



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS  
PRIMER CLAUSTRO UNIVERSITARIO DE COLOMBIA  
T U N J A

**AUTOMATED ELECTRONIC SYSTEM TO PREVENT FROST DAMAGE TO CROPS**

**PHASE II**

Proyecto Final

Desarrollado por:

Anderson Esteban Salas Mahecha

Dirigido por:

Ing. Carlos Alberto Cardona Coy

Ing. Cesar Mauricio Galarza Bogotá

Ing. José Ricardo Casallas

Universidad Santo Tomás

Facultad De Ingeniería Electrónica

Tunja

2024



## EXONERACIÓN DE RESPONSABILIDADES

Como estudiante de la universidad Santo Tomás Entiendo que soy responsable de todos los conceptos, investigaciones, actividades, análisis y conclusiones involucrados con mi participación en las actividades fuera del campus de la Universidad. Asumo completa responsabilidad de todo lo estipulado dentro de este proyecto, eximo a la facultad de ingeniería electrónica y por supuesto a la universidad de cualquier responsabilidad.

*Anderson Salas*

---

Anderson Esteban Salas Mahecha



**Notas de Aceptación**

---

---

---

---

---

---

---

---

\_\_\_\_\_  
Firma del director

\_\_\_\_\_  
Firma del codirector

\_\_\_\_\_  
Firma del presidente del Jurado

\_\_\_\_\_  
Firma del Jurado

\_\_\_\_\_  
Firma del Jurado



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS  
PRIMER CLAUSTRO UNIVERSITARIO DE COLOMBIA  
T U N J A

## DEDICATORIA

Dedicado a todos los interesados en la ingeniería y sus ramas de aplicación; dedicado a las personas y no a los humanos; dedicado al agradecimiento de poder adquirir conocimiento.



## AGRADECIMIENTOS

Para empezar, quiero agradecer a mis padres por el constante apoyo recibido durante mi carrera profesional y toda mi vida. Agradezco por permitirme conocer esta nueva experiencia de vida, la cual será determinante para mi futuro y mi vida. Seguidamente, agradezco a las personas cercanas que han influido directa o indirectamente en la formación de la persona que soy. También agradezco a la rama docente de la universidad que me ha permitido desarrollar este proyecto, especialmente a mis directores y codirectores de grado, quienes me han permitido, con su consejo y ayuda, lograr el desarrollo de este proyecto. Finalmente, agradezco el apoyo financiero por parte de IEEE EDS – SIGHT.



## Tabla de Contenido

1	Introducción.....	9
2	Planteamiento del problema .....	10
2.1	Definición del Problema.....	10
2.2	Delimitación del problema.....	10
3	Justificación.....	12
3.1	Impacto de las heladas en los cultivos .....	12
3.2	Estadísticas temperatura en Tunja.....	13
4	Objetivos.....	17
4.1	General: .....	17
4.2	Específicos: .....	17
5	Estado del arte .....	18
5.1	Internacional.....	18
5.1.1	Sistemas autónomos para la prevención de heladas. ....	18
5.1.2	Cultivos inteligentes.....	18
5.2	Nacional .....	19
5.2.1	Primera fase .....	19
5.2.2	Machine learning .....	20
6	Marco Teórico .....	20
6.1.1	Tipos de heladas.....	20
6.1.2	Wireless Fidelity (Wi-Fi).....	22
6.1.3	Internet of Things (IoT). ....	24
6.1.4	Thingspeak.....	25
7	Desarrollo del proyecto. ....	26
7.1	Diagrama de flujo.....	26
7.2	Fase 1: Diseño estación de meteorología: .....	27
7.3	Fase 2: Tarjetas micro controladas.....	28
7.4	Fase 3: pruebas de campo.....	28
7.5	Fase 4: Sistema de riego:.....	29
7.6	Fase 5: Diseño sistema fotovoltaico.....	29



7.7	Presupuesto.....	30
8	Análisis de Resultados.....	30
8.1	Listado.....	30
8.2	Tarjetas micro controladas.....	31
8.2.1	Diseño Circuito.....	32
8.2.2	Diseño Pagina.....	35
8.3	Pruebas de campo.....	37
9	Conclusiones.....	51
10	Trabajos futuros.....	53
11	Anexos.....	54
12	Bibliografía.....	55

### Lista de Figuras

Figura 1	Cultivo (Google., 2024).....	11
Figura 2	Cultivo 2 (Google., 2024).....	11
Figura 3	Arquitectura clásica (Espressif, docs.espressif.com, s.f.).....	23
Figura 4	Arquitectura tipo mesh (Espressif, docs.espressif.com, s.f.).....	24
Figura 4	Diagrama de flujo (Fuente: Propia).....	26
Figura 6	Círculo versión 1 (Fuente: Propia).....	34
Figura 7	Implementación versión 1 (Fuente: Propia).....	35
Figura 8	Página web (Fuente: Propia).....	36
Figura 9	Versión 2 (Fuente: Propia).....	37
Figura 10	Implementación versión 2 (Fuente: Propia).....	38
Figura 11	Versión 2 cambio de panel (Fuente: Propia).....	39
Figura 12	Router (Fuente: Propia).....	39
Figura 13	Ubicación puntos de medida (Fuente: Propia).....	40
Figura 14	Punto de activación (Fuente: Propia).....	41
Figura 15	Sistema de Riego (Fuente: Propia).....	42
Figura 16	Resultados Estación 1 (Fuente: Propia).....	43
Figura 17	Resultados Estación 2 (Fuente: Propia).....	44
Figura 18	Resultados Estación 3 (Fuente: Propia).....	45
Figura 19	Resultados Estación 4 (Fuente: Propia).....	46
Figura 20	Implementación cultivo 2 (Fuente: Propia).....	47
Figura 21	Resultados Estación 1, Ubicación 2 (Fuente: Propia).....	48
Figura 22	Resultados Estacion2, Ubicación 2 (Fuente: Propia).....	49



### Lista de Tablas

Tabla 1 Temperaturas mínimas anual registrados para Tunja y regiones cercanas. (Fuente: (Olga Cecilia González Gómez, Carlos Felipe Torres Triana. , 2012)).....	13
Tabla 2 Temperatura Mínima anual registradas en Cundinamarca y regiones limítrofes. (Fuente: (Olga Cecilia González Gómez, Carlos Felipe Torres Triana. , 2012)) .....	14
Tabla 3 Nasa Coordenadas para el cultivo 1. (Fuente: (Nasa, 2024)) .....	15
Tabla 4 Nasa Coordenadas para el cultivo 2. (Fuente: (Nasa, 2024)) .....	16
Tabla 5 Sensores (Fuente: Propia) .....	31
Tabla 6 Microcontroladores (Fuente: Propia).....	32



## 1 Introducción

Las heladas son un fenómeno producido por las bajas temperaturas o la acumulación de atmósferas creadas por accidentes geográficos. En Colombia, este fenómeno afecta de manera considerable la producción agrícola de todo el territorio, aunque se observa con mayor fuerza en las regiones de Boyacá y Cundinamarca. Este documento detalla el despliegue de un sistema electrónico que emplea un ESP32 para monitorizar la temperatura ambiente y la humedad relativa del entorno agrícola. Este sistema, financiado por IEEE SIGHT, se encarga de recopilar y transmitir datos a ThingSpeak en intervalos programados, al tiempo que detecta condiciones climáticas que puedan afectar un cultivo, como las heladas. En caso de cumplir las condiciones de posible helada, el ESP32 activará un sistema de riego por aspersión para proteger los cultivos. Durante el día, el sistema permanece en modo de reposo para cargar baterías a través de energía solar, reanudando sus funciones de registro y monitoreo durante la noche.



## 2 Planteamiento del problema

¿Cómo podría la implementación de un sistema inteligente mitigar el impacto socioeconómico de las heladas en Boyacá?

### 2.1 Definición del Problema

Colombia destaca a nivel global por su rica biodiversidad, lo que le permite producir una amplia gama de alimentos. Además, la presencia de distintos pisos térmicos en todo el país fomenta un flujo económico significativo en la región. No obstante, lamentablemente, en las regiones montañosas, como las cordilleras, se enfrenta a un desafío considerable: la presencia de heladas debido a la elevada altitud y las bajas temperaturas en estas áreas causa pérdidas considerables en los cultivos de papa, cebolla, maíz, florales y frutales.

### 2.2 Delimitación del problema

Boyacá sobresale en la producción regional de alimentos, incluyendo papa, cebolla y arveja. No obstante, las condiciones climáticas en la región, como la alta altitud o las bajas temperaturas, han provocado considerables pérdidas económicas y sociales en el departamento, lo cual a su vez afecta al país. En respuesta a este desafío, se está implementando un prototipo destinado a prevenir las heladas. En primera instancia, se están llevando a cabo pruebas en condiciones de laboratorio para garantizar los límites de funcionamiento del prototipo. Estas pruebas incluyen ensayos en un entorno controlado, como una nevera, para simular las condiciones extremas de temperatura. Posteriormente, se realizó pruebas con diferentes versiones del prototipo en una finca cercana al municipio de Chivata, Boyacá, con las siguientes coordenadas: 5°32'14.3"N 73°17'06.5"W y una elevación aproximada de 3022 metros sobre el nivel del mar.

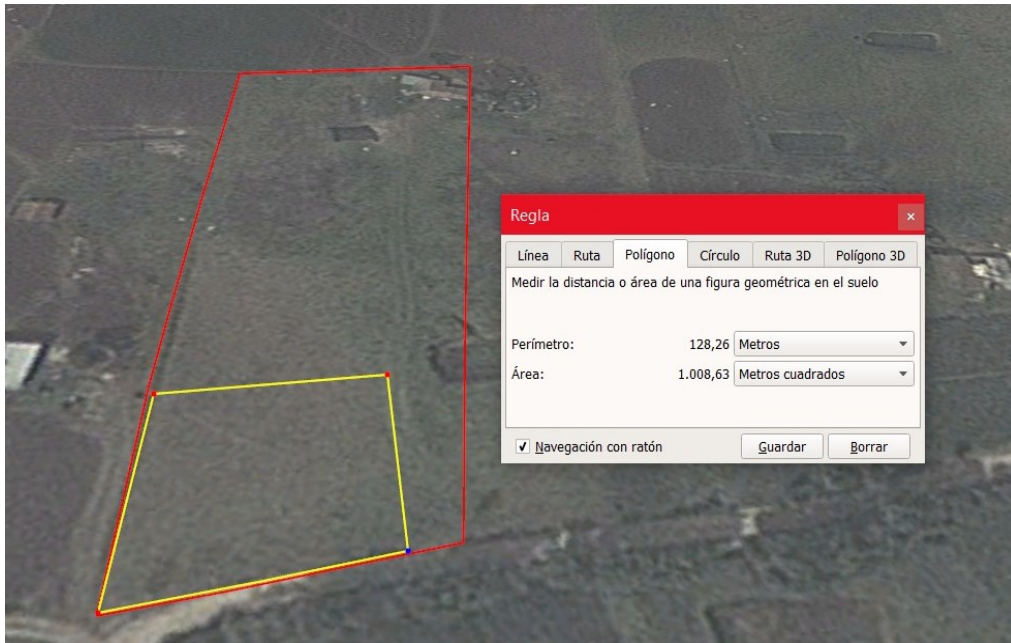


Figura 1 Cultivo (Google., 2024)

En la figura 1, se observa una imagen satelital de la extensión del predio a trabajar donde el recuadro resaltado de color rojo corresponde a el perímetro de la finca y el recuadro amarillo corresponde a el perímetro del cultivo activo de papa.

