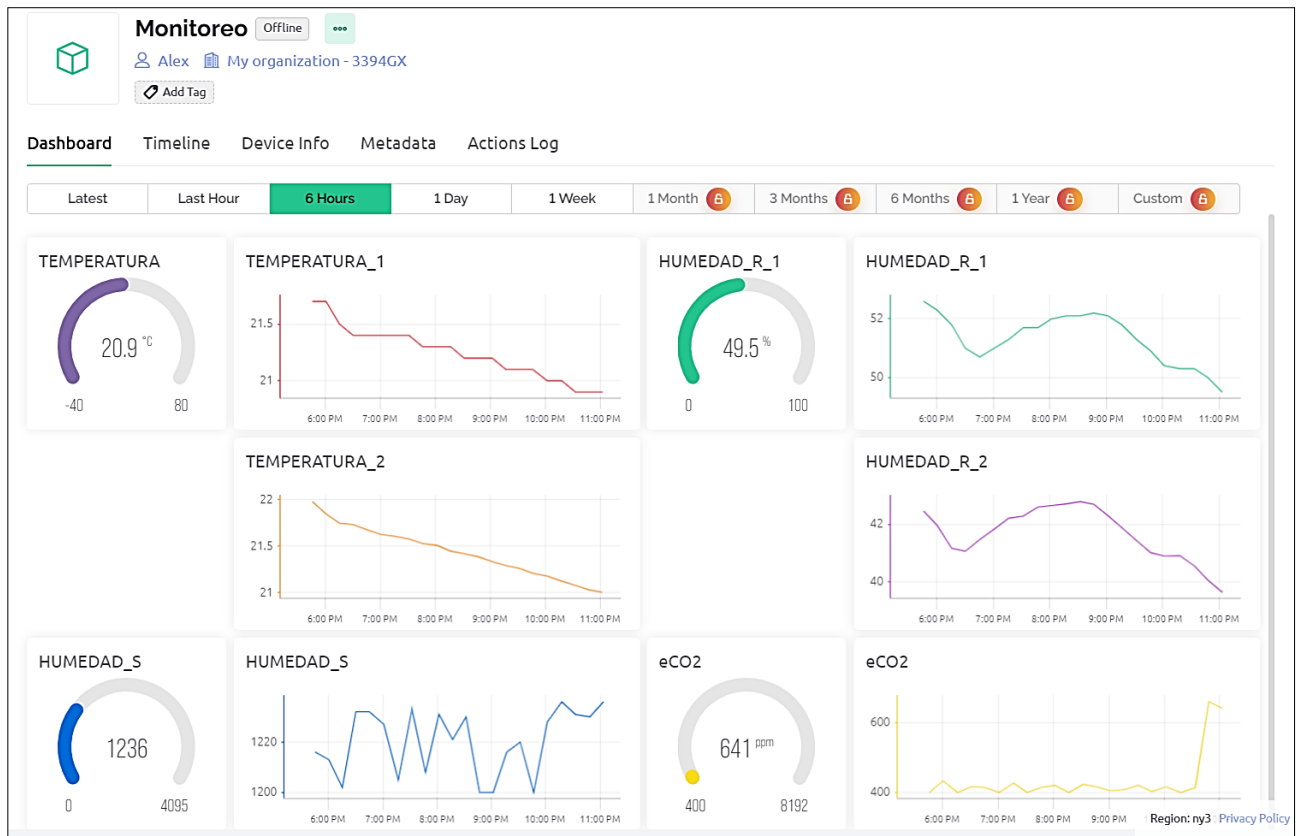
Ministerio de Energía de Chile. Explorador Solar y Eólico. [Online]. Disponible en: <https://exploradores.minenergia.cl/>

Milesight. User Guide for Outdoor LoRaWAN® Gateway UG67.

