



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

# **Diseño asistido por computador de un sistema de climatización para invernaderos ventilados naturalmente en el trópico altoandino**

**Gloria Alexandra Ortiz Rocha**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola  
Bogotá D.C, Colombia  
2023

# **Diseño asistido por computador de un sistema de climatización para invernaderos ventilados naturalmente en el trópico altoandino**

**Gloria Alexandra Ortiz Rocha**

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:  
**Magister en Ingeniería - Ingeniería de Biosistemas**

Director:

PhD (c)., Edwin Andres Villagran Munar

Codirector:

PhD., John Fabio Acuña Caíta

Línea de Investigación:

Construcciones e infraestructura rural y bioclimática.

Grupo de Investigación:

GTI - grupo de gestión en tecnología e innovación en biosistemas

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola

Bogotá D.C, Colombia

2023

*"La preocupación por la vida y su destino debe ser el interés primordial de todo esfuerzo técnico" (Einstein, editado para el contexto).*

*"Todo lo que hagas, hazlo como para el Señor y no para el hombre" (Colosenses 3:23, Biblia).*

## Declaración de obra original

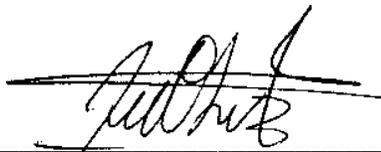
Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.



Nombre: Gloria Alexandra Ortiz Rocha

Fecha 23/11/2023

## Agradecimientos

*Expreso mi profundo agradecimiento a quienes contribuyeron significativamente a mi tesis de maestría. Agradezco a mis profesores y jurados por su dedicación y valiosas contribuciones, fundamentales para el éxito del proyecto. Reconozco especialmente al ingeniero Acuña y al ingeniero Villagrán por brindarme la oportunidad de formar parte de sus equipos y su constante orientación.*

*También agradezco al ingeniero Montaña por su apoyo continuo y recomendaciones que han influido no solo en este proyecto, sino en otros aspectos de mi desarrollo académico y profesional y quiero expresar mi gratitud a los ingenieros Andrés, Iván, Fabián, Henry, John, Iván Chacón, Aura y a todo el personal operativo y de aseo de Agrosavia. Su disposición para colaborar y compartir sus conocimientos ha sido invaluable para el logro de los objetivos planteados en esta investigación.*

Se agradece a la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria—AGROSAVIA por el apoyo técnico en la realización de esta investigación. Este estudio fue financiado por el Ministerio de Ciencia Tecnología e Innovación de Colombia—MINCIENCIAS a través del proyecto denominado “*Fortalecimiento de las capacidades de I + D + i del centro de investigación Tibaitata para la generación, apropiación y divulgación de nuevo conocimiento como estrategia de adaptación al cambio climático en sistemas de producción agrícola ubicados en las zonas agroclimáticas del trópico alto colombiano*”.

*Agradezco de corazón a mi pareja, padres, familia y amistades por su amor incondicional, apoyo emocional y comprensión a lo largo de este exigente proceso académico.*

*Finalmente, reconozco y agradezco a los miembros del semillero de investigación Amaranto por su colaboración y motivación constante. Este logro no habría sido posible sin la contribución de cada uno de ustedes. Muchas gracias por ser parte fundamental de este viaje académico y profesional.*

*Atentamente,*

*Ing. Alexandra Ortiz Rocha*

## Resumen

### **Diseño asistido por computador de un sistema de climatización para invernaderos ventilados naturalmente en el trópico altoandino**

Esta tesis se propuso abordar el desafío de diseñar y evaluar un sistema de climatización para optimizar el microclima de un invernadero tipo capilla con doble ventilación fija construido en el centro de investigación Tibaitata de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - Agrosavia. Un análisis técnico y bibliométrico del estado del arte en estrategias de climatización para invernaderos. Adicionalmente se identificó la demanda energética de este invernadero y se evaluaron estrategias de optimización microclimática usando dinámica de fluidos computacional y seguimiento experimental en campo.

Para cuantificar la demanda energética necesaria, se utilizó un modelo dinámico de balance de energía, considerando la presencia de heladas.

El diseño propuesto incluye una pantalla térmica estratégicamente ubicada en el techo y dos paredes, junto con agua en un sistema de tubería negra en el suelo para maximizar la inercia térmica. Esta configuración busca optimizar la eficiencia energética sin depender de fuentes externas, asegurando condiciones microclimáticas ideales para el crecimiento de los cultivos. La evaluación experimental involucró mediciones de temperatura del suelo, de la cubierta, del aire y humedad relativa dentro del invernadero, así como la velocidad del viento, radiación, temperatura y humedad relativa en el exterior.

Los resultados obtenidos revelaron que existe un interés activo por el uso de la energía solar y su almacenamiento, especialmente para su aprovechamiento en la condición más

---

crítica, para lo cual se enfocó el modelo dinámico de balance de energía en las pérdidas bajo la condición de helada, la aplicación de climatización generó un comportamiento térmico favorable con potenciales mejoras que fueron posible analizar gracias al uso de CFD. Estos resultados respaldan la eficacia del sistema diseñado en la mejora de las condiciones microclimáticas, subrayando su potencial para contribuir a la sostenibilidad y eficiencia en la producción agrícola bajo estructuras protegidas.

**Palabras clave: Simulación en CFD, modelo de predicción, balance de energía, control climático, suelo radiante, pantalla térmica, bibliometría.**

## Abstract

### **Computer-aided design of a natural ventilation climate control system for high Andean tropical greenhouses**

This thesis aimed to address the challenge of designing and evaluating a climate control system to optimize the microclimate of a chapel-type greenhouse with double fixed ventilation, built at the Tibaitata research center of the Colombian Corporation of Agricultural Research - Agrosavia. A technical and bibliometric analysis of the state of the art in greenhouse climate control strategies was conducted. Additionally, the energy demand of this greenhouse was identified, and microclimatic optimization strategies were evaluated using computational fluid dynamics and experimental field monitoring.

To quantify the required energy demand, a dynamic energy balance model was employed, considering the occurrence of frost.

The proposed design includes a thermal screen strategically located on the roof and two walls, along with water in a black pipe system on the ground to maximize thermal inertia. This configuration aims to optimize energy efficiency without relying on external sources, ensuring ideal microclimatic conditions for crop growth. The experimental evaluation involved measurements of soil temperature, cover temperature, air temperature, and relative humidity inside the greenhouse, as well as wind speed, radiation, temperature, and relative humidity outside.

The results revealed active interest in the use of solar energy and its storage, especially for utilization in critical conditions, focusing the dynamic energy balance model on losses under frost conditions. The application of climate control generated favorable thermal behavior with potential improvements that were possible to analyze through the use of CFD. These findings support the effectiveness of the designed system in improving microclimatic conditions, emphasizing its potential to contribute to sustainability and efficiency in agricultural production under protected structures.

**Keywords:** CFD simulation, prediction model, energy balance, climate control, radiant floor, thermal screen, bibliometrics.

# Contenido

	Pág.
<b>Resumen</b>	<b>VI</b>
<b>Lista de figuras</b>	<b>XI</b>
<b>Lista de tablas</b>	<b>XIII</b>
<b>Resumen .....</b>	<b>VI</b>
<b>Introducción .....</b>	<b>15</b>
<b>1. Objetivos.....</b>	<b>19</b>
1.1. Objetivo general	19
1.2. Objetivos específicos	19
<b>2. Metodología.....</b>	<b>20</b>
2.1. Análisis técnico y bibliométrico del estado del arte	20
2.2. Identificación de la demanda energética del invernadero en estudio	23
2.2.1. Descripción del invernadero en estudio .....	23
2.2.2. Consideraciones para el sistema de climatización .....	25
2.2.3. Definición de la demanda energética durante heladas con un modelo dinámico de balance de energía.....	25
2.3. Diseño mediante el uso de dinámica de fluidos computacional de un sistema de climatización para el invernadero en estudio	30
2.3.1. Configuración del modelo numérico en CFD.....	30
2.3.2. Simulación y optimización del sistema.....	37
2.3.3. Coeficientes de transferencia de calor calculados, temperatura superficial del sistema de tubería y condiciones climáticas externas .....	37
2.3.4. Independencia y calidad de la malla .....	42
2.4. Evaluación experimental	44
2.4.1. Recopilación de datos climáticos, micro climáticos y del sistema de climatización.....	44
2.4.2. Análisis estadístico .....	46
<b>3. Análisis de resultados .....</b>	<b>48</b>
3.1. Análisis del estado del arte	48
3.1.1. Análisis bibliométrico .....	48
3.1.2. Tipos de invernadero .....	52
3.1.3. Sistemas de climatización.....	54
3.1.4. Validación experimental que realizan los autores .....	56
3.2. Demanda energética para prevenir los efectos de las heladas en el invernadero de estudio	60

3.3.	Diseño mediante el uso de CFD	61
3.3.1.	Validación .....	61
3.3.2.	Calibración y análisis de sensibilidad .....	64
3.4.	Evaluación experimental	77
3.4.1.	Comportamiento de la temperatura.....	77
3.4.2.	Modelado y predicción de la temperatura en diversos ambientes de invernaderos: análisis de modelos SARIMA, diagnóstico, validación y comparación con modelos de alisado exponencial estacional .....	90
<b>4.</b>	<b>Conclusiones.....</b>	<b>98</b>
4.1.	Análisis estado del arte	98
4.2.	Identificación de la demanda energética	98
4.3.	Diseño mediante el uso de CFD	99
4.4.	Evaluación experimental	99
<b>5.</b>	<b>Recomendaciones.....</b>	<b>100</b>
5.1.	Estado del arte	100
5.2.	Identificación de la demanda energética	100
5.3.	Diseño mediante el uso de CFD	101
5.4.	Evaluación experimental	102
<b>A.</b>	<b>Anexo: Descripción del sistema de calefacción implementado .....</b>	<b>103</b>
1.1.	Diseño del colector solar	103
1.2.	Tubería de distribución	106
1.3.	Diseño Hidráulico	108
1.4.	Control del suelo radiante	113
1.5.	Diseño fotovoltaico	116
1.5.1.	Producción de referencia .....	117
1.5.2.	Índice de rendimiento modificado .....	118
1.5.3.	Razón de rendimiento de la planta.....	119
1.5.4.	Producción modulo .....	119
1.5.5.	Producción final .....	119
1.5.6.	Potencia .....	120
1.5.7.	Batería.....	120
1.6.	Selección de la pantalla térmica	121
1.6.1.	Alternativas de pantallas.....	122
1.6.2.	Análisis de las alternativas propuestas .....	125
1.6.3.	Pantalla térmica seleccionada .....	126
1.7.	Actividades de mantenimiento	127
1.7.1.	Paneles solares .....	127
1.7.2.	Electrobomba .....	128
1.7.3.	Sistema de tubería en el suelo.....	129