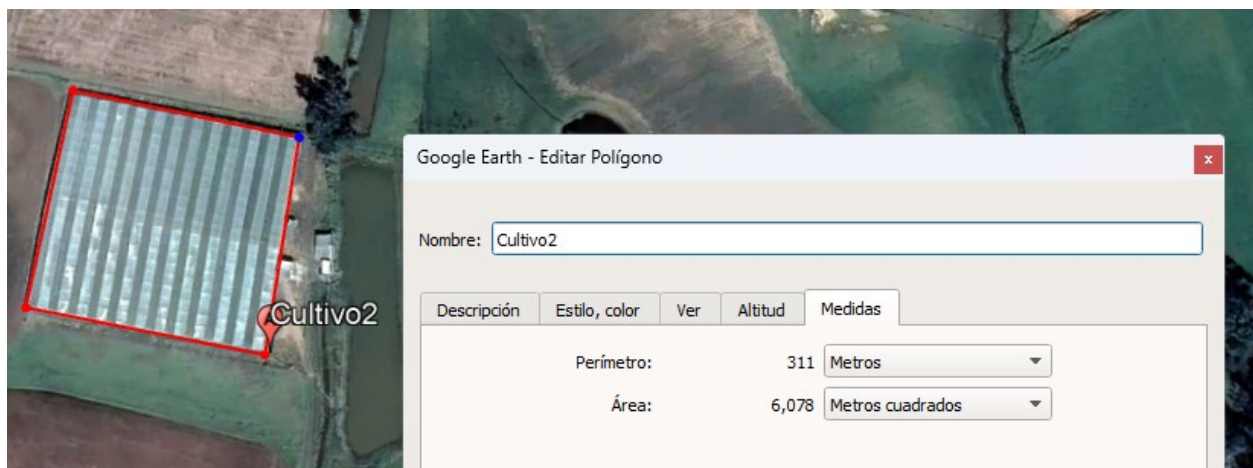


Figura 2 Cultivo 2 (Google, 2024)



Después de haber implementado el sistema, se llevó a cabo una prueba en un lugar diferente al planificado inicialmente (figura 1). En este caso, se trata de un cultivo de claveles que también podría verse afectado por las heladas. El cultivo está ubicado (figura 2) en las siguientes coordenadas [5°34'13.3"N 73°12'11.3"W], a una elevación aproximada de 2700 metros sobre el nivel del mar.

### 3 Justificación

#### 3.1 Impacto de las heladas en los cultivos

De acuerdo a medios de comunicación locales y el IDEAM, en promedio, las heladas afectan a los cultivos que se encuentran en altiplanos o relacionados con las cordilleras. Generalmente, los más afectados son aquellos ubicados en los departamentos de Boyacá y Cundinamarca, donde a lo largo de los años se han presentado pérdidas de consideración, entre las cuales se incluyen:

- 2021, de acuerdo a (Espectador, 2021), en la región de Cundinamarca se estiman pérdidas superiores a las 9000 hectáreas de cultivos frutales y de maíz debido a las fuertes heladas de la región lo cual ha registrado temperaturas inferiores a los 0° Celsius en diferentes regiones estratégicas, particularmente se resalta Chiquinquirá y Tocancipá,
- 2020, según (PORTAFOLIO, 2020), las pérdidas por heladas en la región de Boyacá lograron superar las 40mil hectáreas de cultivos afectados resaltado que las especies con mayor registro de perdida corresponde a cultivos de Papa, incluso se resalta el municipio de Ventaquemada como uno de los mayores productores afectados y afirma las pérdidas que se generaron en esa zona.



### 3.2 Estadísticas temperatura en Tunja.

Se tomará como referencia la capital de Boyacá debido a que su ubicación geográfica es cercana al lugar seleccionado y al ser ciudad capital tiene un mayor registro de datos climatológicos. Para iniciar, de acuerdo con la tabla 1 (Olga Cecilia González Gómez, Carlos Felipe Torres Triana., 2012) se muestran los datos obtenidos de temperaturas mínimas en Tunja desde 1971 hasta 2011 por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), se destaca que estos son los datos mínimos registrados. Por lo tanto, se marca el día y el año de esta muestra, lo cual posibilita tener diferentes años dentro de la tabla.

Estacion		Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
UPTC	Promedio	7,34	8,15	9,02	9,81	9,79	9,21	8,55	8,48	8,19	8,79	9,04	8,05
Tunja	Absoluta	-0,6	-1,1	-0,2	3,8	4	2,2	1,8	2,2	3,4	3,2	3	0,4
BOY	dia/año	3/10	5/85	7/08	3/08	23/06	24/94	1/85	29/97	6/95	10/88	26/85	19/85
Apto A Lleras C	Promedio	3,47	4,21	5,88	7,58	7,70	6,78	5,90	5,89	5,55	6,76	7,28	4,99
Sogamoso	Absoluta	-6,2	-8,8	-6,8	-4	-0,8	-0,9	-4	-2,4	-2,4	-2,6	-1,2	-7
BOY	dia/año	29/01	15/95	24/92	15/87	25/99	4/08	13/86	29/97	30/09	9/09	12/87	19/85
Villa Carmen	Promedio	7,42	8,07	8,83	9,41	9,54	9,10	8,56	8,44	8,01	8,40	8,76	7,91
Samaca	Absoluta	-2	-2,9	1,2	1	1,2	1,2	-1,4	0,4	1	1,2	1,4	-4,2
BOY	dia/año	3/10	4/85	13/01	30/84	8/84	29/89	1/85	29/97	17/92	24/88	24/01	30/93

Tabla 1 Temperaturas mínimas anual registrados para Tunja y regiones cercanas. (Fuente: (Olga Cecilia González Gómez, Carlos Felipe Torres Triana., 2012))

En la Tabla 1, se observan temperaturas por debajo de 0 °C (32 °F) a finales y principios de año en la región. De acuerdo al documento, se ha seleccionado específicamente la estación de medida que registra datos en la Ciudad de Tunja, cuyas coordenadas son: 5°33'13.3"N, 73°21'19.0"W, debido a que es una de las más antiguas en el sector. Esto permite obtener un mayor rango de referencia sobre temperaturas mínimas. Actualmente, se encuentra aproximadamente a 15 km del cultivo en el cual se planea realizar las pruebas



Ahora, se examinan los datos proporcionados para el departamento de Cundinamarca (Tabla 2).

Dado que son departamentos limítrofes, varios puntos de referencia obtienen datos de ambos departamentos, lo que proporciona otra referencia de temperatura.

Estacion		Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
<b>Tibaitata</b>	Promedio	4,74	5,65	6,92	7,98	8,09	7,38	6,72	6,44	6,11	6,96	7,14	5,73
Mosquera	Absoluta	-4,2	-5,4	-3,8	-0,2	0	-0,8	-1,8	-2,6	-1,4	-1	-3,2	-4,6
CUN	dia/año	20/81	4/77	14/78	13/85	10/79	5/74	19/86	23/77	22/02	16/72	30/77	31/93
<b>Santillana</b>	Promedio	5,31	6,14	7,09	8,08	8,33	7,75	7,24	6,90	6,64	7,11	7,12	5,95
Tabio	Absoluta	-4,2	-1,8	-1,8	0	1	-3	0,5	-2,4	-3,4	-0,8	-1	-7
CUN	dia/año	3/95	22/85	21/85	13/85	21/85	30/85	17/00	30/97	17/97	13/85	8/87	31/93
<b>La Cosecha</b>	Promedio	4,70	5,70	6,69	7,77	7,99	7,72	7,03	6,87	6,57	7,04	7,11	5,99
Zipaquira	Absoluta	-6	-6	-5	-2	-0,6	-0,4	-2	-0,4	-3	-4	-5	-4,8
CUN	dia/año	22/94	7/94	10/02	15/87	17/88	7/88	17/01	19/00	5/97	1/01	24/01	31/93
<b>Tachi</b>	Promedio	4,49	5,65	6,67	8,15	8,28	8,09	7,64	7,29	6,74	7,22	6,97	5,84
Subachoque	Absoluta	-3,6	-5,6	-4,2	-0,4	0,4	0	-1,4	-0,4	-1,6	0,6	-2,4	-2,6
CUN	dia/año	26/04	5/07	24/92	12/80	6/84	1/94	1/85	30/97	17/92	31/92	30/77	31/93
<b>La Ramada</b>	Promedio	7,04	7,05	7,79	8,83	9,18	8,49	8,28	8,04	7,66	8,42	8,30	7,13
Tunja	Absoluta	-4	-3,2	-1	-2	1,2	1,8	-1	0	-0,9	2,1	-0,5	-4,1
CUN	dia/año	3/01	4/85	9/87	15/87	29/87	30/85	1/85	9/01	11/87	10/88	8/87	18/85

Tabla 2 Temperatura Mínima anual registradas en Cundinamarca y regiones limítrofes. (Fuente: (Olga Cecilia González Gómez, Carlos Felipe Torres Triana., 2012))

En la Tabla 2, se confirma que las temperaturas más bajas ocurren principalmente en los primeros meses del año. En esta tabla, se han tomado los datos de la estación La Ramada, la cual proporciona información sobre la ciudad previamente seleccionada. Las coordenadas asociadas a La Ramada son: 5°20'00.0"N, 73°44'00.0"W. Esta elección no solo enriquece nuestros datos para la ciudad, sino que también brinda una perspectiva adicional sobre las temperaturas en el departamento colindante al punto de medida seleccionado.

Por otro lado, la fuente de datos de la NASA Prediction of Worldwide Energy (Nasa, 2024) es ampliamente reconocida a nivel internacional por su exhaustividad en la recopilación de datos climáticos, con un enfoque particular en energías renovables, edificios sostenibles y agroclimatología. Esta especialización se alinea directamente con los objetivos de la investigación,



permitiendo el acceso a datos específicos y detallados para el punto de experimentación seleccionado. En este contexto, la precisión y amplitud de esta fuente enriquecerán significativamente el análisis y la comprensión de las condiciones climáticas relevantes.

PARAMETER	YEAR	JAN	FEB	MAR	APR
T2M_MIN	1981	5.53	7.86	5.73	9.25
T2M_MIN	1982	2.94	7.4	6.79	8.76
T2M_MIN	1983	8.12	6.87	6.77	9.13
T2M_MIN	1984	4.77	7.23	5.47	6.97
T2M_MIN	1985	6.43	2.04	8.4	6.95
T2M_MIN	1986	7.01	7.75	7.1	8.72
T2M_MIN	1987	6.15	7.63	8.84	8.62
T2M_MIN	1988	5.62	7.58	5.78	8.42
T2M_MIN	1989	5.74	7.01	6.68	7.62
T2M_MIN	1990	7.94	8.4	7.06	8.01
T2M_MIN	1991	3.89	5.87	5.51	8.62
T2M_MIN	1992	4.83	7.05	7.05	7.83
T2M_MIN	1993	6.25	6.01	6.08	8.22
T2M_MIN	1994	4.5	5.31	8.26	8.91
T2M_MIN	1995	5.92	4.41	7.26	8.55
T2M_MIN	1996	5.9	7.82	7.76	7.98
T2M_MIN	1997	7.81	8.08	6.03	6.76
T2M_MIN	1998	6.01	8.2	7.47	9.65
T2M_MIN	1999	8.44	8.54	7.8	6.83
T2M_MIN	2000	5.64	6.12	7.58	7.37
T2M_MIN	2001	4.52	4.59	7.29	7.55
T2M_MIN	2002	5.3	5.73	6.48	7.84
T2M_MIN	2003	6.86	6.98	6.59	8.07
T2M_MIN	2004	4.94	5.12	8.44	8.88
T2M_MIN	2005	8.66	6.72	6.92	8.85
T2M_MIN	2006	6.09	4.4	8.22	9.29
T2M_MIN	2007	6.79	4.48	8.41	8.62
T2M_MIN	2008	4.45	7.12	5.85	8.08
T2M_MIN	2009	7.71	8.47	8.8	9.1
T2M_MIN	2010	3.44	8.84	7.01	8.91
T2M_MIN	2011	5.34	5.76	7.41	8.73

Tabla 3 Nasa Coordenadas para el cultivo 1. (Fuente: (Nasa, 2024))

En la Tabla 3, se presentan los datos promedio de las temperaturas mínimas para los meses de enero, febrero, marzo y abril, abarcando el período de 2001 a 2011 para el cultivo mostrado en la figura 1. Estos promedios mensuales revelan temperaturas bajas con una alta probabilidad de haber experimentado heladas. Dado que se trata de promedios mensuales, existe la posibilidad de que se



hayan registrado temperaturas perjudiciales para los cultivos de papa en lapsos cortos. Cabe destacar que estos datos provienen de una fuente de información satelital, lo que confiere una dimensión adicional de precisión a nuestra evaluación climática.