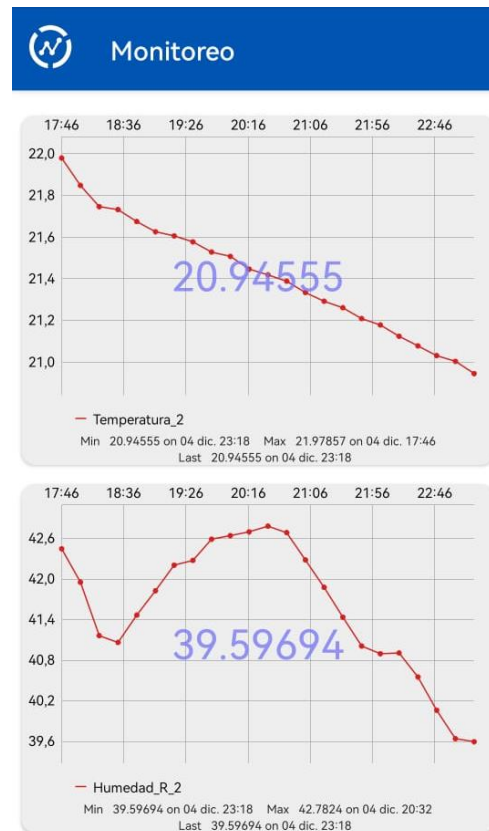
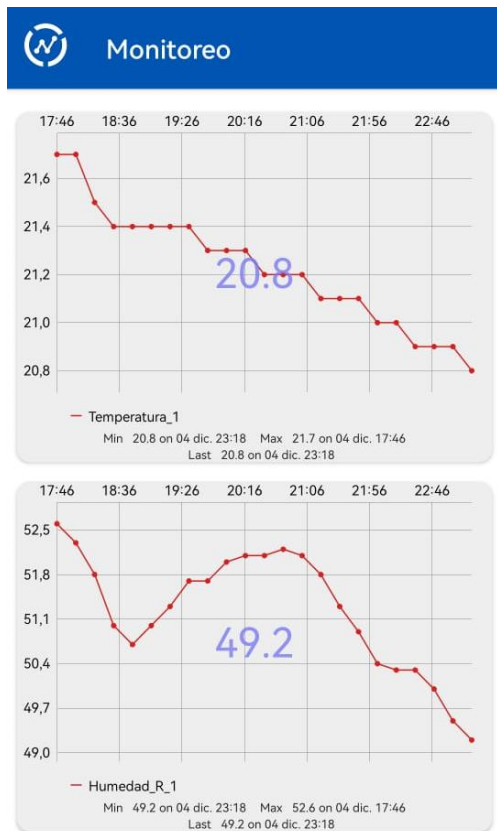
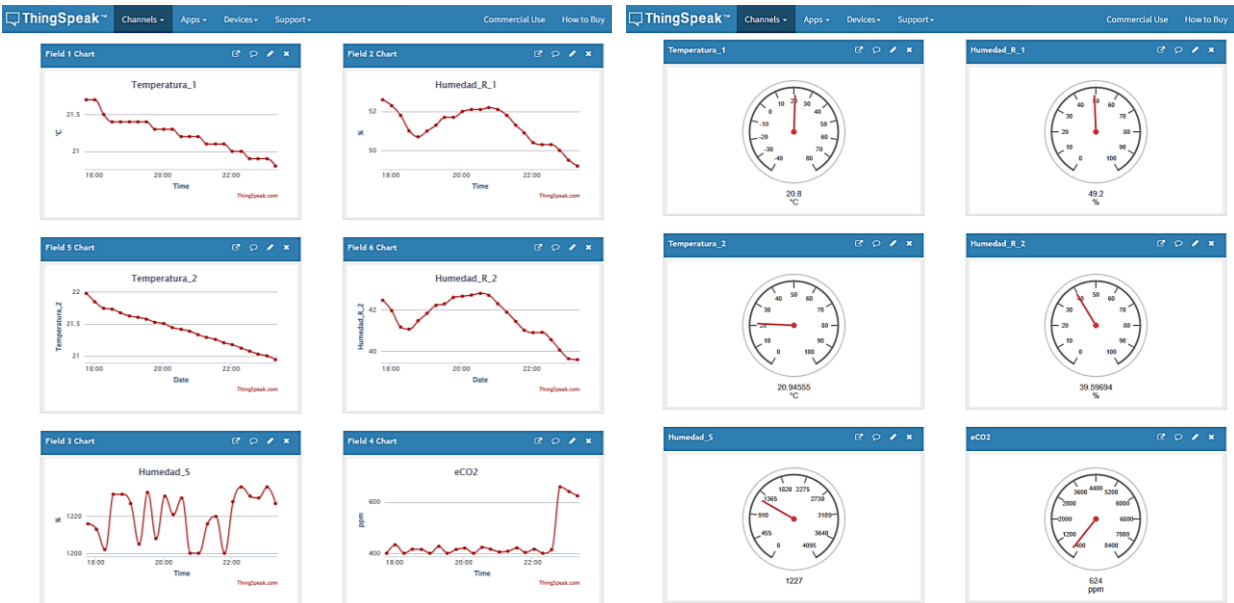
Mahedero Biot, F. (2020). Desarrollo de una aplicación IoT para el envío de imágenes mediante el protocolo MQTT (Tesis doctoral). Universitat Politècnica de València.