## Lista de figuras

<b>Figura 2-1:</b> Metodología de la búsqueda organizada y estructurada empleada en el estudio .....	20
<b>Figura 2-2:</b> Descripción arquitectónica del invernadero evaluado .....	23
<b>Figura 2-3:</b> Ficha técnica de la cubierta plastica AgrocLEAR .....	24
<b>Figura 2-4:</b> Condiciones de frontera asignadas para A. Techo, B. Salida, C. Paredes aisladas, D. Paredes no aisladas, E. Sistema de tubería y F. Suelo.....	36
<b>Figura 2-5:</b> Detalle de la malla utilizada en las simulaciones de CFD .....	43
<b>Figura 2-6:</b> Esquema geométrico del invernadero experimental .....	44
<b>Figura 2-7:</b> Ubicación de los sensores de temperatura (m).....	46
<b>Figura 3-1:</b> Ocurrencias de palabras clave .....	49
<b>Figura 3-2:</b> Red de acoplamiento bibliográfico de autores con al menos cinco documentos.....	51
<b>Figura 3-3:</b> Invernadero tipo capilla (izquierda superior); invernadero solar implementado en china (derecha superior); invernadero tipo túnel (izquierda inferior) e invernadero tipo venlo (derecha inferior).....	53
<b>Figura 3-4:</b> Comportamiento de la temperatura modelado en CFD, con la bomba apagada y encendida (resaltada la hora en verde) .....	62
<b>Figura 3-5:</b> Error absoluto y temperaturas medidas y simuladas a 0.1 m y 1 m de altura. ....	63
<b>Figura 3-6:</b> Capturas de las condiciones de temperatura (°C) con tubería en PVC, Acero y Oxy Pex con entrada del agua a 42°C a las 10:30 pm del 17 de abril de 2023.....	65
<b>Figura 3-7:</b> Capturas de las condiciones de temperatura (°C) con tubería en PVC, Acero y Oxy Pex con entrada del agua a 42°C a las 6:00 am del 19 de abril de 2023.....	66
<b>Figura 3-8:</b> Capturas de las condiciones de temperatura (°C) con tubería en PVC, Acero y Oxy Pex con entrada del agua a 80°C a las 10:30 pm del 17 de abril de 2023.....	69
<b>Figura 3-9:</b> Capturas de las condiciones de temperatura (°C) con entrada del agua a 80°C con tubería en PVC, Acero y Oxy Pex a las 6:00 am del 19 de abril de 2023 .....	70
<b>Figura 3-10:</b> Capturas de las condiciones de velocidad del viento (m/s) con tubería en PVC, Acero y Oxy Pex con entrada del agua a 42°C a las 10:30 pm del 17 de abril de 2023 .....	73
<b>Figura 3-11:</b> Capturas de las condiciones de velocidad del viento (m/s) con tubería en PVC, Acero y Oxy Pex con entrada del agua a 42°C a las 6:00 am del 19 de abril de 2023 .....	74
<b>Figura 3-12:</b> Capturas de las condiciones de velocidad del viento (m/s) con tubería en PVC, Acero y Oxy Pex con entrada del agua a 80°C a las 10:30 pm del 17 de abril de 2023 .....	75
<b>Figura 3-13:</b> Capturas de las condiciones de velocidad del viento (m/s) con entrada del agua a 80°C y con tubería en PVC, Acero y Oxy Pex a las 6:00 am del 19 de abril de 2023 .....	76

<b>Figura 3-14:</b> Comportamiento de la temperatura en el ambiente exterior y en el interior de los invernaderos IC y ISC .....	79
<b>Figura 3-15:</b> Día promedio con las variaciones presentadas en 21 días .....	80
<b>Figura 3-16:</b> Resumen descriptivo de los datos de temperatura del exterior y del interior de IC e ISC.....	82
<b>Figura 3-17:</b> Resumen descriptivo de los datos de temperatura exterior, invernadero IC e invernadero ISC en el periodo entre las 10:30 pm y las 6:30 am .....	84
<b>Figura 3-18:</b> Resultados de las pruebas de normalidad y homogeneidad de varianzas en las series de datos completas .....	85
<b>Figura 3-19:</b> Resultados de la evaluación de diferencias significativas en las series de datos completas .....	86
<b>Figura 3-20:</b> Resultados de las pruebas de normalidad, homogeneidad de varianzas, Anova y Tukey en las series en el periodo entre las 10:30 pm y las 6:30 am .....	87
<b>Figura 3-21:</b> Descomposición de las series de tiempo.....	88
<b>Figura 3-22:</b> Gráficos de autocorrelación de las series exterior, interior IC e interior ISC	89
<b>Figura 3-23:</b> Diagnostico del modelo SARIMA (2,0,2)(4,0,2)[24] para la serie de datos de temperatura del exterior .....	91
<b>Figura 3-24:</b> Predicciones del modelo SARIMA (2,0,2)(4,0,2)[24] ] para la serie de datos de temperatura del exterior .....	91
<b>Figura 3-25:</b> Predicciones del modelo de alisado exponencial estacional para la serie de datos de temperatura del exterior .....	92
<b>Figura 3-26:</b> Diagnostico del modelo SARIMA (2,0,2)(2,0,2)[24] para la serie de datos de temperatura del interior del invernadero con sistema de calefacción.....	93
<b>Figura 3-27:</b> Predicciones del modelo SARIMA (2,0,2)(2,0,2)[24] para la serie de datos de temperatura del interior del invernadero con sistema de calefacción .....	94
<b>Figura 3-28:</b> Predicciones del modelo de alisado exponencial estacional para la serie de datos de temperatura del interior del invernadero con sistema de calefacción .....	95
<b>Figura 3-29:</b> Diagnostico del modelo SARIMA (2,0,2)(2,0,2)[24] para la serie de datos de temperatura del interior del invernadero sin sistema de calefacción (ISC).....	96
<b>Figura 3-30:</b> Predicciones del modelo SARIMA (2,0,2)(2,0,2)[24] para la serie de datos de temperatura del interior del invernadero sin sistema de calefacción (ISC).....	96
<b>Figura 3-31:</b> Predicciones del modelo de alisado exponencial estacional para la serie de datos de temperatura del interior del invernadero sin sistema de calefacción (ISC) .....	97
<b>Figura A-1:</b> Características de los colectores solares seleccionados.....	104
<b>Figura A-2:</b> Inclinación optima del colector, radiación solar y producción de energía....	105
<b>Figura A-3:</b> Especificaciones técnicas de los colectores solares .....	106
<b>Figura A-4:</b> Distribución propuesta para el intercambiador de calor.....	107
<b>Figura A-5:</b> Accesorios del sistema propuesto.....	111
<b>Figura A-6:</b> Curva de la bomba seleccionada - 2ACM150. ....	113
<b>Figura A-7:</b> Control manual del suelo radiante .....	114
<b>Figura A-8:</b> Control programado del suelo radiante .....	115
<b>Figura A-9:</b> Ajuste semanal encendido y apagado bomba.....	116
<b>Figura A-10:</b> Ficha técnica del módulo propuesto.....	117

<b>Figura A-11:</b> Características de la pantalla OBSCURA 10075 FB A+BW .....	123
<b>Figura A-12:</b> Características de la pantalla SOLARWOVEN ULTRA .....	124
<b>Figura A-13:</b> Características de la pantalla ALUMINEX 65%.....	124

## Lista de tablas

<b>Tabla 2-1:</b> Parámetros del modelo matemático propios del invernadero evaluado.....	27
<b>Tabla 2-2:</b> Variables de continuidad, momentum y energía.....	31
<b>Tabla 2-3:</b> Coeficientes de transferencia de calor del ambiente del invernadero.....	38
<b>Tabla 2-4:</b> Temperaturas de la tubería y condiciones climáticas externas.....	39
<b>Tabla 2-5:</b> Coeficiente de convección y temperatura de la tubería en acero y en PVC ..	39
<b>Tabla 2-6:</b> Coeficiente de convección y temperatura de la tubería de Oxy Pex y Coeficiente de convección y temperatura de la tubería de PVC .....	40
<b>Tabla 2-7:</b> Coeficiente de convección y temperatura de la tubería en acero y en Oxy Pex .....	41
<b>Tabla 2-8:</b> Características de transferencia del plástico y la pantalla térmica.....	41
<b>Tabla 2-9:</b> Descripción técnica de los sensores de medición climática exterior.....	45
<b>Tabla 2-10:</b> Descripción técnica de los sensores de medición microclimática .....	45
<b>Tabla 3-1:</b> Errores absolutos entre la experimentación y el modelo CFD .....	63
<b>Tabla 3-2:</b> Análisis Anova del cambio de material con una temperatura inicial del agua de 42°C .....	67
<b>Tabla 3-3:</b> Análisis ANOVA general para evaluar el cambio de temperatura del agua, en cada material de tubería.....	67
<b>Tabla 3-4:</b> Análisis ANOVA detallado para evaluar el cambio de temperatura del agua, en la tubería de acero .....	68
<b>Tabla 3-5:</b> Análisis ANOVA de los tres (3) materiales con una temperatura del agua de 80 °C .....	71
<b>Tabla 3-6:</b> Análisis ANOVA de la tubería en PVC y Acero con una temperatura del agua de 80 °C .....	71
<b>Tabla 3-7:</b> Análisis ANOVA de la tubería en Oxy Pex, comparada con el Acero y el PVC, con una temperatura del agua de 80 °C .....	72
<b>Tabla A-1:</b> Resultados del cálculo de eficiencias reales y energía aprovechable.....	106
<b>Tabla A-2:</b> Datos de diseño para el intercambiador de calor.....	107
<b>Tabla A-3:</b> Índice de rendimiento del sistema complementario .....	119
<b>Tabla A-4:</b> cálculo de la potencia que se espera del panel .....	120
<b>Tabla A-5:</b> Niveles óptimos de iluminación para algunos cultivos de la sábana de Bogotá .....	126

## Introducción

En los últimos tres siglos, el uso desmedido de combustibles fósiles ha desencadenado el cambio climático, contribuyendo al calentamiento global y generando alteraciones significativas en las dinámicas climáticas de la Tierra (Nations United, 2020). Esta crisis ambiental impacta diversos sectores económicos, entre ellos, la industria, la energía y la agricultura, todos emisores significativos de gases de efecto invernadero.

El sector agrícola, intrínsecamente dependiente de las condiciones climáticas, se ve directamente afectado por estos cambios, incluso bajo la protección de estructuras como los invernaderos (FAO, 2002), siendo necesario el desarrollo de diseños adecuados de climatización para generar condiciones micro climáticas apropiadas para el desarrollo de cultivos (Villagran et al., 2018).

En regiones como la sabana de Bogotá, la problemática se agrava por la falta generalizada de sistemas de climatización (Villagran et al., 2018), atribuida a los costos energéticos asociados. No obstante, la calefacción pasiva y el aprovechamiento de energías renovables, ofrecen ser una soluciones eficientes para minimizar los costos operativos y optimizar el uso de recursos naturales (Seo & Seo, 2021; Yu et al., 2018).

Los principios clave de la climatización pasiva buscan maximizar el confort térmico en edificaciones aprovechando las condiciones climáticas naturales. Estrategias como la captación solar (orientación adecuada, materiales absorbentes y sombreado), ventilación natural (diseño de ventanas y aberturas), aislamiento térmico (materiales aislantes), inercia térmica (almacenamiento y liberación gradual del calor), diseño bioclimático (consideración del entorno y vegetación), control térmico interno (elementos ajustables para luz y ventilación) y gestión de la humedad para prevenir problemas como condensación y moho,

reducen la dependencia de sistemas que requieren energía externa, promoviendo la eficiencia y sostenibilidad (Müller, 2006).