Column1	Column2	Column3	Column4	Column5	Column6
BEGIN HEADER, NASA/POWER CERES/MERRA2 Native Resolution Monthly and Annual Dates (month/day/year): 01/01/1981 through 12/31/2011 ,Location: Latitude 5.5704 Longitude -73.2031,Elevation from MERRA-2: Average for 0.5 x 0.625 degree lat/lon region = 2557.41 meters,The value for missing source data that cannot be computed or is outside of the sources availability range: -999,Parameter(s): T2M_MIN MERRA-2 Temperature at 2 Meters Minimum (C),END HEADER					
PARAMETER	YEAR	JAN	FEB	MAR	APR
T2M_MIN	1981	5.53	7.86	5.73	9.25
T2M_MIN	1982	2.94	7.4	6.79	8.76
T2M_MIN	1983	8.12	6.87	6.77	9.13
T2M_MIN	1984	4.77	7.23	5.47	6.97
T2M_MIN	1985	6.43	2.04	8.4	6.95
T2M_MIN	1986	7.01	7.75	7.1	8.72
T2M_MIN	1987	6.15	7.63	8.84	8.62
T2M_MIN	1988	5.62	7.58	5.78	8.42
T2M_MIN	1989	5.74	7.01	6.68	7.62
T2M_MIN	1990	7.94	8.4	7.06	8.01
T2M_MIN	1991	3.89	5.87	5.51	8.62
T2M_MIN	1992	4.83	7.05	7.05	7.83
T2M_MIN	1993	6.25	6.01	6.08	8.22
T2M_MIN	1994	4.5	5.31	8.26	8.91
T2M_MIN	1995	5.92	4.41	7.26	8.55
T2M_MIN	1996	5.9	7.82	7.76	7.98
T2M_MIN	1997	7.81	8.08	6.03	6.76
T2M_MIN	1998	6.01	8.2	7.47	9.65
T2M_MIN	1999	8.44	8.54	7.8	6.83
T2M_MIN	2000	5.64	6.12	7.58	7.37
T2M_MIN	2001	4.52	4.59	7.29	7.55
T2M_MIN	2002	5.3	5.73	6.48	7.84
T2M_MIN	2003	6.86	6.98	6.59	8.07
T2M_MIN	2004	4.94	5.12	8.44	8.88
T2M_MIN	2005	8.66	6.72	6.92	8.85
T2M_MIN	2006	6.09	4.4	8.22	9.29
T2M_MIN	2007	6.79	4.48	8.41	8.62
T2M_MIN	2008	4.45	7.12	5.85	8.08
T2M_MIN	2009	7.71	8.47	8.8	9.1
T2M_MIN	2010	3.44	8.84	7.01	8.91
T2M_MIN	2011	5.34	5.76	7.41	8.73

Tabla 4 Nasa Coordenadas para el cultivo 2. (Fuente: (Nasa, 2024))

En la Tabla 4 se presentan los datos correspondientes al cultivo representado en la figura 2. En esta tabla se destacan algunas temperaturas que pueden tener un impacto significativo en los cultivos debido a la posibilidad de heladas.



## 4 Objetivos

### 4.1 General:

Desarrollar un sistema electrónico de riego controlado, alimentado por energía solar, que utilice datos de sensores climáticos para mitigar los efectos adversos de las heladas en los cultivos de la Región A. El propósito es optimizar la protección frente a condiciones climáticas desfavorables mediante un riego adaptativo basado en datos climáticos, mejorando la eficiencia del riego y reduciendo los riesgos asociados a las heladas.

### 4.2 Específicos:

1. Idear un prototipo de estación climatológica confiable y de bajo costo, diseñado para medir con precisión la temperatura y la humedad relativa, con especial atención en la facilidad de replicar este diseño en múltiples unidades.
2. Implementar un sistema de monitoreo remoto de cultivos utilizando tarjetas microcontroladoras IoT para mejorar la gestión agrícola.
3. Evaluar la efectividad y fiabilidad del prototipo en condiciones reales para garantizar su viabilidad y utilidad práctica.
4. Crear un sistema de riego inteligente que pueda detectar heladas y tomar medidas preventivas para proteger los cultivos.
5. Diseñar un sistema fotovoltaico autónomo que proporcione energía suficiente para mantener en funcionamiento los sistemas de medición del proyecto durante todo el tiempo necesario.



## 5 Estado del arte

### 5.1 Internacional

#### 5.1.1 Sistemas autónomos para la prevención de heladas.

En la agricultura actual, existe un fuerte interés y enfoque en mejorar la calidad de producción y reducir las pérdidas de alimentos. Para lograr esto, se han propuesto sistemas que pueden adaptarse según los recursos disponibles en cada región. Según una investigación realizada por (Lamb, 2009), se ha desarrollado un sistema que utiliza sistemas de calentamiento para evitar los daños causados por las bajas temperaturas en la producción de vino. Además, en términos de prevención mediante el riego, (Hu Yongguang, Zhao Chen, Liu Pengfei, Asante Eric Amoah, Li Pingping, 2016) y su equipo han identificado la relación entre la distancia de riego, la cantidad de agua distribuida por hora en milímetros (mm/h) y la temperatura ambiente. Como resultado, se ha logrado obtener una temperatura superior a los 1 °C (34 °F), Es importante destacar que existen numerosos métodos para prevenir las pérdidas por riego, pero se hace énfasis en los mencionados anteriormente debido a su posible aplicación en el proyecto en desarrollo.

#### 5.1.2 Cultivos inteligentes.

En la actualidad, el avance tecnológico ha impulsado la necesidad de mejorar la calidad de producción de alimentos y reducir los costos de producción. Para lograrlo, se han diseñado sistemas que puedan recolectar información,



procesarla, tomar decisiones y mantener una comunicación fiable y segura desde cualquier parte del mundo. Según la comparación realizada por (Ian Zhou , Justin Lipman,Mehran Abolhasan,Negin Shariati,David W. Lamb, 2020), los métodos de prevención de heladas tienen una amplia literatura que se ha ido forjando a lo largo de los años y que se ha adaptado a nuevas tecnologías de predicción que utilizan algoritmos de aprendizaje automático, como la regresión lineal y la regresión logística, entre otros. Además, se destaca la importancia de considerar el terreno donde se ubicará el sistema inteligente para determinar la relación de distancia y consumo de diferentes protocolos de comunicación (IoT). Por otro lado, (Alejandro Castañeda-Miranda, Victor M. Castaño, 2020)ha desarrollado un sistema innovador que utiliza señales PWM para controlar una motobomba en función del riesgo de heladas pronosticado para los cultivos. Esta decisión se basa en una red neuronal desarrollada por el mismo equipo, lo que les permite analizar múltiples variables climáticas y activar el sistema de riego de manera gradual y escalonada según el nivel de riesgo anticipado.

## **5.2 Nacional**

### **5.2.1 Primera fase**

Este proyecto se inicia con una fase de pruebas fundamentales. En el caso detallado por (Angie Álvarez,Angie Hernández, 2021), se pudo registrar los datos recopilados por los prototipos mediante la tecnología Bluetooth. Paralelamente, se llevó a cabo un análisis fluvial y diversas



pruebas de laboratorio enfocadas en el funcionamiento de la bomba responsable del sistema de riego, con el objetivo de mitigar los efectos de las heladas.

El primer prototipo reveló que, en extensiones considerablemente grandes de cultivo, la eficiencia proyectada al emplear paneles solares para alimentar el sistema de riego podría resultar insuficiente. Por consiguiente, en ciertos escenarios, sería pertinente integrar el sistema de recolección de datos con un sistema de riego ya existente en los cultivos.

### **5.2.2 Machine learning**

Dado que las heladas son un fenómeno frecuente en el altiplano cundiboyacense, se ha reconocido la necesidad de desarrollar un método para predecirlas de manera efectiva en esta región. Con este fin, (Caro, 2022) ha ideado un algoritmo altamente eficiente capaz de generar proyecciones sobre la probabilidad de ocurrencia de heladas en el área. Este algoritmo se basa en modelos de aprendizaje de máquinas, lo que proporciona una base sólida para establecer alertas tempranas en la región específica. Esto permitirá la implementación de planes de contingencia que ayuden a evitar pérdidas de cultivos debido a las heladas.

## **6 Marco Teórico**

### **6.1.1 Tipos de heladas**

En el territorio colombiano, se encuentran todos los pisos térmicos. Debido a esta variedad, es posible identificar diferentes tipos de heladas en zonas específicas. A continuación, se enumeran las más comunes de acuerdo a (Salas, 1982):



- **Heladas por Evaporación:**

La helada por evaporación es un fenómeno climático en el que la congelación ocurre debido a la rápida evaporación del agua en una superficie expuesta al aire frío y seco. Se caracteriza por la baja humedad atmosférica y temperaturas cercanas o inferiores al punto de congelación. Durante este proceso, la evaporación del agua se acelera por el flujo de aire, liberando calor latente en forma de calorías provenientes de los cultivos. Como resultado, la superficie se enfría rápidamente, formando una capa de hielo que puede causar daños significativos en los cultivos, a menudo destruyéndolos por completo.

- **Helada por Radiación:**

Las heladas por radiación son un tipo de helada que se produce debido a la pérdida de calor radiactivo en las noches despejadas y sin viento. Durante estas condiciones, la superficie terrestre emite calor hacia la atmósfera más fría, lo que provoca un enfriamiento del suelo y del aire adyacente. A medida que la temperatura desciende, el punto de rocío se alcanza y el vapor de agua en el aire se condensa y se congela, formando escarcha o hielo en las superficies expuestas, hay dos fenómenos característicos.

- ✓ **Helada blanca:** Se produce cuando hay humedad en el aire y la temperatura disminuye, lo que provoca la formación de una fina capa de rocío en los cultivos. A medida que esta humedad se congela, se forma



una capa de hielo con cristales visibles que adoptan diversas formas según la estructura y posición de las plantas.

- ✓ **Helada negra:** Se produce cuando la temperatura desciende en un cultivo y la humedad del aire es extremadamente baja. En este caso, las partículas de agua presentes dentro de la planta se congelan, lo que resulta en la ruptura de los tejidos y la formación de necrosis debido a las bajas temperaturas. Este fenómeno es altamente perjudicial y representa un riesgo significativo para los cultivos.

### 6.1.2 Wireless Fidelity (Wi-Fi)

De acuerdo a lo expuesto por (Steven M. Hernandez, Deniz Erdag, Eyuphan Bulut, 2021) este tipo de comunicación permite tener múltiples formas de configuración enfocadas a conectar un objetivo a internet. Su versatilidad se aplica en sectores como agricultura, ciudades inteligentes, logística y monitoreo remoto, ofreciendo soluciones rentables para el seguimiento de activos, gestión de sensores y control de iluminación. En América, su amplia cobertura y compatibilidad entre fabricantes impulsan su adopción, convirtiéndola en una tecnología confiable y versátil para impulsar la conectividad en el entorno de IoT.



### 6.1.2.1 Arquitecturas de conexión.

Dado que se desea hacer uso de la tarjeta ESP32, se recurre a la documentación oficial (Espressif, docs.espressif.com, s.f.) para identificar las diferentes configuraciones de trabajo disponibles al usar el módulo Wifi, dado que tiene múltiples modos de trabajo como punto de acceso, cliente o router de internet. Se decide mostrar únicamente las arquitecturas de conexión con las cuales se desea trabajar.

- 1) **Clásica o "Punto a Punto":** Una red Wifi tradicional consiste en tener múltiples clientes conectados a un solo punto de red, donde la comunicación es bidireccional entre el punto de acceso a internet (Router) y el cliente. Esto implica que no existe una conexión directa entre los clientes dentro de la red Wifi.

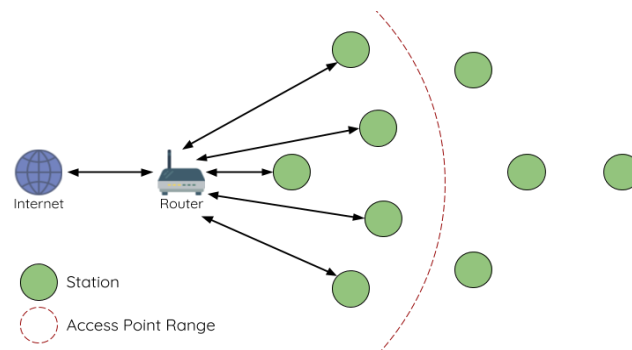


Figura 3 Arquitectura clásica (Espressif, docs.espressif.com, s.f.)



2) **Mesh Network (WMN):** Una red mallada o mesh network, permite la comunicación entre el enrutador y los clientes, con la diferencia de que cada cliente tiene la capacidad de redirigir el flujo de información según el punto con mejor velocidad que tenga. Cada punto se entiende como un cliente, de manera que cada uno actúa como un punto de enrutamiento entre diferentes clientes y el enrutador principal.