Anexos

Anexo 1: Dashboard Web y móvil Blynk

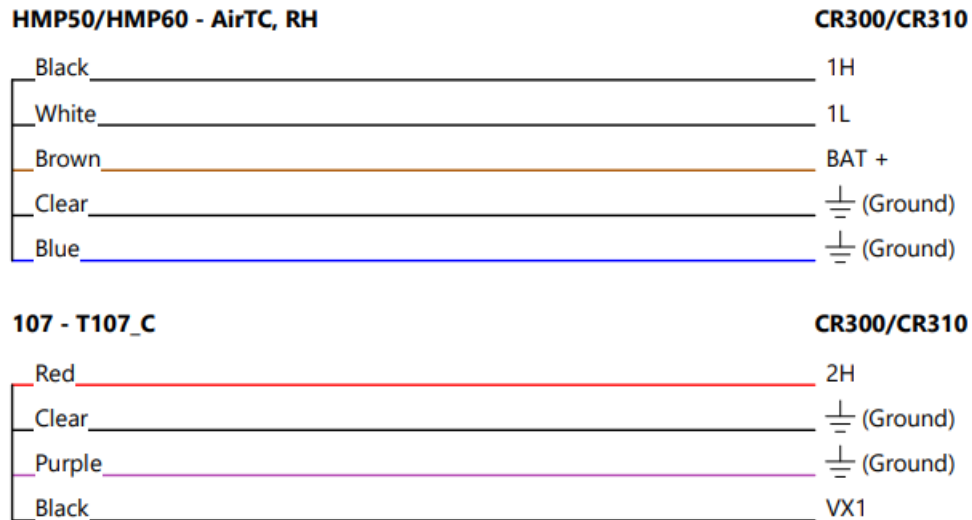


Anexo 2: Dashboard Web y móvil ThingSpeak



Anexo 3: Diagrama de conexiones sensores científicos.

CR300/CR310 Diagrama Conexiones de CR300-T107-HMP60 15min.SCW



Anexo 4: Implementación en Google App Script

```
function doGet(e) {
  Logger.log( JSON.stringify(e) );
  var result = 'Ok';
  if (e.parameter == 'undefined') {
    result = 'No Parameters';}

  else {
    var sheet_id = '1Sw8uuOMVfPc5NHQPqQaFxtDRG-b5a07kLSpmWl7Q9fs';
    var sheet = SpreadsheetApp.openById(sheet_id).getActiveSheet();
    var newRow = sheet.getLastRow() + 1;
    var rowData = [];
    var Curr_Date = new Date();
    rowData[0] = Curr_Date; // Date in column A
    var Curr_Time = Utilities.formatDate(Curr_Date, "America/Santiago",
    'HH:mm:ss');
    rowData[1] = Curr_Time; // Time in column B
    for (var param in e.parameter) {
      Logger.log('In for loop, param=' + param);
      var value = stripQuotes(e.parameter[param]);
      Logger.log(param + ':' + e.parameter[param]);
      switch (param) {

        case 'Temperatura_1':
          rowData[2] = value;
          result = 'OK';
          break;
```

```

case 'Humedad_R_1':
rowData[3] = value;
result += ', OK';
break;

case 'Temperatura_2':
rowData[4] = value;
result = 'OK';
break;

case 'Humedad_R_2':
rowData[5] = value;
result += ', OK';
break;

case 'Humedad_S':
rowData[6] = value;
result += ', OK';
break;

case 'eCO2':
rowData[7] = value;
result += ', OK';
break;

default:
result = "unsupported parameter";}}
Logger.log(JSON.stringify(rowData));
var newRange = sheet.getRange(newRow, 1, 1, rowData.length);
newRange.setValues([rowData]);
return ContentService.createTextOutput(result);}
function stripQuotes( value ) {
return value.replace(/^["]|['"]$/g, "");}