Investigaciones más recientes concluyen que la combinación de fuentes de energías renovables para climatizar invernaderos reduce el impacto ambiental en comparación con métodos convencionales (Ntinas et al., 2017). Otros autores se centran en el aprovechamiento de la energía solar con materiales de cambio de fase, utilizando muros como almacenamiento térmico (Berroug et al., 2011; Liu & Yang, 2017).

En los países de la región tropical, los invernaderos de cubierta plástica son predominantes, careciendo de sistemas de climatización y mostrando un comportamiento inadecuado para el crecimiento de las plantas (Villagrán et al., 2022; Villagrán & Rodríguez, 2021). Estudios revelan que los sistemas convencionales serían poco eficientes en estas estructuras, debido a pérdidas energéticas y la baja capacidad del plástico para retener radiación térmica (Villagrán et al., 2021; Villagrán & Bojacá, 2019c).

Para determinar la temperatura dentro de un invernadero, se utiliza el monitoreo micro climático con sensores en diversos puntos dentro de la estructura. Esta práctica proporciona información relevante que se puede relacionar con el comportamiento agronómico de las especies cultivadas (Díaz et al., 2018; Villagrán & Bojacá, 2019a). Además, la simulación numérica mediante dinámica de fluidos computacional también se ha utilizado ampliamente para determinar la temperatura en invernaderos (Bournet & Boulard, 2010; Villagran et al., 2020; Villagrán et al., 2021).

El modelado se ha convertido en una herramienta esencial para evaluar la temperatura y otras variables de microclima en invernaderos (Katzin et al., 2022). Entre los diferentes tipos de modelos, se destacan los modelos físicos basados en ecuaciones de balances de masa y energía (Ahamed et al., 2018; Villagrán & Bojacá, 2019b), así como los modelos de caja negra que emplean algoritmos de aprendizaje (Hongkang et al., 2018).

En el contexto de modelado, existen tres enfoques principales: caja blanca, caja negra y caja gris (Cardona et al., 2020).

**Caja Blanca (White Box):**

- Se caracteriza por un enfoque detallado y transparente.
- Ofrece acceso completo y conocimiento interno del sistema.
- Conoce todos los detalles internos, estructuras y algoritmos.
- Usualmente se emplea en el desarrollo de software y pruebas unitarias.
- Estructura de ecuaciones algebraicas.

**Caja Negra (Black Box):**

- Adopta un enfoque orientado a resultados externos.
- No tiene conocimiento detallado del funcionamiento interno del sistema.
- Se trata como una "caja" donde se ingresan entradas y se observan las salidas.
- Se centra en la funcionalidad y comportamiento externo.
- Común en pruebas de sistemas y evaluación de software.
- Estructuras de ecuaciones diferenciales ordinarias o parciales.

**Caja Gris (Gray Box):**

- Es un enfoque intermedio que combina elementos de caja blanca y caja negra.
- Ofrece acceso parcial al conocimiento interno del sistema.
- No conoce completamente el funcionamiento interno, pero tiene cierta información.
- Puede ser útil en situaciones donde conocer algunos detalles internos es beneficioso, pero no es necesario tener una comprensión completa.

Este último enfoque, la caja gris, presenta un equilibrio entre la transparencia de la caja blanca y la simplicidad de la caja negra, permitiendo un nivel de comprensión intermedio del sistema.

El modelado micro climático de invernaderos se ha convertido en un área de gran interés investigativo y didáctico para comprender el funcionamiento físico de estos ambientes de producción agrícola desde la década de 1960 (Businger, 1963), manteniéndose así hasta la década del 2000 (Gary et al., 1998) y en la actualidad se ha implementado como una herramienta fundamental para la toma de decisiones en el control y gestión microclimática de los invernaderos, así como para el diseño de prototipos y equipos de acondicionamiento climático (Katzin et al., 2022).

En este escenario, la investigación se centra en el diseño y evaluación de un sistema de climatización en un invernadero tipo capilla con doble ventilación fija ubicado en el trópico altoandino, en el centro de investigación de Agrosavia – Tibaitata.

# 1. Objetivos

## 1.1. Objetivo general

Diseñar y evaluar un sistema de climatización para optimizar el microclima de un invernadero tipo capilla con doble ventilación fija construido en el trópico altoandino.

## 1.2. Objetivos específicos

1. Desarrollar un análisis técnico y bibliométrico del estado del arte sobre la temática de estrategias de climatización usadas en invernaderos de cubierta plástica.
2. Identificar la demanda energética para la optimización microclimática de un invernadero tipo capilla con doble ventilación fija del Centro de Investigación Tibaitata – Agrosavia.
3. Diseñar mediante el uso de dinámica de fluidos computacional un sistema de climatización para un invernadero tipo capilla con doble ventilación fija del Centro de Investigación Tibaitata - Agrosavia.
4. Realizar la evaluación numérica y experimental del efecto que genera sobre el microclima de un invernadero tipo capilla con doble ventilación fija, la implementación del sistema de climatización diseñado y construido.

## 2. Metodología

### 2.1. Análisis técnico y bibliométrico del estado del arte

Para este trabajo, se diseñó una metodología de búsqueda estructurada (**Figura 2-1**) con el propósito de llevar a cabo un análisis bibliométrico y técnico de la climatización en invernaderos con energía renovable y almacenamiento térmico, abarcando la producción científica entre 2005 y 2021.

**Figura 2-1:** Metodología de la búsqueda organizada y estructurada empleada en el estudio



Nombre de la fuente: Elaboración propia

La elección de Scopus como base de datos se basó en su alcance internacional y acceso a datos, métricas y herramientas analíticas versátiles (Guerra et al., 2013; Salinas et al., 2022). Se definieron 55 palabras clave para la búsqueda, detalladas en la ecuación (2-1).

(*Greenhouse OR Glasshouse OR "Greenhouse microclimate") AND ( Heat\* OR Cool\* ) AND ( "Heating Greenhouse" OR "Rock-bed heating system" OR "Greenhouse climate control" OR "crop development control" OR "Rock-bed" OR "Renewable energy" OR "Thermal energy storage" OR "Combined heating system" OR "Water filled passive solar sleeves" OR "Latent heat storage" OR "Packed bed solar air heater" OR "Solar energy storage" OR "Solar energy" OR "Ground solar heating system" OR "Storage tank" OR "Flat plate collector" OR "Thermal model" OR "Simulation model" OR "Air temperature" OR "Soil temperature" OR "Heat-pipe" OR "Evaporative cooling greenhouse" OR "Conic basket geothermal heat exchanger" OR "Geothermal heat pump" OR "Energy efficiency" OR "Earth-air heat exchanger" OR "Thermal load leveling" OR "Cooling systems" OR "heating systems" OR "Heating potential" OR "Heating potential" ) AND NOT ("Greenhouse Effect" AND "Carbon Dioxide" AND "Gas Emissions" AND "Greenhouse Gases" AND "Greenhouse Gas" AND "Fossil Fuels" AND "Natural Gas" AND "Costs" AND "Ozone" AND "Air Pollution Control" AND "Greenhouse Gas Emissions" AND "Carbon" AND "Emission Control" AND "Industrial Emissions" AND "Ozone Layer" AND "Economic And Social Effects" AND "Air conditioning" AND "Building" )* **(2-1)**

El análisis bibliométrico evaluó la producción científica anual, tipo de documentos, contribución por país, autores destacados, documentos más citados, palabras clave y redes de coautoría, coocurrencia, citación y acoplamiento bibliográfico, este último sucede a cuando dos artículos, referencian un tercero que coincide en ambas investigaciones (Van & Waltman, 2021). La bibliometría se utilizó como herramienta para evaluar la calidad, influencia e impacto de los documentos y fuentes de producción científica.

Indicadores bibliométricos adicionales, como el Scimago Journal Rank (SRJ) (Riggio, 2017) y el indicador H-index (Herrera et al., 2021), se emplearon para evaluar el impacto y visibilidad de las revistas en Scopus®.

En este análisis bibliométrico, se recopilaron, descargaron y corrigieron datos relacionados con autores, organizaciones, países, palabras clave, fuentes y referencias bibliográficas, abordando errores gramaticales, homónimos y duplicaciones (Herrera et al., 2021).

Se utilizó el software de uso libre VOSviewer, para visualizar la red bibliométrica, considerando distintas unidades de análisis como autores, organizaciones, países, documentos, fuentes de divulgación, palabras clave. Este programa permitió realizar análisis de coautoría, coocurrencia y citas (Ortiz et al., 2021). La construcción de la red se basó en archivos de la base de datos bibliográfica, determinando tipos y unidades de análisis, nodos y enlaces. Los enlaces representan relaciones, como coautoría o coocurrencia, con una fuerza numérica positiva. Los clústeres, identificados por colores, representan subgrupos, y la red se construye visualmente mediante nodos agrupados en clústeres y enlaces entre ellos (Van & Waltman, 2013).

Utilizando estas unidades de análisis, se logró visualizar, explorar e interpretar gráficos bidimensionales que revelan relaciones de coautoría y citas, facilitando un análisis eficiente que impulsa la producción y divulgación del conocimiento (Carrión et al., 2020).

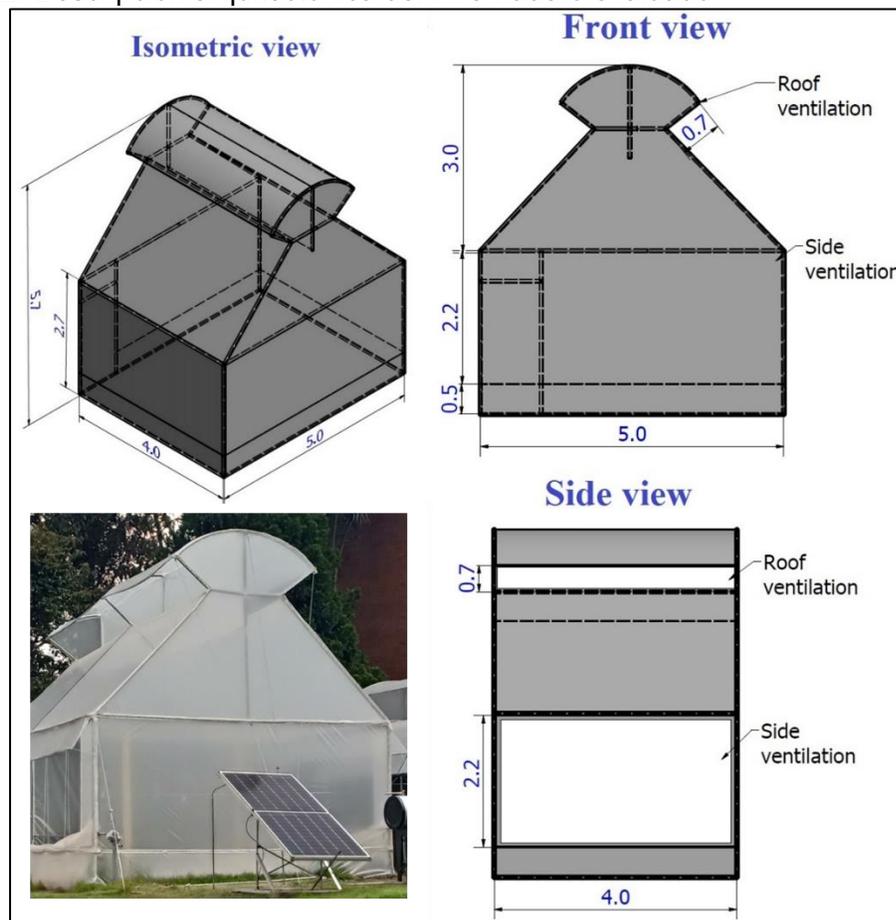
En cuanto al análisis técnico, se examinaron los aspectos técnicos más relevantes de la climatización en invernaderos entre 2005 y 2021. A través de una lectura crítica de los documentos recopilados, se analizaron características como tipos de invernaderos, material de cubierta, área, tipos de cultivos, variables de análisis y métodos de validación. Este análisis se llevó a cabo mediante una base de datos en Excel, permitiendo la identificación de patrones y tendencias en la climatización.