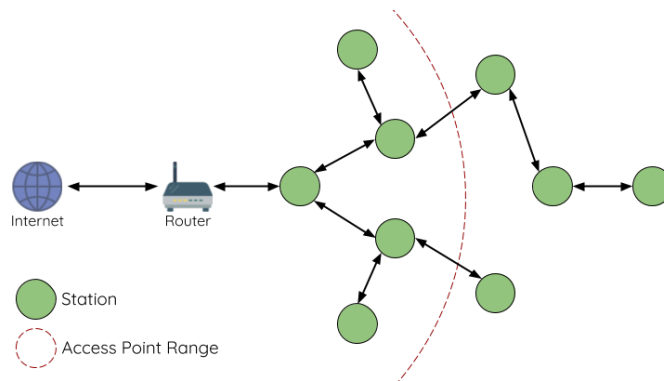


Figura 4 Arquitectura tipo mesh (Espressif, docs.espressif.com, s.f.)

### 6.1.3 Internet of Things (IoT).

El Internet de las cosas se comprende como un nuevo pilar en la conexión entre humanos y máquinas, el cual encapsula la capacidad de conectar cualquier 'cosa' a Internet y llevar a cabo acciones según el uso o la aplicación de dicha 'cosa' en cuestión. Esto abarca desde elementos de uso cotidiano hasta elementos industriales (Simone Cirani, Gianlugi Ferrari, Marco Picone, Luca Veltri, 2019).



#### 6.1.4 Thingspeak.

Plataforma de análisis de IoT que permite agregar, visualizar y analizar datos en tiempo real en la nube. Con la capacidad de enviar datos desde dispositivos, crear visualizaciones instantáneas y enviar alertas mediante servicios web. Además, con el análisis [MATLAB®](#) integrado, los usuarios pueden realizar análisis avanzados sin la necesidad de configurar servidores ni desarrollar software web.



## 7 Desarrollo del proyecto.

### 7.1 Diagrama de flujo

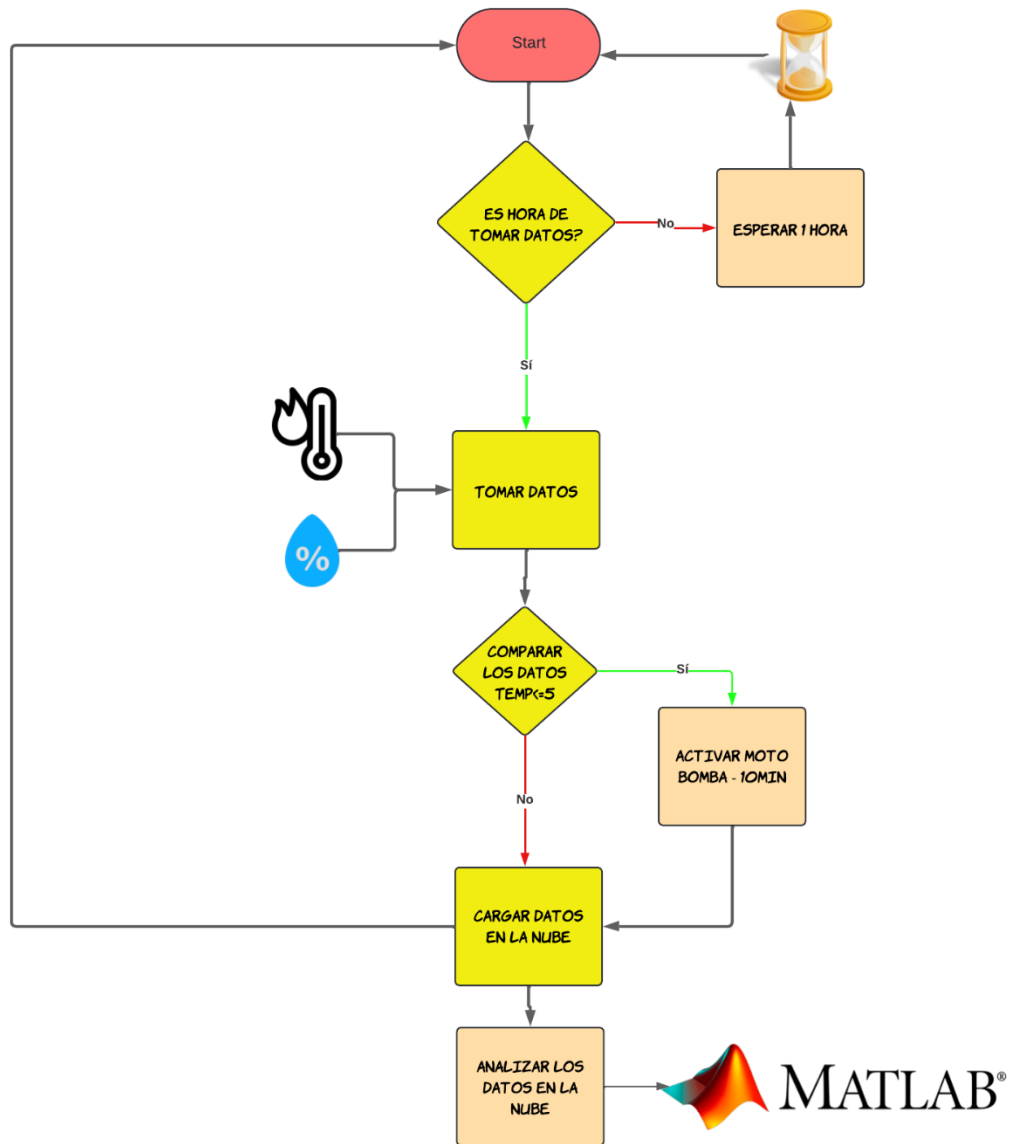


Figura 5 Diagrama de flujo (Fuente: Propia)



En la figura 4, se observa el objetivo principal del proyecto, con el cual se planea tomar datos sobre temperatura y humedad. Esto nos permite identificar si hay condiciones que puedan afectar la integridad de los cultivos. Después de esto, se implementará una conexión a internet con la cual se puedan cargar los datos obtenidos a una página web. Esto nos permitirá, más adelante, usar gráficas de MATLAB para comprender con mejor claridad los datos obtenidos durante la muestra.

## 7.2 Fase 1: Diseño estación de meteorología:

Para iniciar, se procede a la identificación de las condiciones a las cuales será expuesto el prototipo de sensores disponibles de acuerdo al terreno expuesto en la figura 1. Se han determinado las siguientes condiciones preliminares de medida:

### ➤ Rango de medida:

- Temperatura: -10 °C a 100 °C
- Humedad: 0% a 100%

### ➤ Bajo consumo:

- Voltaje: entre 3v y 5v
- Corriente máxima: 500mA

### ➤ Tipo de Comunicación

- Serial
- I2c
- Análoga / Digital



### 7.3 Fase 2: Tarjetas micro controladas

Durante esta etapa, se está llevando a cabo la categorización de las tarjetas microcontroladoras disponibles que permitan una integración efectiva con la arquitectura de IoT. Dado que se han presentado dos arquitecturas de conexión, es fundamental que las tarjetas seleccionadas cuenten con capacidades de conexión a internet integradas o que puedan adaptarse mediante un adaptador de red.

Se deben considerar tarjetas que cumplan con los siguientes criterios:

- Conexión a internet incorporada o capacidad para adaptarse a un adaptador de red.
- Suficiente potencia de procesamiento y memoria para manejar las tareas de recopilación, procesamiento y transmisión de datos.
- Soporte para los protocolos de comunicación requeridos para la interacción con otros dispositivos y servicios en la red.

### 7.4 Fase 3: pruebas de campo

#### ➤ Ubicación 1

En la figura 1, se han situado 4 prototipos diseñados para la recopilación de datos y su posterior carga en una página web. Se llevaron a cabo dos pruebas en esta ubicación. En la primera instancia, se contaba con un cultivo de papa, con el cual se realizaron pruebas de conexión utilizando la arquitectura mostrada en la figura 3. Durante estas pruebas, se evaluó la capacidad de los prototipos para recopilar datos relevantes sobre las condiciones ambientales, así como su capacidad para transmitir estos datos de manera efectiva a través de la arquitectura de IoT implementada



## ➤ Ubicación 2

Para mejorar la cobertura de monitoreo, hemos optado por la arquitectura mostrada en la figura 4. Esta configuración nos permite una distribución más amplia entre los puntos de medición. En este escenario, nos encontramos con un invernadero que alberga un cultivo de claveles. Dado que el invernadero permite el paso de aire externo, existe el riesgo de heladas debido a la entrada de aire frío. Además, dentro del invernadero, contamos con un sistema de riego por aspersión de activación manual. Este sistema no solo regula la humedad necesaria para las plantas, sino que también se utiliza en ocasiones para prevenir heladas dentro del cultivo.

### 7.5 Fase 4: Sistema de riego:

En el sistema de riego propuesto, la motobomba eléctrica de 120V desempeña un papel crucial:

1. Verifica el funcionamiento del sistema y del mecanismo de activación AC.
2. Evalúa el tiempo y precisión de la activación del mecanismo.
3. Registra datos en la plataforma de IoT para monitorear el rendimiento del sistema en tiempo real.

### 7.6 Fase 5: Diseño sistema fotovoltaico.

Finalmente, se implementará un sistema de respaldo energético para mantener la alimentación constante del sistema de medición. Esta fase se realizará en paralelo con las etapas 2 y 3, lo que facilitará las pruebas del circuito diseñado junto con el sistema de energización propuesto. Dado que es vital mantener la conexión durante la noche para el registro continuo de datos, el sistema se



cargará durante el día y se activará automáticamente en la madrugada para garantizar un suministro ininterrumpido de energía.

## 7.7 Presupuesto

El presente proyecto es totalmente financiado por recursos de IEEE por un monto total de 5000 dólares americanos.

## 8 Análisis de Resultados.

### 8.1 Listado

Sensor	Temperatura	Humedad	Voltaje de Operación	Corriente Max	Comunicación
<b>Bme280</b> (Electronics, bme 280, 2018)	-40 °C a + 85 °C	0% RH a 100% RH	+ 1.7 V a + 3.6 V	3.6 µA	I2C o SPI
<b>Dht22</b> (Electronics, DHT22, 2021)	-40 °C a + 80 °C	0% RH a 100% RH	+ 3.3 V a + 5.5 V	1.5 mA	Digital
<b>Dht11</b>	0 °C a + 50 °C	20% RH a 95% RH	+ 3.5 V a + 5.5 V	300 µA	Digital
<b>Lm35</b> (Instruments, 2017)	-55 °C a 150 °C	-----	+ 4 V a + 30 V	10 mA	Análoga
<b>DS18B20</b> (Integrated, DS18B20, 2019)	-55 °C a +125 °C	-----	+3.0 V a +5.5 V	1.5 mA	Análoga
<b>MAX6675</b> (Integrated, MAX6675, 2021)	0 °C a +700 °C	-----	+ 3 V a + 5.5 V	50 mA	SPI



<b>Higrómetro HD-38 (Parmar, 2019)</b>	-----	0 % a 100 %	+ 3.3 V a + 12 V	30 mA	Analógica y Digital
--	-------	----------------	---------------------	-------	---------------------

*Tabla 5 Sensores (Fuente: Propia)*

La decisión final es usar el sensor DHT22 debido a que cumple con los requerimientos preestablecidos. Esto facilita el modelamiento del sistema, ya que permite tener el rango de medidas deseado. Además, su bajo consumo de energía permite conectarlo directamente a la placa seleccionada.

## 8.2 Tarjetas micro controladas

En esta etapa, se lleva a cabo la categorización de las tarjetas microcontroladoras disponibles que permitan la integración con la arquitectura de IoT, debido a que se han mostrado dos arquitecturas de conexión es necesario que la tarjeta, tenga conexión a internet o se pueda acoplar a un adaptador de red.