```

Monitoreo ☆ 📁

Archivo Editar Ver Insertar Formato Datos Herramientas Extensiones Ayuda

100% 123 Predet... 10 B I A

L64

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Date	Time	Temperatura_1	Humedad_R_1	Temperatura_2	Humedad_R_2	Humedad_S	eCO2				
2	25/11/2023	0:11:27	21	54,9	21,01	54,7	1,483	575				
3	25/11/2023	0:26:31	21	55,1	20,98	54,89	1,472	498				
4	25/11/2023	0:41:35	20,9	55,3	20,93	55,07	1,469	561				
5	25/11/2023	0:56:40	20,9	55,5	20,91	55,1	1,461	459				
6	25/11/2023	1:11:44	20,8	55,6	20,87	55,34	1,473	446				
7	25/11/2023	1:26:50	20,8	55,7	20,83	55,24	1,482	422				
8	25/11/2023	1:41:54	20,8	55,9	20,79	55,4	1,457	505				
9	25/11/2023	1:56:58	20,7	56	20,74	55,49	1,486	515				
10	25/11/2023	2:12:03	20,7	56	20,71	55,49	1,473	414				
11	25/11/2023	2:27:41	20,6	56,1	20,67	55,49	1,475	418				
12	25/11/2023	2:42:45	20,6	56,1	20,65	55,49	1,47	427				
13	25/11/2023	2:57:49	20,5	56,1	20,6	55,51	1,46	434				
14	25/11/2023	3:12:53	20,5	56,1	20,56	55,42	1,458	402				
15	25/11/2023	3:28:52	20,5	56	20,54	55,47	1,471	423				
16	25/11/2023	3:43:55	20,5	56,1	20,49	55,48	1,478	435				
17	25/11/2023	3:59:00	20,4	56	20,46	55,38	1,465	424				
18	25/11/2023	4:14:04	20,4	56	20,42	55,46	1,477	401				
19	25/11/2023	4:29:07	20,3	56	20,38	55,41	1,459	500				
20	25/11/2023	4:44:12	20,3	56	20,35	55,39	1,469	473				
21	25/11/2023	4:59:17	20,3	56	20,3	55,4	1,478	466				
22	25/11/2023	5:14:21	20,2	56	20,27	55,41	1,463	438				
23	25/11/2023	5:29:26	20,2	56	20,23	55,42	1,462	500				

+ Hoja 1

Anexo 5: Código sistema de monitoreo bajo costo

```
#include <Wire.h>
#include <WiFi.h>
#include <BlynkSimpleEsp32.h>
#include "ThingSpeak.h"
#include <WiFiClient.h>
#include <AM2302-Sensor.h>
#include "ccs811.h"
#include <WiFiClientSecure.h>
#include <Adafruit_AHTX0.h>
#include <SD.h>
#include <SPI.h>
#include <FS.h>

#define BLYNK_TEMPLATE_ID "TMPL2v4xCa-3j"
#define BLYNK_TEMPLATE_NAME "Monitoreo"
#define BLYNK_AUTH_TOKEN "imVKCd_nUNqSe0-s21eiHhgm_VC4EaXX"

unsigned long channelID = 2268209;
const char* WriteAPIKey = "J52VHFRN2NKXT4T2";
String GAS_ID = "AKfycbwG6Ju5N7dc8eAJAhGquOS9-8CR1G0IzB7YtZmwmaOufelpXborip45Nnk-KvupLl6gyQ";

const char* host = "script.google.com";

float Temperatura_1;
float Humedad_R_1;
int Humedad_S;
```

```

uint16_t eco2, etvoc, errstat, raw;
int contador = 0;

AM2302::AM2302_Sensor am2302{4};
int Humedad_pin = 34;
CCS811 ccs811(23);
Adafruit_AHTX0 aht;

sensors_event_t Humedad_R_2, Temperatura_2;

BlynkTimer timer;

char ssid[] = "UOH_FabLab";
char pass[] = "FDOH2022";

char auth[] = BLYNK_AUTH_TOKEN;

WiFiClient cliente;

void update_google_sheet(){
  Serial.print("conectándose a ");
  Serial.println(host);
  WiFiClientSecure client;
  const int httpPort = 443; // Puerto 443 para HTTPS
  client.setInsecure();

  if (!client.connect(host, httpPort)){
    Serial.println("connection failed");
    return;}

  String url = "/macros/s/" + GAS_ID + "/exec?Temperatura_1=";

  url += String(Temperatura_1);

  url += "&Humedad_R_1=";
  url += String(Humedad_R_1);

  url += "&Temperatura_2=";
  url += String(Temperatura_2.temperature);

  url += "&Humedad_R_2=";
  url += String(Humedad_R_2.relative_humidity);

  url += "&Humedad_S=";
  url += String(Humedad_S);

  url += "&eCO2=";
  url += String(eco2);

  Serial.print("Requesting URL: ");
  Serial.println(url);

  // This will send the request to the server
  client.print(String("GET ") + url + " HTTP/1.1\r\n" +