## 2.2. Identificación de la demanda energética del invernadero en estudio

### 2.2.1. Descripción del invernadero en estudio

El invernadero analizado se encuentra ubicado en el municipio de Mosquera Cundinamarca, en el centro de investigación Tibaitata de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – Agrosavia, en la sabana de Bogotá, con las siguientes coordenadas GPS: 4°41'43.89" N 74°12'12.87" W y a una altitud de 2545 msnm. El invernadero tiene un área cubierta de 20 m<sup>2</sup>, proyectados en una longitud lateral y frontal de 4 y 5 m respectivamente, la altura sobre la canal es de 2.7 m y la altura sobre la cumbrera de la ventilación de techo es de 5.7 m (**Figura 2-2**).

**Figura 2-2:** Descripción arquitectónica del invernadero evaluado



Nombre de la fuente: Elaboración propia

El invernadero está equipado con una cubierta plástica de polietileno AgrocLEAR calibre 8 (Figura 2-3), tanto en la región del techo, como en las áreas laterales y frontales, el sistema de ventilación natural está compuesto por dos ventanas laterales con cierre mediante malacate mecánico de operación manual (con dimensiones de 3.6 m de largo y 2 m de ancho) y por una doble ventilación de techo (4 m de largo y 0.705 m de ancho).

**Figura 2-3:** Ficha técnica de la cubierta plastica AgrocLEAR



Plásticos del Campo - Sistemas de Riego  
WWW.AGROPINOS.COM

# AGROCLEAR

Lámina coextruida estabilizada con Hais y antioxidante, desarrollada para cubiertas de invernaderos. La naturaleza especial de los inhibidores UV que contiene, le confieren alta resistencia a la degradación por efecto de la radiación solar. Con una capacidad de difusión de luz elevada, elimina sombras dentro del invernadero y permite un reparto lumínico más homogéneo por toda la planta, que se traduce en mayores rendimientos. Ideal para cultivos de ciclos cortos, y sin tratamientos de químicos fuertes dentro del invernadero.

Sus excelentes propiedades mecánicas hacen que esta lámina presente un óptimo comportamiento en la instalación y ante otros agentes externos como lluvia, etc.

Recomendada para cultivos de Claveles, Pompón, Gerberas y Fillers.

**Generalidades**

ESTABILIZADOR	Hais	
INHIBIDOR	Benzofenona	12 meses 5% de Transmisión entre 290 nm - 340 nm
TONALIDAD	Transparente	
COEXTRUSION	Tres y Cinco capas	
ANCHO	Desde 60 centímetros hasta 12 Metros	
RENDIMIENTO	0,0235 x espesor mil. De pulgada ± 10%	Ej. 0.0235 x 7 = 0.1645 ± 10%

**Propiedades ópticas y térmicas**

	ESPECIFICACIÓN	NORMA
TERMICIDAD	55 % - 10	CPT-I-3
TRANSMISION DE LUZ TOTAL	85 % +/- 5	ASTM D 1003
DIFUSION DE LUZ TOTAL	55 % +/- 5	ASTM D 1003
BLOQUEO UV 290NM-340NM (%TRANSMISION)	2 %	CPT-2-6
TRANSMISION DE LUZ UV A 340 nm	1.5 %	CPT-2-6

**Propiedades mecánicas**

	ESPECIFICACIÓN	NORMA
RESISTENCIA AL IMPACTO	300 g min	ASTM D 1709
RESISTENCIA AL RASGADO		ASTM D 1922
DIRECCION MAQUINA	750 gf min	
DIRECCION TRANSVERSAL	900 gf min	
PORCENTAJE DE ELONGACION A LA ROTURA		ASTM D 882
DIRECCION MAQUINA	750% min	
DIRECCION TRANSVERSAL	1000% min	
CARGA A LA ROTURA		ASTM D 882
DIRECCION MAQUINA	18.0 Mpa min	
DIRECCION TRANSVERSAL	18.0 Mpa min	

Nota: Datos obtenidos para una película espesor 6 Milésimas de pulgada / 150 μ / 600 galgas.  
El uso de la información sobre productos y aplicaciones para otros casos es responsabilidad del cliente













Nombre de la fuente: (Agropinos, 2019)

### 2.2.2. Consideraciones para el sistema de climatización

Garantizar y potenciar la producción agrícola es una de las principales metas en la agricultura protegida, al mismo tiempo que se busca prevenir el estrés en las plantas cultivadas. En este sentido, se establecen condiciones específicas para que el sistema de calefacción propuesto sea ajustado a las exigencias de los pequeños productores. Estas condiciones se detallan a continuación:

- Temperatura mínima: 5°C, por debajo de esta temperatura, se suelen presentar condiciones de estrés en varios cultivos.
- El sistema seleccionado debe contar con un método de fácil ensamblaje que permita ser replicado en diferentes lugares brindando una solución al pequeño agricultor.
- El costo de implementación debe ser bajo.
- Los repuestos e implementos deben ser fáciles de conseguir localmente a fin de reducir el costo de instalación y mantenimiento, de manera que sea accesible al productor.
- Escalable: para poder implementar el sistema en invernaderos de mayor tamaño sin sufrir dramáticos cambios en el costo de implementación.

### 2.2.3. Definición de la demanda energética durante heladas con un modelo dinámico de balance de energía

El modelo dinámico usado en esta investigación y validado sin presencia de cultivo y ningún tipo de acondicionamiento climático con el fin de analizar y reconocer el comportamiento térmico más crítico, se estructuró sobre el modelo de balance de energía utilizado por diversos investigadores en diferentes regiones del mundo. Este modelo se describe mediante la siguiente ecuación diferencial ordinaria (2-2).

$$\frac{dT_a}{dt} = \frac{1}{Vc_p\rho} (Q_s - Q_c - Q_v - Q_{sl} + Q_{co}) \quad (2-2)$$

Donde  $T_a$  (°C) es la temperatura del aire dentro del invernadero,  $t$ (s) es la unidad de cambio de tiempo,  $V$  (m<sup>3</sup>) es el volumen del invernadero,  $c_p$ (J kg<sup>-1</sup> °C<sup>-1</sup>) es el calor específico del aire,  $\rho$  (kg m<sup>-3</sup>) es la densidad del aire,  $Q_s$  (Wm<sup>-2</sup>) es la ganancia de calor debida a la radiación solar,  $Q_c$  (Wm<sup>-2</sup>) es el intercambio de calor a través de la cubierta,  $Q_v$  (Wm<sup>-2</sup>) es la pérdida de calor debida a la ventilación,  $Q_{sl}$  (Wm<sup>-2</sup>) es la pérdida de calor a través del suelo y  $Q_{co}$  (Wm<sup>-2</sup>) es la ganancia de calor debido a la condensación.

El modelo fue programado y las simulaciones numéricas fueron desarrolladas en un ambiente de programación MATLAB-SIMULINK, usando una licencia académica de este software comercial. En dicho software se definieron los parámetros principales del modelo, que incluyen variables de entrada, opciones de simulación y variables de salida tal como se explica en el trabajo desarrollado por (Salazar et al., 2018).

Para la calibración inicial del modelo se siguió la metodología propuesta en el trabajo desarrollado por Salazar et al., (2018). Esta metodología consiste en variar algunos parámetros específicos de la arquitectura del invernadero, con el objetivo de obtener un menor error cuadrático medio entre los valores medidos y simulados, esto es conocido como un problema de optimización no lineal. En nuestro caso se variaron los valores del coeficiente de ventilación efecto del viento  $C_w$ , el coeficiente de infiltración  $C_f$ , el coeficiente de transferencia de calor de la cubierta  $\alpha_c$  y el coeficiente de intercambio de calor a través del suelo  $k_s$ .

Por otro lado, para medir el ajuste de los datos simulados con los medidos se usaron parámetros de bondad de ajustes como el error absoluto medio (MAE), el error cuadrático medio (MSE) y el error porcentual absoluto medio (MAPE). Finalmente, se determinó la eficiencia de predicción (EF) del modelo de balance, estos parámetros de bondad de ajuste fueron calculados mediante las siguientes expresiones matemáticas **(2-3)**, **(2-4)**, **(2-5)** y **(2-6)**:

$$MAE = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |T_{si} - T_{mi}| \quad (2-3)$$

$$MSE = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (T_{si} - T_{mi})^2 \quad (2-4)$$

$$MAPE = \left( \frac{MSE}{T_{mi}} \right) * 100 \quad (2-5)$$

$$EF = 1 - \frac{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (T_{si} - T_{mi})^2}{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |T_{si} - T_{mi}|} \quad (2-6)$$

Donde  $i$  es el dato puntual,  $m$  es el número del conjunto total de datos,  $T_{si}$  y  $T_{mi}$  son las temperaturas simuladas y medidas en el punto  $i$ . Una vez calibrado el modelo se usó un set de datos obtenido entre el periodo comprendido entre las 00:00 horas del 21 de mayo y las 23:59 horas del 25 de mayo, con el fin de implementar el modelo matemático posterior al proceso de calibración y determinar la precisión de este, con los siguientes parámetros:

**Tabla 2-1:** Parámetros del modelo matemático propios del invernadero evaluado

Símbolo	Descripción	Valor	Unidades	Fuente
$V$	Volumen del invernadero	86	$m^3$	Calculado
$A_s$	Área de suelo cubierta por el invernadero	20	$m^2$	Calculado
$A_c$	Área de la cubierta y paredes	97.76	$m^2$	Calculado
$A_v$	Área de ventilación (lateral y de techo)	20.04	$m^2$	Calculado
$c_p$	Calor específico del aire a presión constante	1.006	$J \text{ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$	Calculado
$P$	Presión atmosférica	742.6	hPa	Calculado
$\rho$	Densidad del aire	1.1	$\text{kgm}^{-3}$	Calculado
$\alpha_c$	Coefficiente de transferencia de calor de la cubierta.	4.3	$W \text{ m}^{-2}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$	Calibrado
$l_0$	Largo de la ventilación	3.6	m	Calculado
$w_0$	Ancho de la ventilación	2	m	Calculado
$C_d$	Coefficiente de descarga	0.64	Adimensional	Calculado
$C_f$	Coefficiente de infiltración	0.011	$m^3 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$	Calibrado
$C_w$	Coefficiente de ventilación efecto del viento	0.045	Adimensional	Calibrado
$P_s$	Profundidad de medida de la temperatura del suelo	0.15	m	Experimental

Nombre de la fuente: Elaboración propia

En la ecuación (2-2),  $Q_s$  representa la ganancia solar, generalmente nula al comenzar la helada y mínima al finalizar,  $Q_{sl}$  corresponde a los aportes desde el suelo y  $Q_{co}$  es la ganancia asociada a la condensación. Aunque esta última es relevante en condiciones de helada, el enfoque principal se centra en las pérdidas térmicas del sistema, consideradas como el componente crítico en este escenario.