Tarjeta micro_controlador	Esp32 (Espressif, ESP32 Series Datasheet, 2024)	Arduino uno (Docs.arduino, 2024)	PIC16F877A (Microchip, 2013)	Raspberry pi pico (raspberrypi, 2024)	STM32F103C8T6 (STMicroelectronics, 2023)	Particle Photon (Particle, 2023)
<b>Detalles:</b>						
Procesador	Tensilica Xtensa LX6 (32-bit Dual-Core)	ATmega328P (8-bit single core)	RISC de (8-bit single core)	RP2040 (32-bit Dual-Core)	ARM Cortex-M3(32-bit)	STM32F205RGY6 120Mhz ARM Cortex M3
Velocidad de reloj	160/240 MHz	16 MHz	20 MHz	133 MHz	72 MHz.	120Mhz
Voltaje de operación	+2.3 V a +3.7 V	+5 V a +12 V	+0.3 V a +7.5 V	+1.8 V a +5.5V	+2.0 V a +3.7 V	+3.6 V a +5.5 V



Corriente de operación	240 mA	500 mA	300 mA	300 mA	150 mA	430 mA
Lenguaje de programación	ESP-IDF Linux, Arduino IDE C++, Java.	Arduino IDE C++	Ensamblador y C	MicroPython y C/C++.	STM32CubeIDE ensamblador y C/C++	Particle Web IDE y C++
Comunicación inalámbrica	Bluetooth + Wifi	Bluetooth (modulo externo)	Bluetooth (modulo externo)	Bluetooth	Bluetooth +Wifi (modulo externo)	Wifi + Bluetooth
Comunicación alámbrica	UART, SPI, I2S, I2C	UART, SPI, I2C	UART, SPI, I2C	UART, I2C, SPI, USB.	UART, SPI, I2C, USB.	UART, I2C, SPI, USB.

Tabla 6 Microcontroladores (Fuente: Propia)

En la Tabla 5 se realiza una comparación de diferentes tarjetas que permiten realizar topologías enfocadas a IoT. Debido a las diferentes prestaciones y modos de trabajo, se decide hacer uso del ESP32, ya que tiene integrados el módulo Wifi y Bluetooth principalmente, además de la facilidad de ser programado con diferentes plataformas.

### 8.2.1 Diseño Circuito

Para este punto, se decide trabajar con la placa ESP32 y el sensor DHT22. Ahora, se procede a analizar el consumo promedio del prototipo equipado con estos componentes. Según los datos proporcionados por el fabricante, la tabla de consumo energético indica que, al utilizar ciertas configuraciones relacionadas con el Wifi, el consumo de corriente puede superar los 200 mA, e incluso alcanzar picos de 250 mA. Además, es importante destacar que el prototipo se alimenta con una tensión de 5 V.



$$P_{esp32} = V_{in} * I_{PP}$$

$$P_{esp32} = 5V * 0.25A$$

$$P_{esp32} = 1.25W$$

Ahora, al análisis se suma el consumo pico del sensor DHT22. Esto implica que el consumo máximo del prototipo puede experimentar un incremento adicional, dependiendo de las características eléctricas del DHT22 en su funcionamiento.

$$P_{dht22} = V_{in} * I_{PP}$$

$$P_{dht22} = 3.3V * 0.0015A$$

$$P_{dht22} = 0.00495W = 4.95mW$$

Ahora, al análisis se suma el consumo pico del relay AC.

$$P_{relay} = V_{in} * I_{PP}$$

$$P_{relay} = 3V * 0.003A$$

$$P_{relay} = 0.009W = 9mW$$

De acuerdo a las comparaciones de potencia entre la placa de desarrollo, el sensor y el relay AC, se tomará como referencia la del ESP32, ya que es considerablemente superior a los anteriores. Dado que se plantea tener el sistema trabajando durante 8 horas, se calculará el consumo teórico que tendría el sistema durante este tiempo basándose en el consumo promedio del ESP32 y los demás componentes adicionales.

$$\text{Consumo en horas}_{esp32} = 1.25 W * 8h$$

$$\text{Consumo en horas}_{esp32} = 9.25 Wh$$

$$\text{Consumo en horas}_{esp32} = mAh = \frac{Wh * 1000}{V}$$

$$\text{Consumo en horas}_{esp32} = mAh = \frac{9.25 Wh * 1000}{5 V} = 1850mAh$$



De acuerdo a el parámetro de consumo obtenido se decide optar por usar batería de, las cuales cumplen el consumo solicitado, parte de eso nos permite identificar la versión 1 con la cual se están cargando datos en el servidor web de Thingspeak y nos permite verificar las horas reales de trabajo de las baterías.

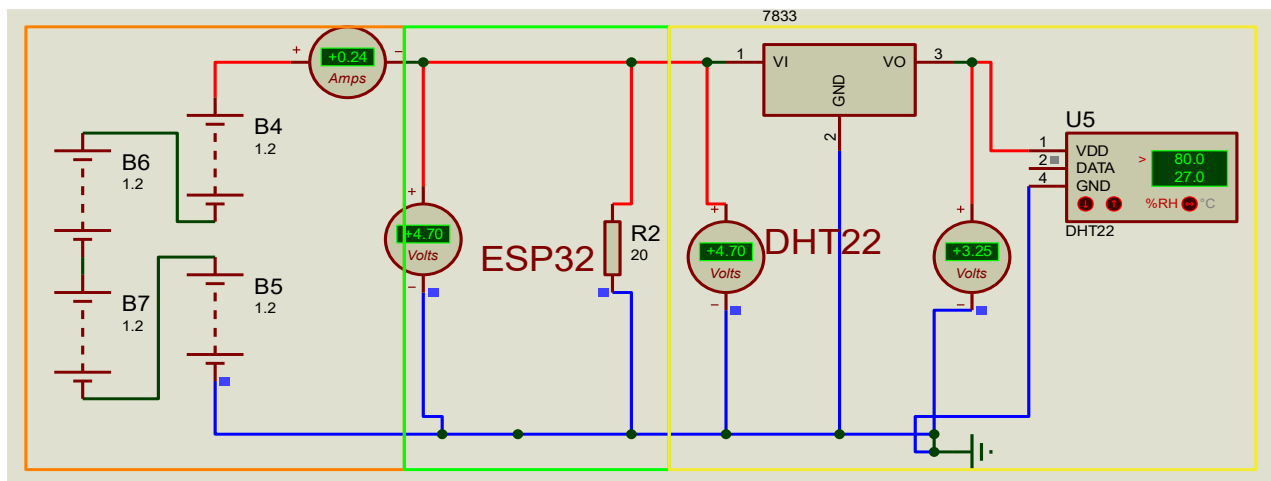


Figura 6 Circuito versión 1 (Fuente: Propia)

En el diseño propuesto en la figura 6, se ha decidido emplear baterías de níquel de 1.2 V. Esta elección se fundamenta en la disponibilidad previa de estas baterías. Al disponerlas en serie, se logra una tensión total de 4.8 V con una capacidad de 2000 mAh. Este diseño cumple con los requisitos establecidos previamente.



Figura 7 Implementación versión 1 (Fuente: Propia)

En la implementación descrita en la figura 7, se establece una conexión convencional entre el ESP32 y el router. El código proporcionado en el Anexo 1 permite la recopilación de datos de temperatura y humedad en momentos específicos del día. Durante las pruebas realizadas en los laboratorios propuestos, se observó que las baterías son capaces de mantener la conexión durante aproximadamente 5 horas. Sin embargo, se encontró que los últimos datos recopilados no son precisos debido a la disminución del voltaje de las baterías, lo que resulta en una falta de energía suficiente para garantizar la medición precisa del sensor DHT22.

### 8.2.2 Diseño Pagina

Para mejorar la visualización de los datos registrados, se ha diseñado una interfaz dentro de la plataforma ThinkSpeak (según lo descrito en el Anexo 3 / ThinkSpeak). Esta interfaz proporciona una visualización más dinámica de los datos y también permite mantener un registro histórico de



los mismos. Esto será de gran utilidad en el análisis de los resultados obtenidos, ya que facilitará la identificación de patrones y tendencias a lo largo del tiempo.



Figura 8 Pagina web (Fuente: Propia)

En la figura 8, se observa en color naranja la leyenda de registro de datos. Estos puntos nos permiten identificar el punto de inicio con fecha y hora de la lectura de datos, en este caso, para la humedad. Además, el último dato de humedad registrado durante la noche previa se muestra explícitamente. Esto nos permite verificar si el sistema ha cargado correctamente durante el día y si la cobertura de red móvil está funcionando correctamente.

La flecha azul y amarilla indica de manera más sencilla el último dato de temperatura y humedad registrada. Por último, la flecha roja nos permite identificar la presencia de helada.



### 8.3 Pruebas de campo

#### ➤ Ubicación 1

Con el propósito de evaluar la calidad de la estación meteorológica se llevan 3 unidades de la versión 1 (figura 6) a el lugar propuesto en la figura 1, de este experimento no se lograron obtener datos debido a que el rúter propuesto era un teléfono y la cobertura de red para la zona propuesta fue baja, por lo cual en las horas de medida se perdieron los datos tomados, pero nos sirvió para probar el uso de baterías de litio específicamente del modelo 18650, con este modelo el rango se implementa debido que poseen un mayor voltaje y una capacidad superior en mAh.

De acuerdo a lo evidenciado en la primera práctica, es necesario implementar un sistema de carga para las baterías con el fin de ampliar el rango de obtención de datos. Por lo tanto, se sugiere adelantar la fase 5 y adaptar un sistema de carga y descarga para las baterías. A continuación, se propone el siguiente diseño como primera medida.

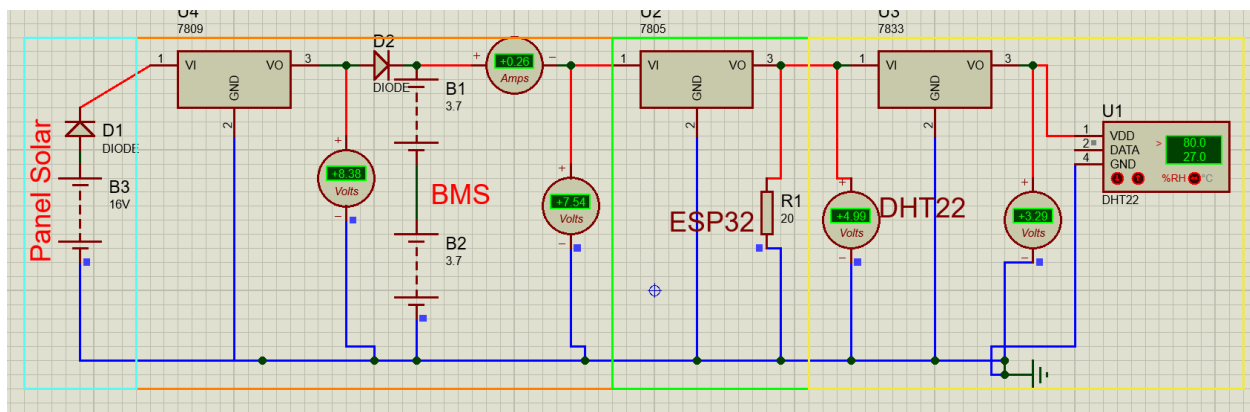


Figura 9 Versión 2 (Fuente: Propia)



En este diseño se incorpora un circuito de gestión de baterías (BMS, por sus siglas en inglés: Battery Management System), el cual supervisa y controla la carga y descarga de las baterías 18650. Esto asegura que, durante las horas inactivas de la lectura de datos, el sistema esté cargando, lo que garantiza la disponibilidad de datos en las horas programadas, incluyendo las de la madrugada.



*Figura 10 Implementación versión 2 (Fuente: Propia)*

De acuerdo con este diseño (figura 10), se logró recopilar datos y cargarlos en la página propuesta. Sin embargo, se observa que no se logra recopilar todos los datos durante la noche. Tras analizar las diferencias horarias entre distintos puntos, se deduce que esto se debe a que las baterías no logran cargarse de manera óptima. Por lo tanto, se considera necesario incorporar un panel solar que proporcione una mayor corriente durante las horas de luz. Se procede entonces a cambiar el panel solar y realizar una nueva prueba de campo en la zona mencionada anteriormente.



*Figura 11 Versión 2 cambio de panel (Fuente: Propia)*

En la figura 11, se presenta el diseño número 2, el cual ofrece mejoras significativas en el sistema de carga y compacta la estructura para lograr una calidad de carga superior. Además de esto, se reduce el tamaño del sistema para los nodos, lo que facilita su transporte.



*Figura 12 Router (Fuente: Propia)*

En la figura 12, se observa la ubicación del router, el cual está situado en el exterior de la casa. Se disponen 4 puntos de medida en las proximidades de la vivienda para realizar las respectivas lecturas de datos. Este se comunicará de manera inalámbrica con los puntos propuestos.