```

```

        "Host: " + host + "\r\n" +
        "Connection: close\r\n\r\n");

    Serial.println();
    Serial.println("closing connection");}

void setup(){

    Serial.begin(9600);

    WiFi.begin(ssid, pass);

    while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
        delay(500);
        Serial.println("Conectando WiFi..");}

    Serial.println("Conectado");

    Wire.begin();
    am2302.begin();
    ThingSpeak.begin(cliente);

    if (! aht.begin()) {
        while (1) delay(10);}

    ccs811.set_i2cdelay(50);
    bool ok = ccs811.begin();
    ok = ccs811.start(CCS811_MODE_1SEC);

    if (!SD.begin(5)) {
        Serial.println("Error al inicializar la tarjeta SD");
        return;}

    File miArchivo = SD.open("/test.txt", FILE_WRITE);
    if (!miArchivo) {
        Serial.println("Error al abrir el archivo");
        return;}

    miArchivo.seek(miArchivo.size());

    miArchivo.print("Item");
    miArchivo.print(", ");
    miArchivo.print("Temperatura_1");
    miArchivo.print(", ");
    miArchivo.print("Humedad_1");
    miArchivo.print(", ");
    miArchivo.print("Temperatura_2");
    miArchivo.print(", ");
    miArchivo.print("Humedad_2");
    miArchivo.print(", ");
    miArchivo.print("Humedad_S");
    miArchivo.print(", ");
    miArchivo.println("eCO2");
}

```

```

void AM2302sensor(){
  auto status = am2302.read();
  Temperatura_1 = am2302.get_Temperature();
  Humedad_R_1 = am2302.get_Hunidity();

  if (isnan(Humedad_R_1) || isnan(Temperatura_1)) {
    Serial.println("Failed to read from AM2302 sensor!");
    return;}

  Blynk.virtualWrite(V0, Temperatura_1);
  Blynk.virtualWrite(V1, Humedad_R_1);
  ThingSpeak.setField (1, Temperatura_1);
  ThingSpeak.setField (2, Humedad_R_1);}

void HUMEDAD_SUELO(){
  Humedad_S = analogRead(Humedad_pin);
  Blynk.virtualWrite(V2, Humedad_S);
  ThingSpeak.setField (3, Humedad_S);}

void CO2(){
  ccs811.read(&eco2,&etvoc,&errstat,&raw);
  Blynk.virtualWrite(V3, eco2);
  ThingSpeak.setField (4,eco2);}

void loop(){
  WiFi.begin(ssid, pass);
  Blynk.begin(auth, ssid, pass);

  AM2302sensor();
  aht.getEvent(&Humedad_R_2, &Temperatura_2);
  HUMEDAD_SUELO();
  CO2();

  Serial.print("Temperatura_1: ");
  Serial.print(Temperatura_1);
  Serial.print(" °C\t");

  Serial.print("Humedad_R_1: ");
  Serial.print(Humedad_R_1);
  Serial.print(" %\t");

  Serial.print("Temperatura_2: ");
  Serial.print(Temperatura_2.temperature);
  Serial.print(" °C\t");
  Blynk.virtualWrite(V4, Temperatura_2.temperature);
  ThingSpeak.setField (5, Temperatura_2.temperature);

  Serial.print("Humedad_R_2: ");
  Serial.print(Humedad_R_2.relative_humidity);
  Serial.print(" %\t");
  Blynk.virtualWrite(V5, Humedad_R_2.relative_humidity);
  ThingSpeak.setField (6, Humedad_R_2.relative_humidity);