A pesar de su eficacia en la predicción de la temperatura interna, el modelo enfrenta un desafío debido a la falta de datos completos para simular heladas específicas. Se propone

utilizar este modelo para estimar el requerimiento energético durante condiciones de helada, definiendo la demanda energética ( $Q_{demanda}$ ) como la suma de las pérdidas del sistema durante esta condición **(2-7)**:

$$Q_{demanda} = Q_c + Q_v \quad (2-7)$$

Por su parte la pérdida de calor por la cubierta se puede modelar con la siguiente expresión **(2-8)**:

$$Q_c = \alpha_c \left( \frac{A_c}{A_s} \right) (T_i - T_o) \quad (2-8)$$

Donde  $\alpha_c$  es el coeficiente de transferencia de calor de la cubierta en  $W m^{-2} °C^{-1}$ , representa la capacidad de la cubierta para transferir calor entre el aire interior y el aire exterior.  $A_c$  y  $A_s$  son el área de la cubierta incluyendo las paredes y el área del suelo cubierto respectivamente en  $m^2$ ,  $T_i$  y  $T_o$  es la temperatura del aire interior y exterior, respectivamente en  $°C$ , cuya diferencia impulsa el flujo de calor a través de la cubierta. En cuanto al caudal de calor perdido por ventilación se modela mediante la siguiente ecuación **(2-9)**:

$$Q_v = \varphi_v * \rho * c_p * (T_i - T_o) \quad (2-9)$$

Donde  $\varphi_v$  es la tasa de ventilación por unidad de área de piso en  $m^3 m^{-2} s^{-1}$ , esta tasa de ventilación puede ser calculada de acuerdo con la relación planteada por (E. Baeza et al., 2014) **(2-10)**:

$$\varphi_v = \left( \frac{A_v}{2} \right) * C_d * \sqrt{C_w} * w_s + \varphi_{s_v} \quad (2-10)$$

Donde  $A_v$  es el área de ventilación en  $m^2$ ,  $\varphi_{s_v}$  es la tasa de ventilación generada por infiltración por unida de área piso en  $m^3 s^{-1}$ ,  $w_s$  es la velocidad del viento exterior en  $ms^{-1}$ ,  $C_w$  es el coeficiente de ventilación efecto del viento y  $C_d$  es el coeficiente de descarga que es característico para cada invernadero y se puede calcular para este tipo de invernadero mediante el uso de las siguientes dos ecuaciones **(2-11)** y **(2-12)**:

$$C_d = F_0^{-0.5} \quad (2-11)$$

$$F_0 = 1.75 + 0.7e^{-\left[\frac{l_0}{w_0}\right]/32.5} \quad (2-12)$$

Donde  $F_0$  es el coeficiente de pérdida de presión,  $l_0$  y  $w_0$  son la longitud y el ancho de las ventanas, respectivamente, en m. Para este caso específico  $A_v$  está compuesta por el área de ventilación lateral  $2 * A_{vS}$  y el área de ventilación de techo  $A_{vR}$ , por lo tanto  $A_v$  se calcula mediante las siguientes ecuaciones **(2-13)**, **(2-14)** y **(2-15)**:

$$A_v = 2 * A_{vS} + A_{vR} \quad (2-13)$$

$$A_{vS} = l_{vS} * w_{vS} \quad (2-14)$$

$$A_{vR} = l_{vR} * w_{vR} \quad (2-15)$$

Donde  $l_{vS}$  y  $l_{vR}$  son la longitud en m de las ventanas laterales y de techo,  $w_{vS}$  y  $w_{vR}$  es el ancho en m de las ventanas laterales y de techo. Esta modificación se realiza debido a que el invernadero evaluado, durante el periodo de 7:00 a 17:00 horas permanece con las áreas de ventilación lateral abiertas y durante la noche en el periodo comprendido entre las 17:00 y las 7:00 horas, estas mismas áreas de ventilación permanecen cerradas. De otro lado la tasa de ventilación por infiltración se calcula con la siguiente ecuación **(2-16)**:

$$\varphi_{Sv} = A_s * C_f \quad (2-16)$$

Donde  $C_f$  es el coeficiente de infiltración en  $m^3 m^{-2} s^{-1}$ .

Esta elección se fundamenta en la premisa de que, durante una helada, las pérdidas de calor ( $Q_c$  y  $Q_v$ ) representan la demanda que el sistema de climatización debe cubrir para mantener la temperatura deseada, reemplazando en **(2-7)** con **(2-8)**, **(2-9)**, **(2-10)**, **(2-11)**, **(2-12)**, **(2-15)** y **(2-16)** se obtiene **(2-17)**.

$$Q_{demanda} = \alpha_c \left( \frac{A_c}{A_s} \right) (T_i - T_o) + \left( \frac{l_{vR} * w_{vR}}{2} \right) * 1.75 + 0.7e^{-\left[\frac{l_0}{w_0}\right]/32.5}^{-0.5} \quad (2-17)$$

$$* \sqrt{C_w} * w_s + A_s * C_f * \rho * c_p * (T_i - T_o)$$

## **2.3. Diseño mediante el uso de dinámica de fluidos computacional de un sistema de climatización para el invernadero en estudio**

### **2.3.1. Configuración del modelo numérico en CFD**

Se utilizó el software de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) para modelar y simular el sistema de calefacción en el invernadero. El modelo incorpora la geometría del invernadero y el sistema de tubería en el suelo, elaborados con Design Modeler de Ansys Fluent. Se asignaron propiedades térmicas adecuadas a los materiales y se establecieron las condiciones de contorno basadas en las mediciones de las condiciones climáticas reales.

El modelo discretiza el espacio y tiempo utilizando el método de elementos finitos, en conjunto con el algoritmo de acoplamiento presión-velocidad SIMPLE (un método semi-implícito para ecuaciones relacionadas con la presión), en el análisis. Se aplicaron esquemas de discretización de segundo orden en las ecuaciones de momentum, energía y continuidad para lograr una mayor precisión en los resultados. Se estableció un criterio de convergencia uniforme para todas las variables, en un umbral de  $1 \times 10^{-6}$  para determinar el punto de convergencia.

El CFD utiliza ecuaciones fundamentales de la mecánica de fluidos para describir el comportamiento de las propiedades del fluido (como velocidad y temperatura) en un dominio específico. Estas ecuaciones son no lineales parciales y se conocen como las "Ecuaciones de Navier-Stokes" y pueden expresarse como la ecuación de convección – difusión **(2-18)**:

$$\frac{\partial \rho \varphi}{\partial t} + \frac{\partial (\rho v \varphi)}{\partial X_j} = \frac{\partial}{\partial X_j} \left( \Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial X_j} \right) + S \varphi \quad (2-18)$$

Donde  $\varphi$  es la propiedad de transporte en una forma adimensional,  $t$  (s) denota el instante de tiempo,  $\Gamma$  representa el coeficiente de difusión en  $m^2/s$ ,  $v$  (m/s) describe los componentes de la velocidad del fluido en m/s,  $X_j$  se refiere a las coordenadas en cada dirección espacial en m,  $\rho$  es la densidad del fluido en  $kg/m^3$  y  $S\varphi$  denota el término fuente generalizado por unidad de volumen y tiempo.

La ecuación describe cómo la propiedad  $\varphi$  se transporta en el fluido. El lado izquierdo de la ecuación representa el cambio de  $\varphi$  en el tiempo y el espacio debido al transporte convectivo ( $\rho v \varphi$ ) y el término de difusión ( $\Gamma \partial \varphi / \partial X_j$ ). El lado derecho de la ecuación representa el término fuente  $S\varphi$ , que puede representar una fuente o sumidero de la propiedad  $\varphi$  en el fluido. En la **Tabla 2-2** se proporcionan las entradas relevantes de  $\varphi$ ,  $\Gamma$  y  $S\varphi$  para construir las ecuaciones de transporte de momento, energía y masa.

**Tabla 2-2:** Variables de continuidad, momentum y energía

Ecuación	$\varphi$	$\Gamma$	$S\varphi$
Continuidad	1	0	0
Momentum x	U	$\mu$	$-\frac{\partial p_d}{\partial x}$
Momentum y	V	$\mu$	$-\frac{\partial p_d}{\partial y} + \rho g \beta (T - T_\infty)$
Energy	T	$\lambda / C_p$	$\Phi / C_p$

Nombre de la fuente: (Piscia et al., 2012)

Para abordar las celdas cercanas a la pared, se implementó el tratamiento de pared mejorado de Fluent. En este enfoque, se fragmenta el dominio completo en una región afectada por la viscosidad y otra completamente turbulenta. Este método se adapta a valores de  $y^+$  en la pared que oscilan entre 1 y 200, donde  $y^+$  representa una distancia no dimensional definida por la siguiente expresión **(2-19)**(2-18):

$$y^+ = \frac{\rho u_\tau y_p}{\mu} \quad (2-19)$$

Donde:  $u_\tau = \sqrt{\tau_w/\rho_w}$  denota la velocidad de fricción,  $y_p$  es la distancia desde el punto P (valor del centro de la celda) hasta la pared,  $\mu$  es la viscosidad dinámica y  $\tau$  es la tensión de corte.

Se resolvieron las ecuaciones diferenciales parciales que gobiernan la cantidad de movimiento y la energía, teniendo en cuenta las transferencias de calor por convección, radiación y conducción para representar con precisión los fenómenos térmicos presentes en el invernadero. Dado que el flujo de aire en el invernadero es turbulento, se implementó un modelo de turbulencia k- $\epsilon$  para su descripción, incorporando además los efectos de convección libre generados por los campos de baja velocidad del aire. En este contexto, la variable k representa la energía cinética, mientras que  $\epsilon$  denota la tasa de disipación de energía en unidad de volumen y tiempo (Gholamalizadeh & Kim, 2014; Lam & Bremhorst, 1981; Misra et al., 2013).