*Figura 13 Ubicación puntos de medida (Fuente: Propia)*

En la figura 13, se observa la instalación de los puntos de medida, donde cada punto se encuentra aproximadamente a 4 metros de distancia entre sí y a 6 metros de distancia del router (ver figura 12). En este caso, se disponen 4 puntos con configuraciones diferentes para la toma de muestras. Esto se debe a que se desea examinar la activación del sistema en diferentes momentos del día y la activación de la motobomba cuando la temperatura sea inferior a 5 grados.



*Figura 14 Punto de activación (Fuente: Propia)*

En la figura 14, se muestra el nodo de activación de la motobomba AC. Se destaca que cualquier punto de medida tiene la capacidad de activar el sistema de riego al conectarse con la motobomba. En este caso, solo se utiliza una motobomba, por lo tanto, este sistema se conecta a un relé AC que se encarga de la activación en caso de helada.

Finalmente, se ha integrado al sistema el sistema de aspersión a la motobomba (figura 15). En este sentido, es crucial resaltar que los puntos de medición tienen la capacidad de activar una motobomba AC al detectar heladas, lo que desencadena un flujo de agua a través de las tuberías, dando lugar a la aspersión. Según lo estipulado en el Anexo 1, se establece que la motobomba se encenderá durante 10 minutos (siendo este tiempo adaptable según la extensión del terreno) al detectarse heladas, tras lo cual se reanuda la lectura de datos.

En caso de que las condiciones sigan por debajo del umbral establecido, la motobomba se activará nuevamente. Es importante señalar que la activación solo se llevará a cabo durante el periodo especificado, que comprende desde las 00:00 horas hasta las 8:00 a.m.



*Figura 15 Sistema de Riego (Fuente: Propia)*

Para revisar los resultados obtenidos en la plataforma, utilizaremos la interfaz de MATLAB, la cual está integrada con el servidor IoT. Por cuestiones gráficas, se decide hacer uso de histogramas para facilitar la interpretación y observar en qué lugares hay posibles heladas.

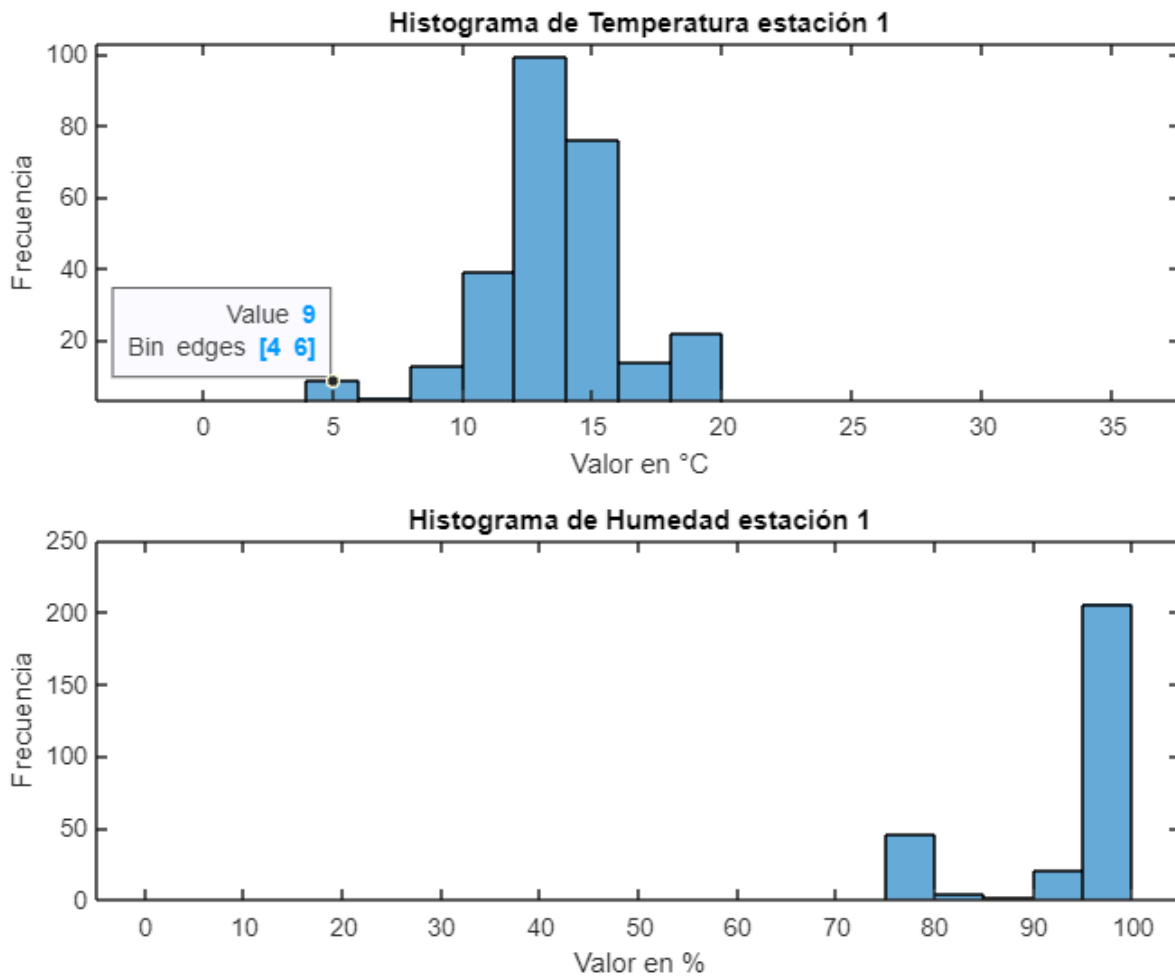


Figura 16 Estación 1 (Fuente: Propia)

En la estación uno (figura 16), se logra identificar que, de la muestra total de datos obtenidos, solo 9 datos se interpretan como temperaturas peligrosas para el cultivo. Por otro lado, la humedad durante el tiempo de muestra no baja del 70%.

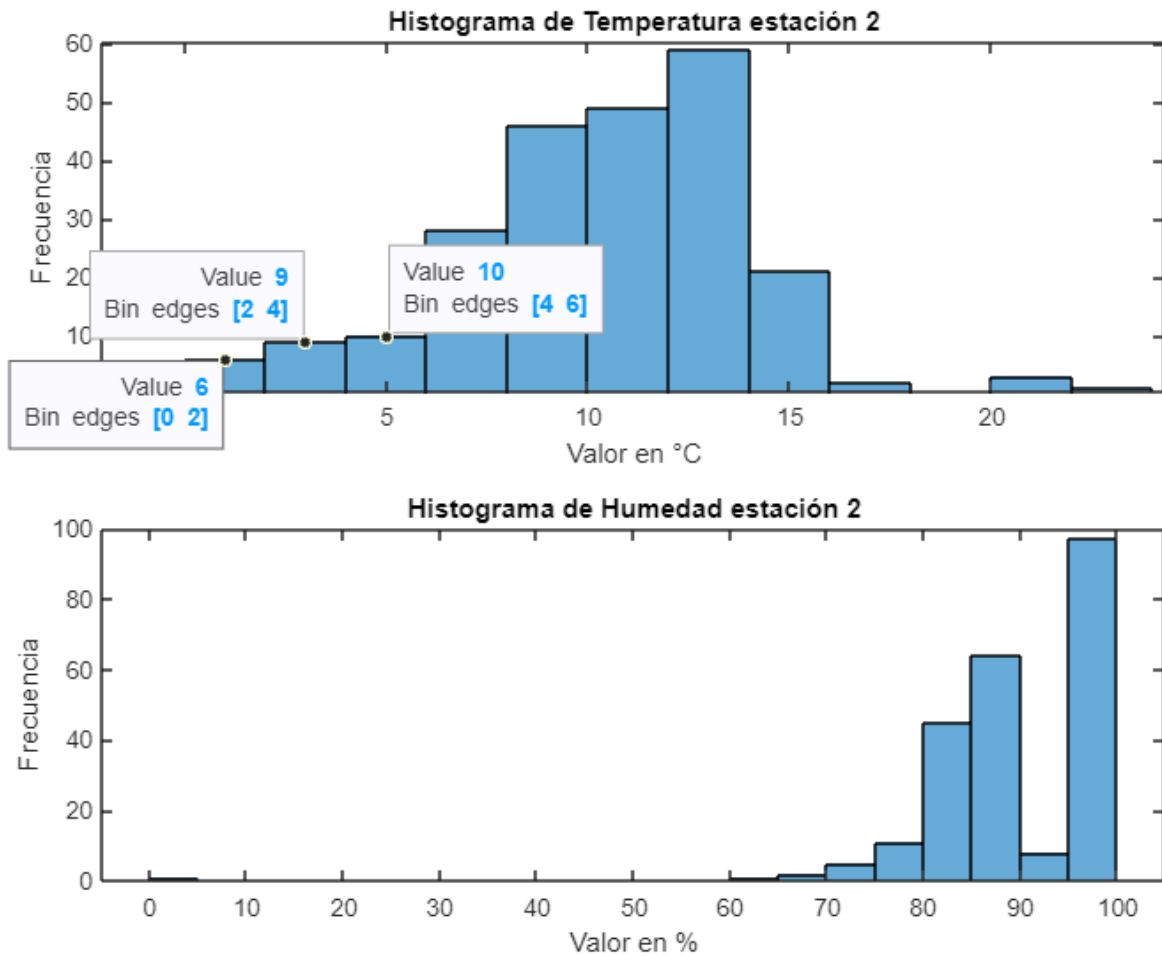


Figura 17 Resultados Estación 2 (Fuente: Propia)

Para el segundo caso (figura 17), se observa que se registra una mayor cantidad de datos que pueden representar riesgo para el cultivo. Sin embargo, en este caso, se presenta un registro de humedad adicional con valores inferiores al 70%.

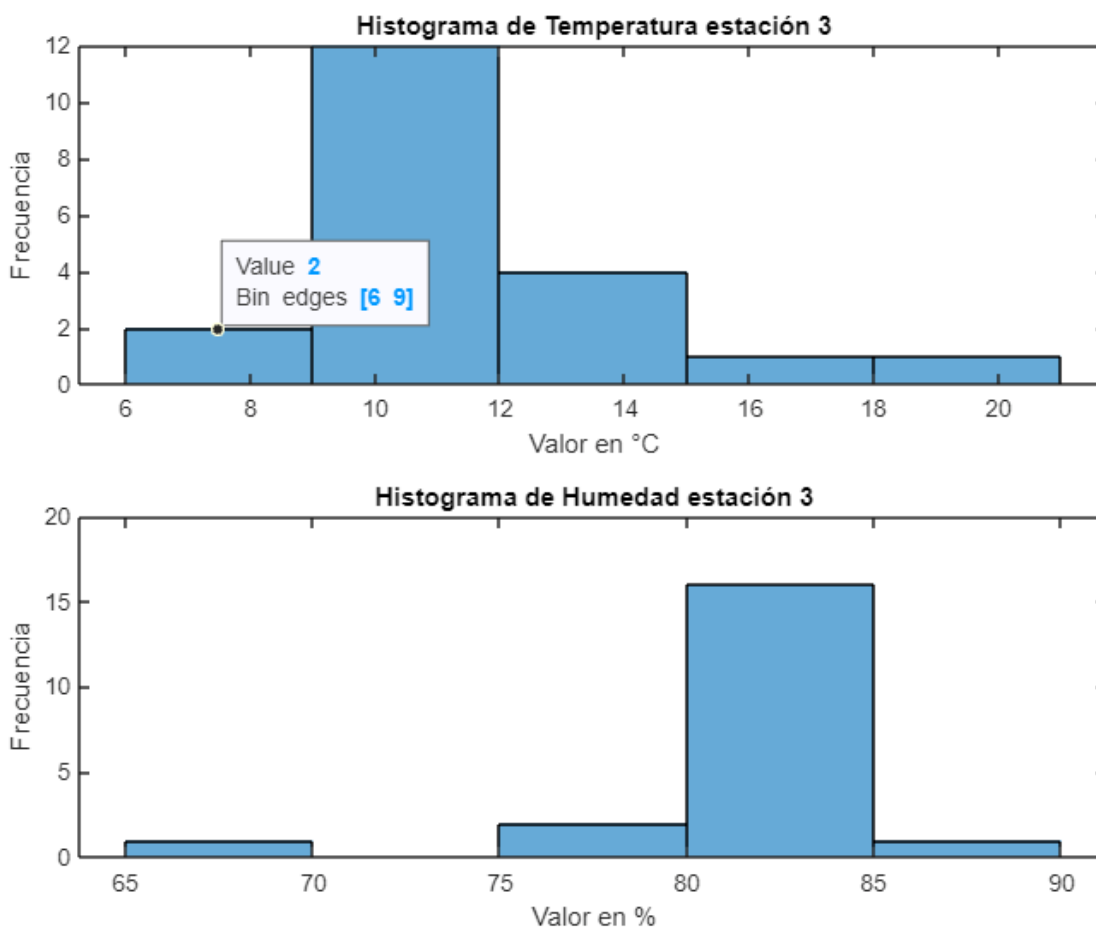


Figura 18 Resultados Estación 3 (Fuente: Propia)