```

```

Serial.print("Humedad_S: ");
Serial.print(Humedad_S);

Serial.print("CO2: ");
Serial.print(eco2);
Serial.println(" ppm");

Blynk.run();
ThingSpeak.writeFields(channelID,WriteAPIKey);
update_google_sheet();

File miArchivo = SD.open("/test.txt", FILE_WRITE);
if (!miArchivo) {
  Serial.println("Error al abrir el archivo");
  return;}

miArchivo.seek(miArchivo.size());
miArchivo.print(contador);
miArchivo.print(", ");
miArchivo.print(Temperatura_1);
miArchivo.print(", ");
miArchivo.print(Humedad_R_1);
miArchivo.print(", ");
miArchivo.print(Temperatura_2.temperature);
miArchivo.print(", ");
miArchivo.print(Humedad_R_2.relative_humidity);
miArchivo.print(", ");
miArchivo.print(Humedad_S);
miArchivo.print(", ");
miArchivo.println(eco2);

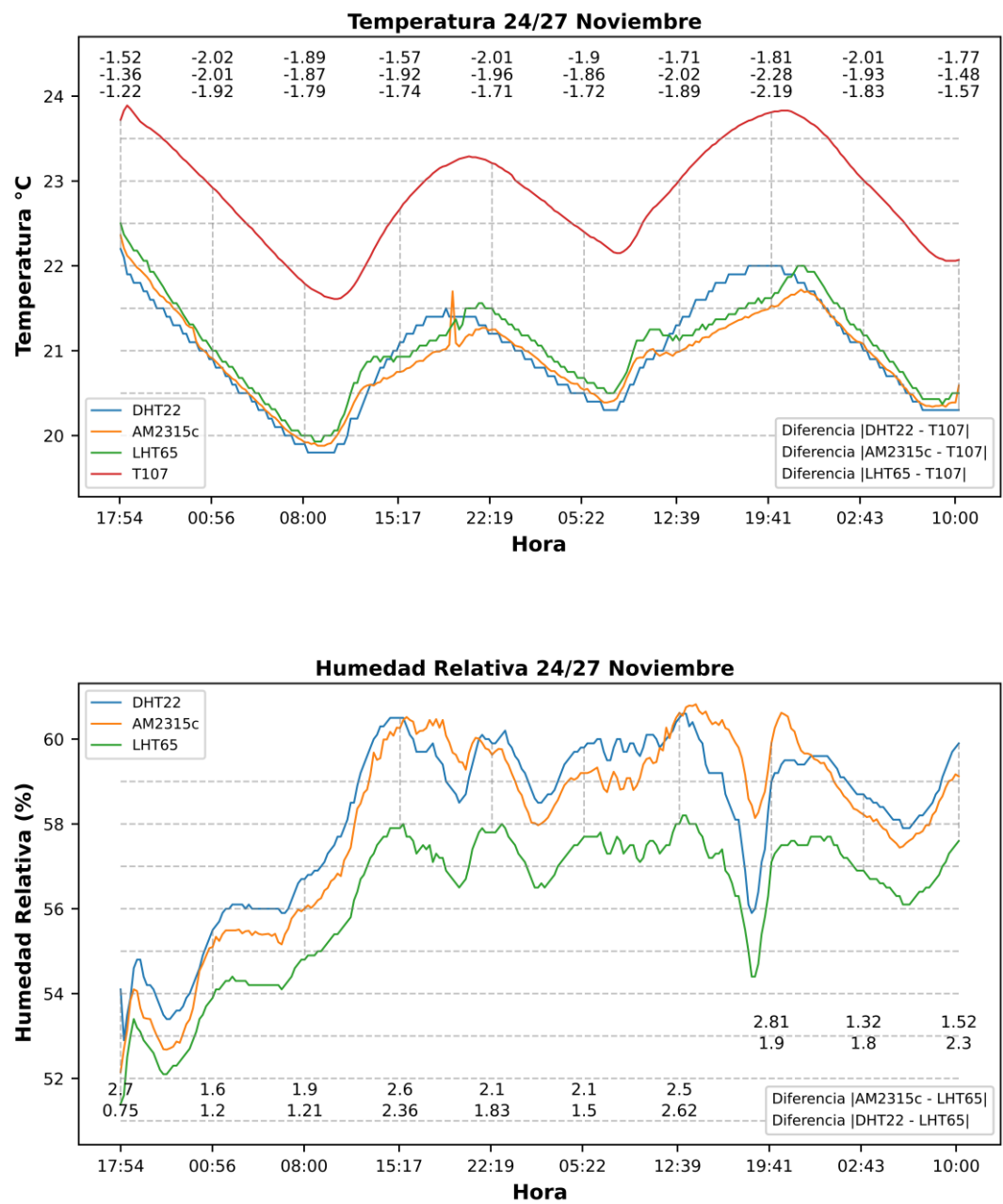
miArchivo.close();

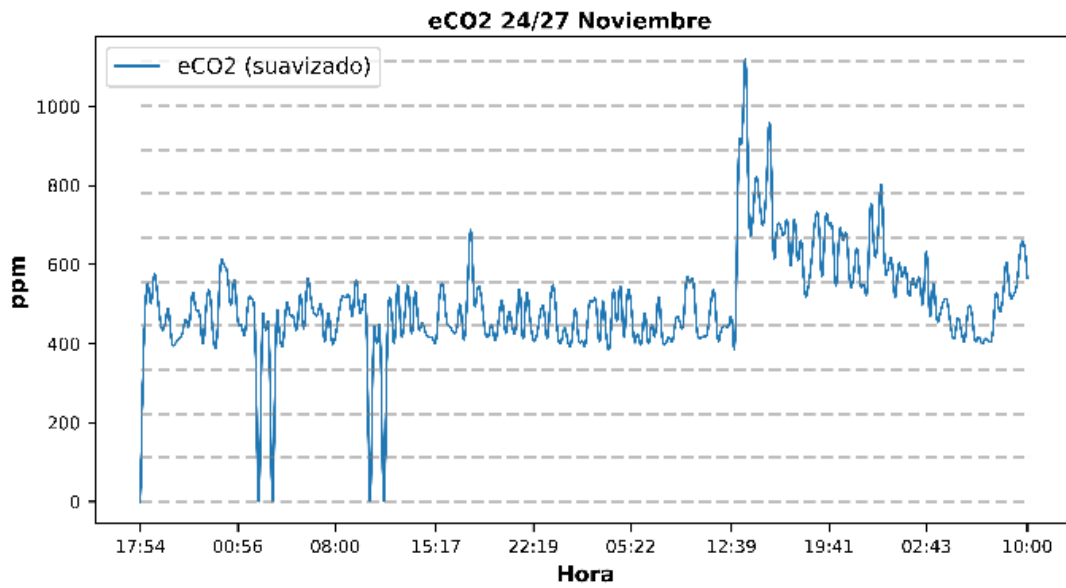
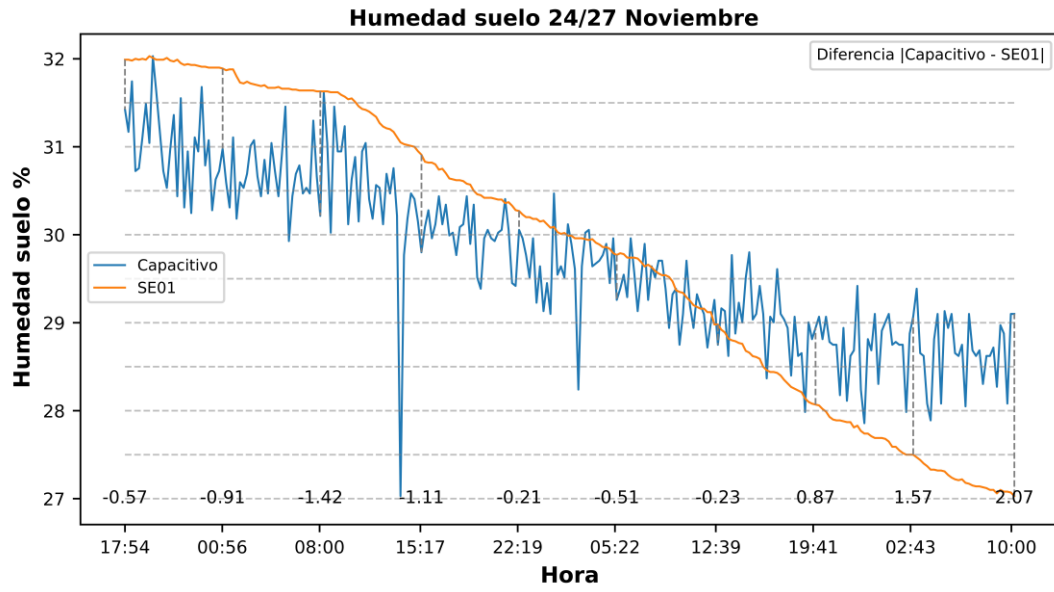
contador++;

delay(900000);} //Envía datos cada 15 minutos