El modelo de turbulencia k- $\epsilon$  destaca como la elección predominante para simular las características del flujo de aire en condiciones turbulentas en invernaderos mediante el uso del modelo CFD (Piscia et al., 2012). Está representado por las siguientes ecuaciones de transporte:

Para la energía cinética turbulenta (k) **(2-20)**:

$$\frac{\partial(\rho UK)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vk)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho wk)}{\partial z} = \mu + \mu_t \sigma_k + \left( \frac{\partial^2 k}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 k}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 k}{\partial z^2} \right) + \mu_t \rho (P - G_B) - \rho \epsilon \quad (2-20)$$

Para disipación  $\epsilon$  **(2-21)**:

$$\frac{\partial(\rho u \epsilon)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v \epsilon)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w \epsilon)}{\partial z} = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} + \left( \frac{\partial^2 \epsilon}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \epsilon}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \epsilon}{\partial z^2} \right) + C_1 \mu_t \rho \frac{\epsilon}{k} (f_1 P - G_B) - C_2 f_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (2-21)$$

Donde en los subíndices k representa la energía cinética turbulenta,  $\epsilon$  es la tasa de disipación,  $\sigma$  son los números de Prandtl, P denota la presión calculada, y  $\mu_t$  es la viscosidad turbulenta.  $G_B$  representa la producción de energía cinética turbulenta, calculada como se presenta a continuación **(2-22)**:

$$G_B = \frac{G\beta}{\rho\sigma_t} \frac{\partial(T_i - T_{ref})}{\partial y} \quad (2-22)$$

Donde  $T_i$  es la temperatura del aire interior,  $\sigma_t$  es el número de Prandtl para la turbulencia,  $T_{ref}$  es la temperatura de referencia,  $\beta$  es el coeficiente voluminal de expansión térmica  $1/T_{ref}$ , y  $f_1$  y  $f_2$  son relaciones auxiliares de la disipación viscosa. Las constantes del modelo de turbulencia (k- $\epsilon$ ) son:  $C_1 = 1.44$ ,  $C_2 = 1.92$ ,  $\sigma_k = 1$ ,  $\sigma_\epsilon = 1.3$  y  $\sigma_t = 0.85$ .

Para simplificar la resolución, no se incluyó ningún tipo de cultivo en el modelo tridimensional CFD. Esto se hizo para acelerar el cálculo numérico y establecer el comportamiento del flujo de aire y la temperatura bajo el escenario más crítico posible. Al eliminar el cultivo, se expone el invernadero a su estado más desafiante, donde no hay intervención vegetal para regular la temperatura a través de la transpiración ni interacción con la radiación solar (Duarte et al., 2022) o se encuentra en una etapa fenológica inicial, donde su interacción con el microclima puede considerarse insignificante o despreciable en las simulaciones (Villagran, Jaramillo, et al., 2020). Este escenario sin cultivo representa la situación más crítica, ya que revela los límites extremos del sistema en términos de capacidad de control térmico, proporcionando así una evaluación rigurosa de su rendimiento en condiciones adversas y permitiendo identificar áreas clave de mejora.

Se consideró el modelo de Boussinesq para simular las variaciones en la densidad del aire en el invernadero generadas por cambios de temperatura. La fuerza de flotación debido a las diferencias en la densidad del aire se agrega como un término fuente en la ecuación de impulso.

Se utilizó el modelo de orden discreto (DO) para evaluar el componente de radiación que facilita la resolución de la radiación en superficies semitransparentes al considerar que la energía radiante se desplaza a través del medio a su propia velocidad en todas las direcciones simultáneamente. Esto posibilita la incorporación de la radiación como un término fuente volumétrico en la ecuación de energía (2-23), permitiendo su modelado en medios semitransparentes, como los plásticos utilizados en los invernaderos (Piscia et al., 2012). El modelo DO se emplea para analizar condiciones nocturnas, resolviendo el

fenómeno de radiación desde el suelo hacia el invernadero, tratándolo como una condición de contorno (Montero et al., 2013; Piscia et al., 2012).

$$\dot{q} = \alpha_i \left( 4\pi I_{b\lambda}(\vec{\Rightarrow}_r) - \int_{4\pi} I(\vec{\Rightarrow}_r, \vec{\Rightarrow}_s) d\Omega \right) \quad (2-23)$$

El modelo DO resuelve la ecuación general de transferencia de radiación (RTE) para un número finito de ángulos sólidos discretos, cada uno asociado con una dirección de vector  $\vec{\Rightarrow}_s$  fija en el sistema cartesiano global (x, y, z). Transforma la ecuación RTE en una ecuación de transporte para la intensidad de radiación en las coordenadas espaciales (x, y, z). El modelo DO resuelve tantas ecuaciones de transporte como direcciones  $\vec{\Rightarrow}_s$  haya (Baxevanou et al., 2008). La RTE para la intensidad espectral  $I_\lambda(\vec{\Rightarrow}_r, \vec{\Rightarrow}_s)$  se formula mediante la siguiente expresión (2-24):

$$\begin{aligned} \nabla \cdot (I_\lambda(\vec{\Rightarrow}_r, \vec{\Rightarrow}_s) \vec{\Rightarrow}_s) + (a_\lambda + \sigma_s) I_\lambda(\vec{\Rightarrow}_r, \vec{\Rightarrow}_s) \\ = a_\lambda n^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I_\lambda(\vec{\Rightarrow}_r, \vec{\Rightarrow}_s) \Phi(\vec{\Rightarrow}_s, \vec{\Rightarrow}_s) d\Omega' \end{aligned} \quad (2-24)$$

Donde  $I_\lambda$  es la intensidad de radiación en una longitud de onda;  $\vec{\Rightarrow}_r, \vec{\Rightarrow}_s$  son los vectores que indican la posición y la dirección, respectivamente;  $\vec{\Rightarrow}_s'$  es el vector de dirección de dispersión;  $a_\lambda, \sigma_s$  son los coeficientes de dispersión y absorción espectral;  $n$  es el índice de refracción;  $\nabla$  es el operador de divergencia;  $\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzmann ( $5.669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}^4$ ),  $\Phi$ ,  $T$  y  $\Omega$  son la función de fase, la temperatura local ( $^\circ\text{C}$ ) y el ángulo sólido, respectivamente.

En esta ecuación, asumimos que las propiedades como el índice de refracción, el coeficiente de dispersión, y la función de fase no dependen de la longitud de onda. Sin embargo, al calcular la emisión de un cuerpo negro y al definir las condiciones en las paredes semitransparentes, consideramos su variación con respecto a la longitud de onda. También suponemos que la función de fase  $\Phi$  es isotrópica. El espacio angular de  $4\pi$  en

cualquier punto se divide en  $N\theta \times N\phi$  ángulos sólidos de extensión  $\omega_i$ , conocidos como ángulos de control. Los ángulos  $\theta$  y  $\phi$  representan las direcciones polares y azimutales, respectivamente y se miden en relación con el sistema cartesiano global (x, y, z) (Baxevanou et al., 2008). En regiones sólidas, no resolvemos la RTE, pero consideramos que estas áreas participan en el intercambio radiativo a través de condiciones de contorno.

Las paredes laterales y la cubierta del invernadero se modelaron como sólidos semitransparentes, considerando propiedades ópticas para la radiación infrarroja, asumiendo una independencia de la longitud de onda con transmitancia 0.19, absorción 0.69 y reflectancia 0.12. Para la pantalla térmica, se asignaron valores de 0.42, 0.05 y 1.0 para transmitancia, emisividad y reflectividad, respectivamente.

El intercambio de radiación entre el invernadero y el entorno exterior se simuló considerando el cielo como un cuerpo negro a una temperatura equivalente  $T_{sky}$  en °K, para condiciones de cielo despejado utilizando la relación (2-25) establecida por Swinbank (1963):

$$T_{sky} = 0.0552 \times T_{amb}^{1.5} \quad (2-25)$$

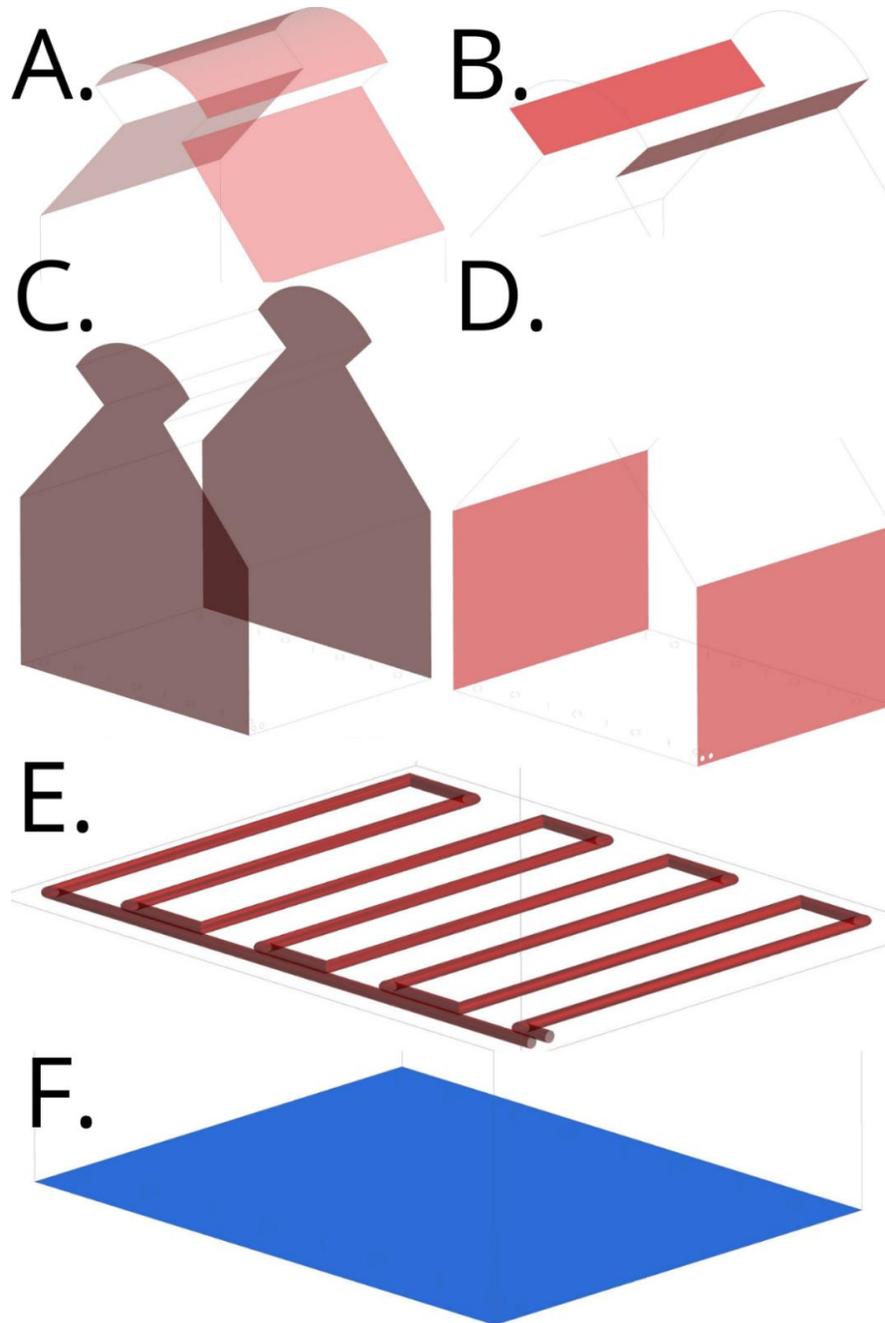
Esta expresión representa un modelo directo que estima la temperatura del cielo a través del valor de la temperatura del aire ambiente ( $T_{amb}$ ). Para la condición de cielo nublado se estableció utilizando una evolución del modelo Swinbank (2-26) propuesto por Fuentes (1987):

$$T_{sky} = 0.037356 \times T_{am}^{1.5} + 0.32 \times T_{amb} \quad (2-26)$$

El dominio computacional se dividió en una fase fluida, representada por aire seco, con condiciones de frontera de pérdida de calor por convección asignadas a elementos como el suelo (F), paredes aisladas (C) y no aisladas (D), así como el techo (A) (**Figura 2-4**). En el caso del sistema de tubería (E) se aplicó una condición de tipo Dirichlet con un valor de temperatura conocido. Además, se estableció un límite perimetral de presión de salida en la apertura cenital (B), asumiendo un movimiento de aire inducido por flotabilidad. Por lo tanto, no se consideró un límite perimetral de entrada. El suelo del invernadero fue modelado como un sólido opaco, y se implementó una condición de límite para la

transferencia de calor al interior del invernadero, siguiendo un enfoque similar al utilizado en el estudio realizado por Piscia et al. (2012).