Para este caso (figura 18), se configuraron estaciones para que tomaran medidas durante dos horas en el día de (9am a 11 am), con el fin de identificar si el sistema de encendido trabajaba de manera autónoma de acuerdo a la hora establecida. De estos datos, se obtienen temperaturas relativamente superiores a las observadas en las figuras anteriores, ya que esto ocurre en las horas del día. Además, se encuentran configuradas con la arquitectura de la figura 2

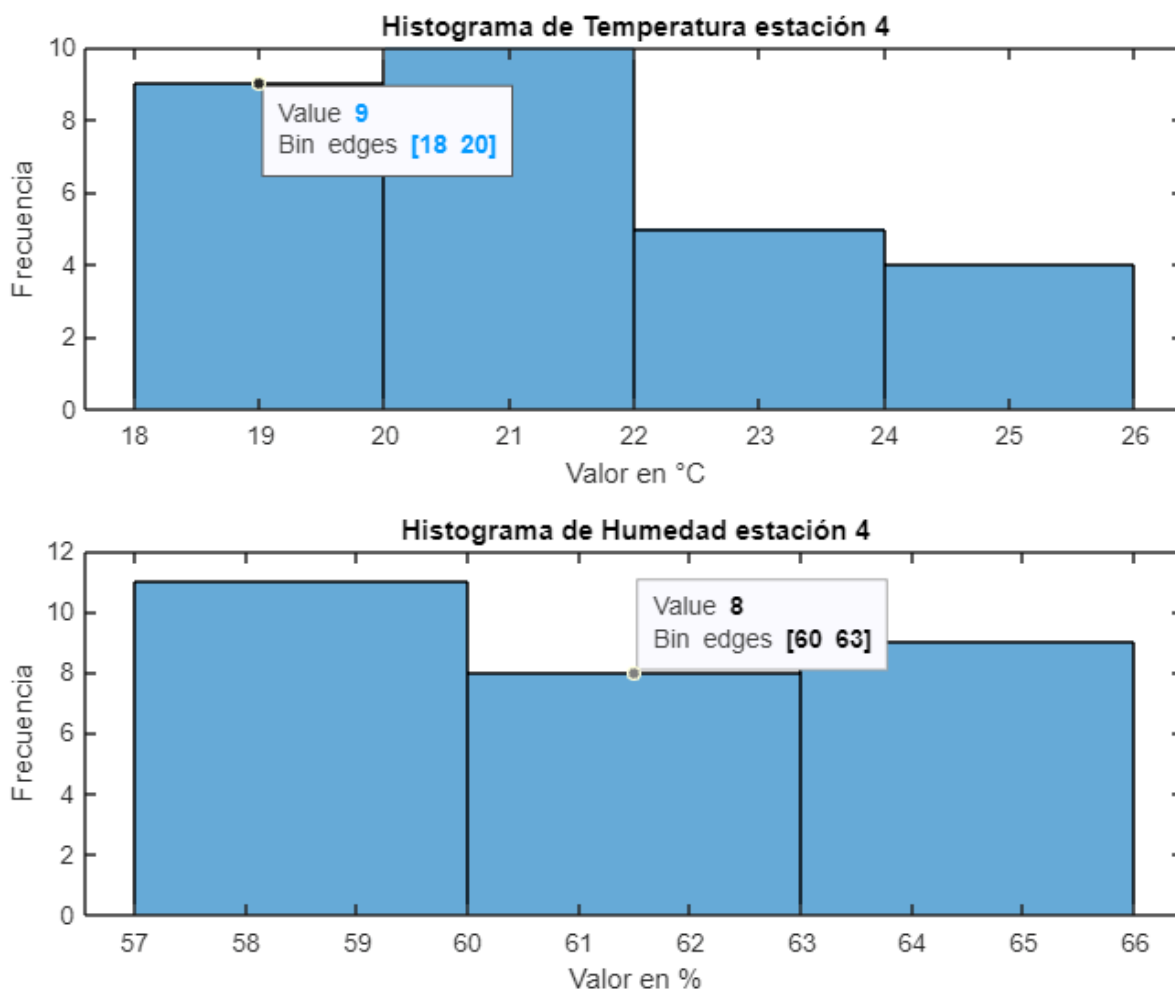


Figura 19 Resultados Estación 4 (Fuente: Propia)

En la figura 19, se observan datos similares a la figura 18 debido a que es la misma configuración, pero con una distancia más cercana al router y una configuración de hora de activación desde las 2 p. m. hasta las 4 p. m. Igual que en el caso anterior, se presentan temperaturas altas en comparación con los datos obtenidos en la madrugada (figura 16 y figura 17).



➤ Ubicación 2



*Figura 20 Implementación cultivo 2 (Fuente: Propia)*

En la figura 20, se muestra la implementación de los módulos finales de trabajo, los cuales han facilitado la recolección de datos dentro del cultivo de clavel durante aproximadamente 15 días. Es relevante mencionar que, debido a consideraciones políticas y de calidad por parte de la empresa encargada del cultivo, la cantidad de muestras fotográficas adjuntas es limitada. Sin embargo, esta circunstancia nos brindó la oportunidad de idear un sistema de riego más sólido, que emplea una motobomba de alrededor de 6.5hp activada por un mecanismo de cuerda. Además, dada la mayor



extensión del terreno, se implementa la arquitectura presentada en la figura 3, para optimizar el sistema.

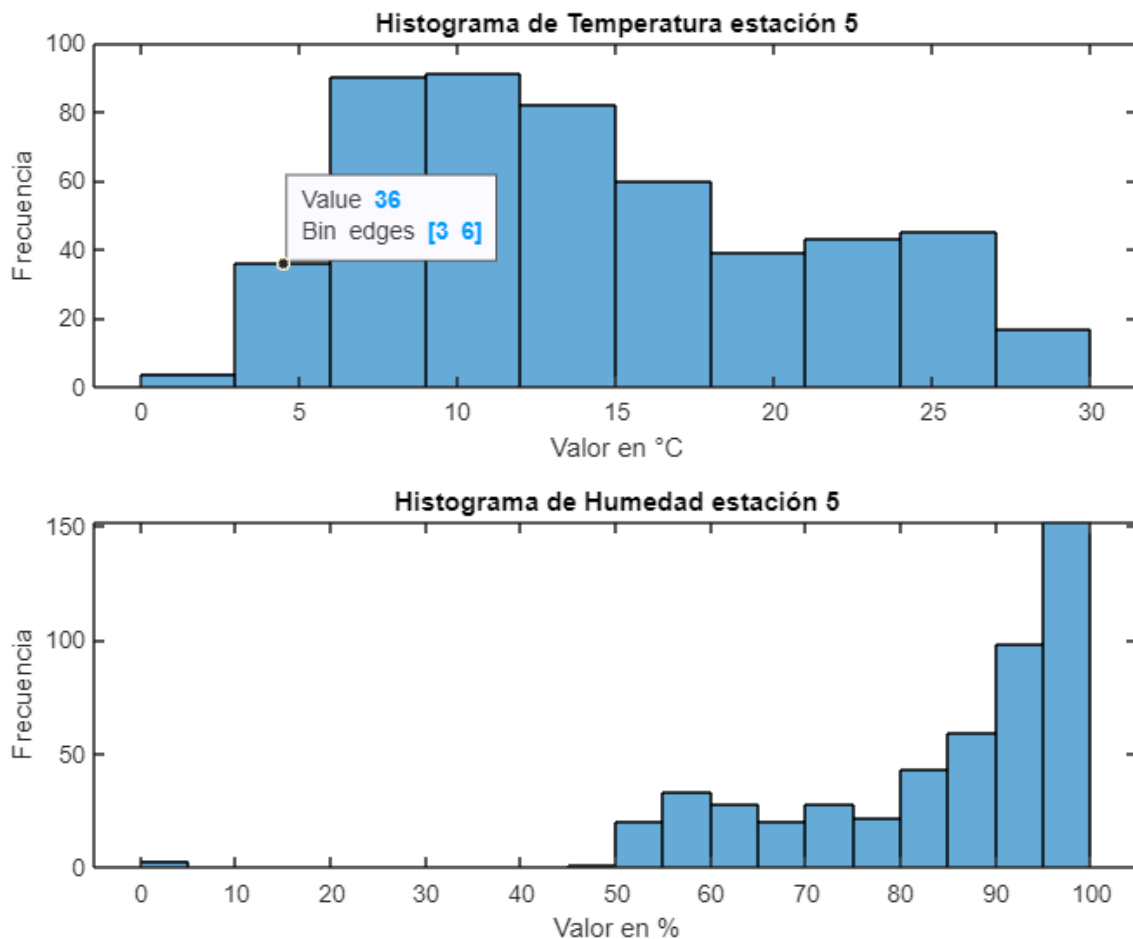


Figura 21 Resultados Estación 1, Ubicación 2 (Fuente: Propia)

Ahora se tiene un registro de datos de la ubicación 2 (figura 21). Aprovechando que se tiene un entorno diferente, se aumenta el período de muestreo para identificar temperaturas más altas debido a la existencia de un entorno semicerrado. Por lo tanto, se hace un registro de datos desde las 00:00 horas hasta las 10 de la mañana cada 15min. De esto se puede entender que durante el



día se tienen fuertes temperaturas y en las madrugadas se pueden llegar a presentar temperaturas inferiores o iguales a los 5 grados, lo cual puede afectar el cultivo de manera considerable. Además, por primera vez se registró un dato inferior al 10% de humedad, lo cual puede representar un error de medida o un caso extremo a considerar.

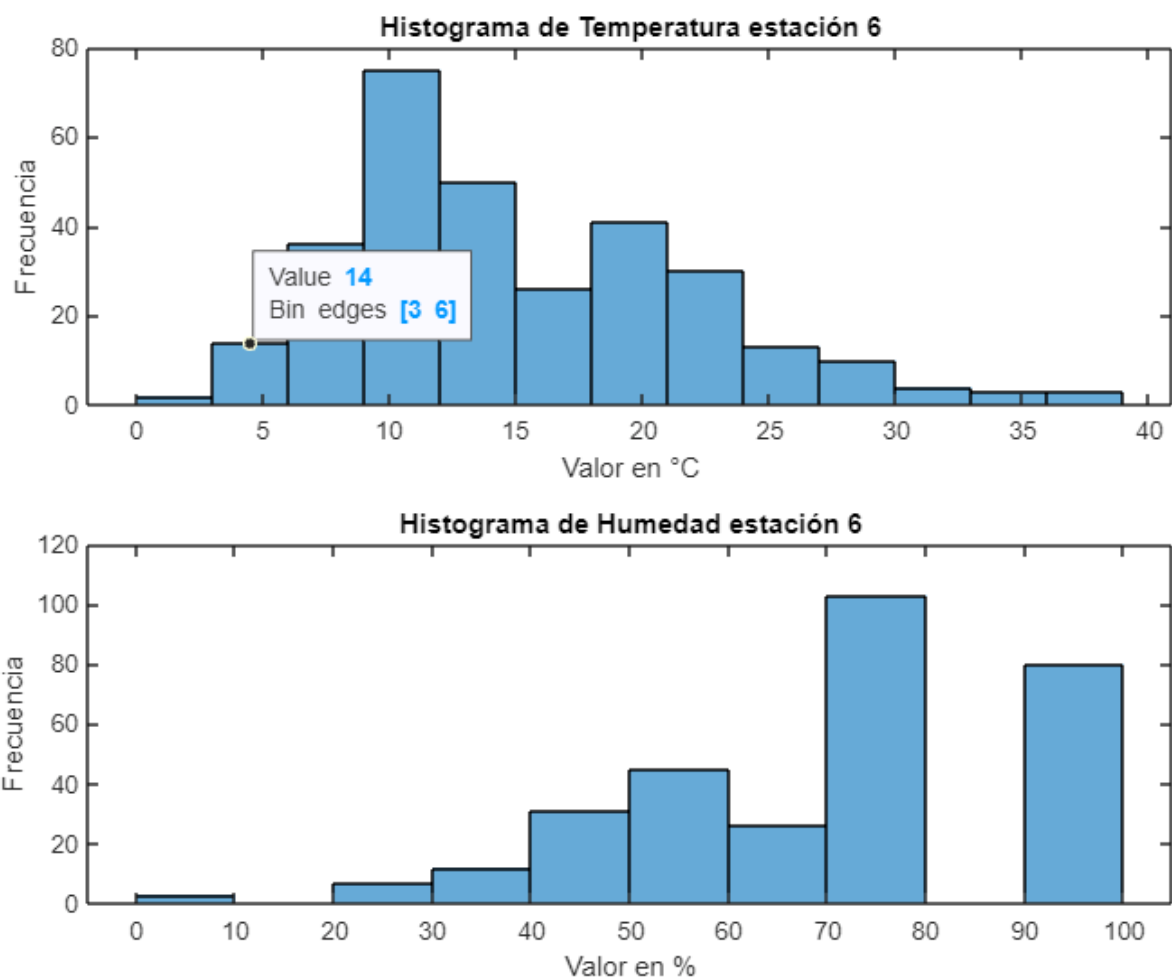


Figura 22 Resultados Estacion2, Ubicación 2 (Fuente: Propia)