```

Anexo 6: Registros simultáneos periodo 24/27 de noviembre

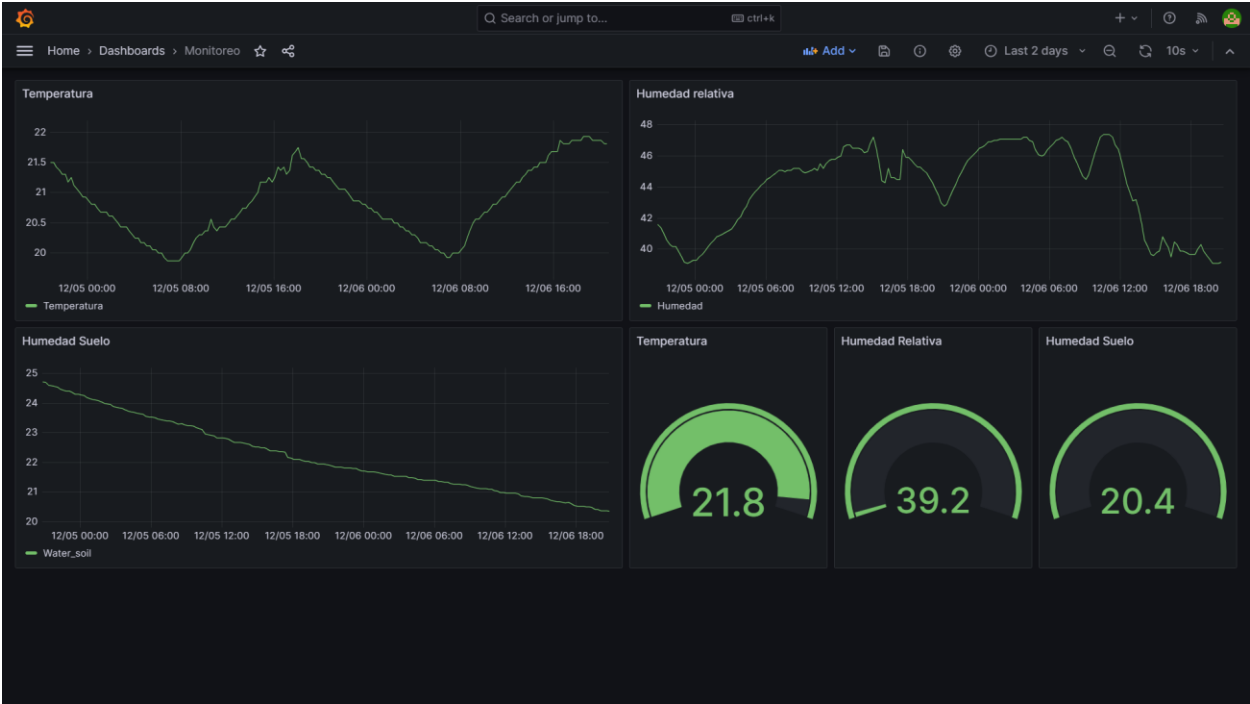




Anexo 7: Métricas de error periodo 24/27 noviembre

Métricas de error con respecto a la línea base				
Temperatura				
Sensor vs. T107	MAE	MSE	RMSE	Correlación
DHT22	0,626	0,395	0,628	0,997
AM2315c	0,679	0,513	0,716	0,941
LHT65	0,531	0,332	0,576	0,938
Humedad relativa				
Sensor vs. LHT65	MAE	MSE	RMSE	Correlación
DHT22	0,626	0,395	0,628	0,997
AM2315c	0,679	0,513	0,716	0,941
Humedad suelo				
Sensor vs. SE01	MAE	MSE	RMSE	Correlación
Capacitivo	0,787	0,906	0,952	0,876

Anexo 8: Dashboard web Grafana



Anexo 9: Base de datos InfluxDB

The screenshot shows the InfluxDB Data Explorer interface. The left sidebar displays the Schema Browser with the Bucket set to 'Monitoreo' and the Measurement set to 'LHT65'. Under the Fields section, 'Humedad' and 'Temperatura' are selected. The main panel shows a SQL query:

```
1 SELECT *
2 FROM "LHT65"
3 WHERE
4   time >= now() - interval '1 day'
5   AND
6   ("Humedad" IS NOT NULL OR "Temperatura" IS NOT NULL)
7
```

The query is ready (137ms) and the results are displayed in a table view. The table has 96 rows and shows data for Humedad, Temperatura, and time.

Humedad	Temperatura	time
39.2	21.81	2023-12-06T23:47:11.335Z
42.8	21.18	2023-12-06T00:02:13.486Z
42.9	21.12	2023-12-06T00:17:13.599Z

The screenshot shows the InfluxDB Data Explorer interface. The left sidebar displays the Schema Browser with the Bucket set to 'Monitoreo' and the Measurement set to 'SE01-LB'. Under the Fields section, 'Conduct_soil', 'Temp_soil', and 'Water_soil' are selected. The main panel shows a SQL query:

```
1 SELECT *
2 FROM "SE01-LB"
3 WHERE
4   time >= now() - interval '1 day'
5   AND
6   ("Temp_soil" IS NOT NULL OR "Water_soil" IS NOT NULL OR "Conduct_soil" IS NOT NULL)
7
```

The query is ready (207ms) and the results are displayed in a table view. The table has 96 rows and shows data for Conduct_soil, Temp_soil, time, and Water_soil.

Conduct_soil	Temp_soil	time	Water_soil
268	21.17	2023-12-06T23:46:05.554Z	28.36
316	20.71	2023-12-06T00:01:24.559Z	21.91
314	20.69	2023-12-06T00:16:24.346Z	21.89