**Figura 2-4:** Condiciones de frontera asignadas para A. Techo, B. Salida, C. Paredes aisladas, D. Paredes no aisladas, E. Sistema de tubería y F. Suelo.



Nombre de la fuente: Elaboración propia

### **2.3.2. Simulación y optimización del sistema**

El dominio computacional abarcó el volumen del invernadero y su entorno inmediato. Las condiciones de contorno se impusieron en las superficies del suelo, tubería, paredes y techo.

Mediante simulaciones CFD, se llevó a cabo un análisis de sensibilidad al variar materiales, temperatura del agua y dimensiones de la tubería en el suelo, con el objetivo de optimizar el diseño y mejorar la eficiencia del sistema, adaptándolo a las condiciones locales específicas del invernadero, comparando los resultados a través de análisis Anova para identificar si las diferencias son consideradas significativas o no. La validación del CFD se realizó al comparar los resultados obtenidos en las simulaciones con datos medidos experimentalmente, garantizando la precisión del modelo numérico.

Estas simulaciones numéricas permitieron obtener campos detallados de temperatura y velocidad del viento dentro del invernadero, evaluando su comportamiento en diversas condiciones. Además, permiten analizar el aporte energético del sistema de calefacción y su capacidad para controlar las condiciones de temperatura en el invernadero. La flexibilidad del enfoque del CFD facilitó el análisis de escenarios no construidos y adaptación a situaciones locales, lo que resultó crucial en la optimización del sistema y permite considerar combinaciones futuras con otros sistemas de calefacción.

### **2.3.3. Coeficientes de transferencia de calor calculados, temperatura superficial del sistema de tubería y condiciones climáticas externas**

Con apoyo en la norma ABNT/CB-002 PROJETO ABNT NBR 15220-2/ AGOSTO 2021, Desempenho térmico de edificações Parte 2: Componentes e elementos construtivos - Resistência, transmitância térmica - Métodos de cálculo, especialmente en los apartados

6.8 Resistencias superficiales (horizontal =  $0.13 \text{ m}^2\text{k/w}$  y descendente =  $0.17 \text{ m}^2\text{k/w}$ ) y 6.10.2. Espacios de aire en el techo (con baja emisividad y flujo descendente =  $0,69 \text{ m}^2\text{k/w}$ ) (ABNT, 2022), se calcularon las temperaturas en la sección de la pantalla térmica que está en contacto con el microclima. Esto se debió a que las temperaturas conocidas se encontraban en el lado opuesto de dicha pantalla. Posteriormente, se calcularon los coeficientes de transferencia de calor por convección natural sobre superficies, como se detalla en Cengel, (2007). Estos cálculos se realizaron considerando las particularidades de cada sección (suelo, paredes aisladas, paredes no aisladas y techo), con el propósito de generar los datos de entrada necesarios que definieron las condiciones de frontera y validación del modelo en CFD. A continuación, se presentan las tablas con estos datos, resaltando en verde aquellos asociados a la activación del sistema (**Tabla 2-3, Tabla 2-4, Tabla 2-5, Tabla 2-6 y Tabla 2-7**):

**Tabla 2-3:** Coeficientes de transferencia de calor del ambiente del invernadero

Fecha	Hora	h Tubo ( $\text{W/m}^2\text{°C}$ )	h Suelo ( $\text{W/m}^2\text{°C}$ )	h Paredes aisladas ( $\text{W/m}^2\text{°C}$ )	h Paredes no aisladas ( $\text{W/m}^2\text{°C}$ )	h Techo ( $\text{W/m}^2\text{°C}$ )
17/04/2023	10:30:00 p. m.	4.90	10.58	1.06	1.49	0.68
17/04/2023	11:15:00 a. m.	3.90	9.54	1.27	1.79	0.57
17/04/2023	12:00:00 a. m.	4.68	10.07	1.24	1.75	0.58
18/04/2023	12:45:00 a. m.	3.82	10.39	1.20	1.69	0.57
18/04/2023	01:30:00 a. m.	4.49	10.65	1.21	1.71	0.61
18/04/2023	02:15:00 a. m.	3.83	10.92	1.23	1.74	0.58
18/04/2023	03:00:00 a. m.	4.36	10.18	1.21	1.71	0.62
18/04/2023	04:30:00 a. m.	3.98	11.66	1.14	1.60	0.53
18/04/2023	05:15:00 a. m.	3.44	11.47	1.12	1.58	0.57
18/04/2023	06:00:00 a. m.	4.13	11.74	1.09	1.53	0.65
18/04/2023	10:30:00 p. m.	4.90	8.01	1.60	2.27	0.83
18/04/2023	11:15:00 a. m.	3.99	5.73	1.71	2.41	0.80
19/04/2023	12:00:00 a. m.	4.45	6.57	1.62	2.30	0.81
19/04/2023	12:45:00 a. m.	3.66	8.10	1.58	2.25	0.80
19/04/2023	01:30:00 a. m.	4.38	9.34	1.57	2.22	0.84
19/04/2023	02:15:00 a. m.	2.99	10.38	1.53	2.06	0.79
19/04/2023	03:00:00 a. m.	4.12	10.34	1.48	2.10	0.84
19/04/2023	04:30:00 a. m.	3.65	11.65	1.51	2.13	0.83
19/04/2023	05:15:00 a. m.	2.53	11.47	1.38	1.96	0.80
19/04/2023	06:00:00 a. m.	3.57	13.18	1.31	1.85	0.85

Nombre de la fuente: Elaboración propia

**Tabla 2-4:** Temperaturas de la tubería y condiciones climáticas externas

Fecha	Hora	T tubo (°C)	T agua free (°C)	T entrada agua (°C)	Velocidad del viento (m/s)	T externa (°C)	HR externa (%)
17/04/2023	10:30:00 p. m.	33.80	17.20	42.15	0.30	12.70	89.00
17/04/2023	11:15:00 a. m.	22.50	26.80	24.35	0.40	12.15	95.00
17/04/2023	12:00:00 a. m.	30.19	21.22	33.15	0.20	12.50	92.00
18/04/2023	12:45:00 a. m.	21.13	23.30	22.04	0.10	13.35	89.00
18/04/2023	01:30:00 a. m.	27.67	19.79	29.83	0.20	13.40	89.00
18/04/2023	02:15:00 a. m.	21.03	23.00	21.48	0.20	13.25	90.00
18/04/2023	03:00:00 a. m.	25.93	19.60	27.69	0.30	12.56	92.00
18/04/2023	04:30:00 a. m.	21.71	18.42	22.43	0.40	11.83	94.00
18/04/2023	05:15:00 a. m.	17.74	19.25	18.56	0.20	12.50	93.50
18/04/2023	06:00:00 a. m.	22.83	16.90	23.92	0.10	12.80	93.00
18/04/2023	10:30:00 p. m.	32.61	16.10	37.02	0.70	13.45	87.00
18/04/2023	11:15:00 a. m.	22.15	26.01	23.87	0.60	12.50	91.00
19/04/2023	12:00:00 a. m.	26.50	19.31	29.41	0.10	12.50	89.00
19/04/2023	12:45:00 a. m.	18.24	20.86	19.41	0.20	11.80	89.00
19/04/2023	01:30:00 a. m.	23.54	16.22	26.09	0.50	9.80	98.00
19/04/2023	02:15:00 a. m.	12.84	14.15	13.33	0.20	10.50	91.00
19/04/2023	03:00:00 a. m.	20.33	11.32	22.27	0.10	10.90	91.00
19/04/2023	04:30:00 a. m.	15.00	10.03	16.14	0.20	9.30	89.00
19/04/2023	05:15:00 a. m.	10.98	11.58	11.24	0.50	9.70	94.00
19/04/2023	06:00:00 a. m.	14.19	8.52	15.21	0.10	7.90	96.00

Nombre de la fuente: Elaboración propia

**Tabla 2-5:** Coeficiente de convección y temperatura de la tubería en acero y en PVC

Fecha	Hora	T interior (°C)	T entrada agua (°C)	h Tubo acero (W/m <sup>2</sup> C)	T tubo acero (°C)	h Tubo PVC (W/m <sup>2</sup> C)	T tubo PVC (°C)
17/04/2023	10:30:00 p. m.	13.00	69.88	6.34	68.51	6.05	58.70
17/04/2023	11:15:00 a. m.	13.75	36.76	5.05	36.27	5.04	36.14
17/04/2023	12:00:00 a. m.	13.34	60.94	6.07	59.83	5.82	52.52
18/04/2023	12:45:00 a. m.	13.39	33.59	4.88	33.15	4.89	33.24
18/04/2023	01:30:00 a. m.	13.27	53.62	5.83	52.70	5.62	47.28
18/04/2023	02:15:00 a. m.	13.22	30.94	4.72	30.57	4.74	30.80
18/04/2023	03:00:00 a. m.	13.07	47.51	5.60	46.74	5.42	42.74
18/04/2023	04:30:00 a. m.	12.64	42.35	5.40	41.70	5.25	38.76
18/04/2023	05:15:00 a. m.	12.54	26.20	4.41	25.93	4.45	26.39
18/04/2023	06:00:00 a. m.	12.45	37.98	5.19	37.42	5.08	35.33
18/04/2023	10:30:00 p. m.	11.96	69.90	6.38	68.50	6.09	58.51
18/04/2023	11:15:00 a. m.	12.99	36.37	5.07	35.86	5.07	35.73
19/04/2023	12:00:00 a. m.	12.06	60.81	6.12	59.67	5.86	52.19
19/04/2023	12:45:00 a. m.	11.70	32.72	4.94	32.28	4.95	32.32
19/04/2023	01:30:00 a. m.	10.54	53.24	5.94	52.26	5.72	46.49
19/04/2023	02:15:00 a. m.	9.83	29.02	4.84	28.62	4.86	28.81