En este caso (figura 22), se observa una variación en los datos obtenidos, donde se pueden observar algunos datos que afectarían el cultivo y se reafirma la existencia de altas temperaturas durante el



día. Sin embargo, en los niveles de humedad se observa un vacío en el rango del 80% al 90%, lo cual podría significar que los niveles de temperatura descienden muy rápidamente. Además, al igual que en el caso anterior, se registran datos de humedad inferiores al 10%, por lo cual podría ser necesario aumentar la tasa de muestreo para verificar la proyección de datos y así identificar a partir de qué temperatura la humedad empieza a caer tan fuertemente.



## 9 Conclusiones.

El sistema actualmente está en la capacidad de detectar posibles heladas; sin embargo, es imperativo mejorar el sistema de riego para poder evaluar su efectividad en la prevención de heladas. Dado que este fenómeno ocurre hacia finales y principios de año, es esencial adaptarlo para que funcione de manera autónoma durante todo el año y con diversos tipos de cultivos, integrando el sistema de prevención de heladas en uno más robusto.

La incorporación de los dos módulos de configuración ha permitido obtener registros de datos, lo que posibilita ajustar las coberturas de manera diferente según la ubicación deseada. Actualmente, se establece un umbral de peligro para temperaturas inferiores a los 5 grados Celsius, considerando que los cultivos se ven afectados por temperaturas inferiores a un grado Celsius. No obstante, es necesario llevar a cabo más pruebas de laboratorio y de campo para determinar con precisión el tiempo de riego necesario en función de la extensión del terreno, con el fin de evitar activaciones incorrectas durante el riego.

En una de las ubicaciones se identificaron las condiciones bajo las cuales se manifestarían los efectos asociados con la helada negra. En consecuencia, se recomienda la implementación de un nuevo método de alerta aprovechando la integración con la plataforma ThingSpeak. Este sistema permitiría la emisión de alertas a través de correo electrónico o mediante un sistema de alerta web, lo que proporcionaría una mayor cobertura e interés. Esto es particularmente relevante dado que la helada negra tiende a causar daños significativos que no son visibles hasta que la planta ha muerto.



Para aumentar el margen de autonomía del prototipo, se podría incorporar un sistema de carga de baterías externo. De esta manera, durante períodos nubosos o de baja radiación, se podría realizar un cambio de baterías de forma sencilla para garantizar el correcto funcionamiento del dispositivo en estas temporadas del año. Además, es necesario recalcar que, durante épocas de lluvia, se debe verificar la integridad del prototipo, ya que, debido a su construcción, podría generar datos falsos positivos relacionados con la humedad (refracción o difracción) si el prototipo queda ubicado en una zona inundada.



## 10 Trabajos futuros.

- Recolectar una base de datos para el modelamiento de un sistema con machine learning que permita analizar la eficiencia y la calidad del sistema.
- Se sugiere la implementación de un sistema de riego más robusto, dado que en la ubicación 2 se ha observado un mecanismo de riego propulsado por combustible fósil, debido a la lejanía de los pozos de distribución de agua respecto a una fuente de alimentación eléctrica. En este sentido, se plantea la posibilidad de adaptar un sistema de arranque electrónico inteligente aprovechando la arquitectura de red existente. Alternativamente, se podría identificar el diseño necesario para una motobomba eléctrica adecuada, es decir, determinar qué equivalente eléctrico se puede utilizar para administrar la potencia necesaria en un cultivo de considerable tamaño.
- Adaptar el sistema para que sea compatible con proyectos de agricultura de precisión.



## 11 Anexos

- Anexo 1: En este caso, se muestra la configuración de red indicada en la figura 2, replicada 8 veces con la diferencia de que cada código en particular tiene la configuración para cargar 4 datos en la página de ThingSpeak. De esta manera, cada código tiene la misma estructura, pero cambian las credenciales y la ubicación de la carga de datos. Estos códigos pueden activar la motobomba individualmente, ya que no hay un maestro en específico. Sin embargo, si no se desea hacer el control en ese momento con alguno de esos códigos, se indicará con un LED la presencia de la helada.
- Anexo 2: En esta parte, se presenta el código de la configuración de red indicada en la figura 3. Para este caso, se implementa una red mesh con un puente a red Wifi. Esto nos permite tomar datos de una red privada creada desde un ESP32 y enviarla a otro ESP32 con conexión a Internet. Gracias a esto, se puede incrementar la cobertura de los nodos. Sin embargo, se tiene una configuración con dos maestros: uno encargado de accionar la motobomba y filtrar los datos obtenidos de la red mesh para poder cargarlos en la página, y otro encargado de crear la infraestructura de la red mesh para todos los nodos en cuestión.
- Anexo 3: En cuanto a los manuales de instrucciones, se dispone de dos documentos. El primero aborda las configuraciones de la red Wifi, mostrando la manera básica de personalizar el router. El segundo documento detalla la forma básica de configurar ThingSpeak para establecer una vinculación con la página web y la tarjeta ESP32.
- Anexo 5: En esta sección se encuentran los archivos Gerber que contienen el diseño de la tarjeta PCB para los prototipos propuestos.



## 12 Bibliografía

- Alejandro Castañeda-Miranda, Victor M. Castaño. (21 de 07 de 2020). *Internet of things for smart farming and frost intelligent control in greenhouses*. Obtenido de ScienceDirect: [https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168169919307148?fr=RR-2&ref=pdf\\_download&rr=874887185d60494a](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168169919307148?fr=RR-2&ref=pdf_download&rr=874887185d60494a)
- Angie Álvarez, Angie Hernández. (03 de 12 de 2021). *Automated Electronic System to Prevent Freezing Damage to Crops IEEE EDS - SIGHT / Stage 1*. Obtenido de Craiusta: <http://hdl.handle.net/11634/43010>
- Caro, E. C. (14 de 10 de 2022). *Predicción temprana de heladas en cultivos de altura, empleando métodos de aprendizaje de máquinas*. Obtenido de repositorio.unal.edu.co: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/83615>
- Docs.arduino. (29 de Enero de 2024). *Arduino® UNO R3*. Obtenido de Docs.arduino: <https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/A000066-datasheet.pdf>
- Electronics, M. (17 de septiembre de 2018). *bme 280*. Obtenido de mouser: <https://www.mouser.com/datasheet/2/783/BST-BME280-DS002-1509607.pdf>
- Electronics, M. (13 de Diciembre de 2021). *DHT22*. Obtenido de mouser: <https://www.mouser.com/datasheet/2/737/dht-932870.pdf>
- Espectador, E. (07 de 02 de 2021). *Perdidas más de 10.000 hectáreas de cultivos por época de heladas y sequía en Cundinamarca*. Obtenido de [www.elespectador.com](http://www.elespectador.com): <https://www.elespectador.com/bogota/perdidas-mas-de-10000-hectareas-de-cultivos-por-epoca-de-heladas-y-sequia-en-cundinamarca-article/>
- Espressif. (febrero de 2024). *ESP32 Series Datasheet*. Obtenido de <https://www.espressif.com/>: [https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf)
- Espressif. (s.f.). *docs.espressif.com*. Obtenido de <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/stable/esp32/api-guides/esp-wifi-mesh.html#mesh-managing-a-network>



- Google. (2024). *Google Earth [Captura de pantalla de Google Earth pro]*. Obtenido de <https://maps.app.goo.gl/KG3HgGfgjdDPQBvcA>
- Google. (2024). *Google Earth [Captura de pantalla de Google Earth pro]*. Obtenido de <https://maps.app.goo.gl/1ycVx92xNdsKfGtP9>
- Hu Yongguang, Zhao Chen, Liu Pengfei, Asante Eric Amoah, Li Pingping. (01 de 08 de 2016). *Sprinkler irrigation system for tea frost protection and the application effect*. Obtenido de IJABE: <https://ijabe.org/index.php/ijabe/article/view/1315/1130>
- Ian Zhou , Justin Lipman, Mehran Abolhasan, Negin Shariati, David W. Lamb. (11 de 02 de 2020). *Frost Monitoring Cyber–Physical System: A Survey on Prediction and Active Protection Methods*. Obtenido de IEEE Xplore: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8993828>
- Instruments, T. (Diciembre de 2017). *LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors*. Obtenido de Texas Instruments: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm35.pdf>
- Integrated, M. (Julio de 2019). *DS18B20*. Obtenido de Analog.com: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ds18b20.pdf>
- Integrated, M. (Junio de 2021). *MAX6675*. Obtenido de analog.com: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/max6675.pdf>
- Lamb, D. (21 de 01 de 2009). *Electrically heated cables protect vines from frost damage at early flowering*. Obtenido de Wiley Online Library: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1755-0238.2008.00034.x>
- Microchip. (Enero de 2013). *PIC16F87XA*. Obtenido de Microchip: <https://ww1.microchip.com/downloads/aemDocuments/documents/MCU08/ProductDocuments/DataSheets/39582C.pdf>
- Nasa. (2024). *Power Larc*. Obtenido de Power Larc: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>



- Olga Cecilia González Gómez, Carlos Felipe Torres Triana. (2012). *ACTUALIZACION NOTA TECNICA*. Obtenido de IDEAM: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21147/Documento+FINAL+actualizacion+nota+tecnica+heladas.pdf/e10a0183-62e6-410a-8e96-7e0739f6f06b>
- Parmar, C. (11 de Febrero de 2019). *YL38 Soil Hygrometer*. Obtenido de Medium: <https://medium.com/@chirag.parmar/know-your-sensor-yl38-soil-hygrometer-fceca860faac>
- Particle. (31 de Enero de 2023). *Photon Datasheet*. Obtenido de Particle docs: <https://docs.particle.io/reference/datasheets/wi-fi/photon-datasheet/>
- PORTAFOLIO. (11 de 02 de 2020). *Heladas queman miles de cultivos en el país*. Obtenido de PORTAFOLIO : <https://www.portafolio.co/economia/heladas-causan-grandes-perdidas-en-el-sector-agricola-537997>
- raspberrypi. (02 de Febrero de 2024). *Raspberry Pi Pico Datasheet*. Obtenido de [datasheets.raspberrypi.com](https://datasheets.raspberrypi.com/pico/pico-datasheet.pdf): <https://datasheets.raspberrypi.com/pico/pico-datasheet.pdf>
- Salas, R. A. (1982). *Principios básicos de ocurrencia de las heladas y su control*. Obtenido de Agrosavia: <https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/19916>
- Simone Cirani ,Gianlugi Ferrari, Marco Picone, Luca Veltri. (2019). *Internet of Things: Architectures, Protocols and standards*. John Wiley & Sons.
- Steven M. Hernandez, Deniz Erdag, Eyuphan Bulut. (07 de Septiembre de 2021). *Towards Dense and Scalable Soil Sensing Through Low-Cost WiFi Sensing Networks*. Obtenido de IEEE Xplore: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9525003>
- STMicroelectronics. (18 de Septiembre de 2023). *Medium-density performance line Arm®-based 32-bit MCU with*. Obtenido de ST: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f103c8.pdf>