Fecha	Hora	T interior (°C)	T entrada agua (°C)	h Tubo acero (W/m <sup>2</sup> °C)	T tubo acero (°C)	h Tubo PVC (W/m <sup>2</sup> °C)	T tubo PVC (°C)
19/04/2023	03:00:00 a. m.	10.04	46.72	5.72	45.90	5.54	41.61
19/04/2023	04:30:00 a. m.	8.51	41.18	5.57	40.46	5.41	37.14
19/04/2023	05:15:00 a. m.	9.26	23.71	4.50	23.41	4.54	23.96
19/04/2023	06:00:00 a. m.	8.31	36.46	5.36	35.84	5.23	33.45

Nombre de la fuente: Elaboración propia

**Tabla 2-6:** Coeficiente de convección y temperatura de la tubería de Oxy Pex y Coeficiente de convección y temperatura de la tubería de PVC

Fecha	Hora	T entrada agua (°C)	h Tubo Oxy Pex (W/m <sup>2</sup> °C)	T tubo Oxy Pex (°C)	T entrada agua (°C)	h Tubo PVC (W/m <sup>2</sup> °C)	T tubo PVC (°C)
17/04/2023	10:30:00 p. m.	69.88	7.84	66.29	42.15	5.13	36.92
17/04/2023	11:15:00 a. m.	36.76	7.26	51.95	24.34	3.96	22.66
17/04/2023	12:00:00 a. m.	60.94	7.67	61.69	33.15	4.65	29.77
18/04/2023	12:45:00 a. m.	33.59	7.15	48.99	22.04	3.76	20.70
18/04/2023	01:30:00 a. m.	53.62	7.53	57.87	29.83	4.44	27.07
18/04/2023	02:15:00 a. m.	30.94	7.03	46.33	21.48	3.72	20.21
18/04/2023	03:00:00 a. m.	47.51	7.40	54.37	27.69	4.31	25.29
18/04/2023	04:30:00 a. m.	42.35	7.28	51.14	22.43	3.88	20.90
18/04/2023	05:15:00 a. m.	26.20	6.81	41.41	18.56	3.43	17.67
18/04/2023	06:00:00 a. m.	37.98	7.16	48.18	23.92	4.05	22.10
18/04/2023	10:30:00 p. m.	69.90	7.88	66.24	37.02	4.90	32.61
18/04/2023	11:15:00 a. m.	36.37	7.29	51.74	23.87	3.99	22.15
19/04/2023	12:00:00 a. m.	60.81	7.72	61.56	29.41	4.45	26.50
19/04/2023	12:45:00 a. m.	32.72	7.21	48.49	19.41	3.66	18.24
19/04/2023	01:30:00 a. m.	53.24	7.64	57.50	26.09	4.38	23.54
19/04/2023	02:15:00 a. m.	29.02	7.16	45.20	13.33	2.99	12.84
19/04/2023	03:00:00 a. m.	46.72	7.52	53.77	22.27	4.12	20.33
19/04/2023	04:30:00 a. m.	41.18	7.45	50.24	16.14	3.65	15.00
19/04/2023	05:15:00 a. m.	23.71	6.93	39.85	11.24	2.53	10.98
19/04/2023	06:00:00 a. m.	36.46	7.33	47.08	15.21	3.57	14.19

Nombre de la fuente: Elaboración propia

**Tabla 2-7:** Coeficiente de convección y temperatura de la tubería en acero y en Oxy Pex

Fecha	Hora	T entrada agua (°C)	h Tubo acero (W/m <sup>2</sup> °C)	T tubo acero (°C)	h Tubo Oxy Pex D16mm (W/m <sup>2</sup> °C)	T tubo Oxy Pex rad D16mm (°C)
17/04/2023	10:30:00 p. m.	42.15	5.36	41.51	6.71	40.28
17/04/2023	11:15:00 a. m.	24.34	4.12	24.13	5.31	23.75
17/04/2023	12:00:00 a. m.	33.15	4.86	32.73	6.14	31.96
18/04/2023	12:45:00 a. m.	22.04	3.91	21.87	5.07	21.58
18/04/2023	01:30:00 a. m.	29.83	4.63	29.48	5.89	28.86
18/04/2023	02:15:00 a. m.	21.48	3.86	21.31	5.02	21.04
18/04/2023	03:00:00 a. m.	27.69	4.49	27.39	5.73	26.85
18/04/2023	04:30:00 a. m.	22.43	4.03	22.23	5.21	21.90
18/04/2023	05:15:00 a. m.	18.56	3.56	18.45	4.67	18.26
18/04/2023	06:00:00 a. m.	23.92	4.21	23.69	5.42	23.29
18/04/2023	10:30:00 p. m.	37.02	5.13	36.47	6.44	35.45
18/04/2023	11:15:00 a. m.	23.87	4.15	23.65	5.35	23.27
19/04/2023	12:00:00 a. m.	29.41	4.64	29.05	5.90	28.39
19/04/2023	12:45:00 a. m.	19.41	3.80	19.26	4.95	19.01
19/04/2023	01:30:00 a. m.	26.09	4.56	25.77	5.81	25.19
19/04/2023	02:15:00 a. m.	13.33	3.10	13.27	4.14	13.16
19/04/2023	03:00:00 a. m.	22.27	4.29	22.02	5.50	21.60
19/04/2023	04:30:00 a. m.	16.14	3.79	15.99	4.93	15.75
19/04/2023	05:15:00 a. m.	11.24	2.61	11.21	3.57	11.15
19/04/2023	06:00:00 a. m.	15.21	3.70	15.08	4.83	14.86

Nombre de la fuente: Elaboración propia

A continuación, se describen los valores de conductividad y resistencia térmica de los materiales que se consideraron en el análisis, con su respectivo espesor (**Tabla 2-8**):

**Tabla 2-8:** Características de transferencia del plástico y la pantalla térmica

Material	AgrocLEAR	Alumitex	PVC	Acero	Oxy pex	Suelo
<b>Espesor [m]</b>	0.00015	0.000105	0.00572	0.001651	0.002	0.15
<b>Conductividad térmica [W/(mk)]*</b>	0.33	0.5	0.16	15	0.41	7.8
<b>Resistencia térmica [m<sup>2</sup>*k/W]</b>	0.00045	0.00021	0.03575	0.00011	0.004878	0.01923
<b>Emisividad</b>	0.1	0.05	0.97	0.79	0.95	0.9

Nombre de la fuente: ISO 10456\*,(Badia, 2022; PAVCO, 2020; Vesbo, 2023)

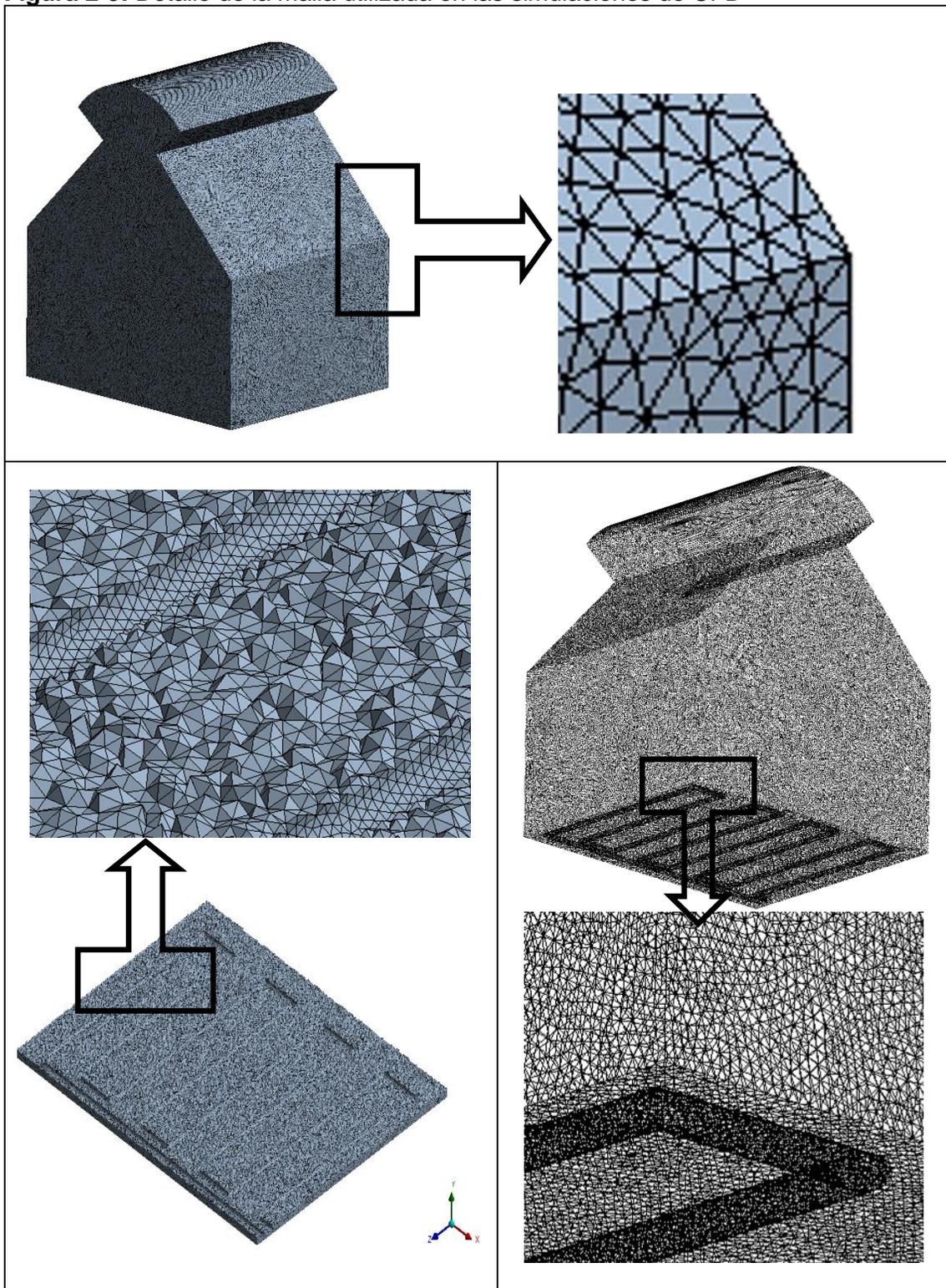
### 2.3.4. Independencia y calidad de la malla

Se prestó especial atención a la generación de la malla sobre el diseño elaborado con Design Modeler de Ansys Fluent, para garantizar la independencia del resultado y la calidad de la simulación. Se realizaron pruebas de sensibilidad variando el tamaño y la densidad de la malla para asegurar que los resultados fueran precisos y confiables, conllevando a una malla no estructurada con 4.953.687 nodos y 28.998.987 elementos.

La estructura de malla se configuró como cuadrículas cartesianas irregulares con mayor densidad en las proximidades del sistema de calefacción y del suelo, regiones críticas sujetas a fuertes gradientes, y se empleó una malla menos densa en las áreas más distantes de estas zonas, como se ilustra en la **Figura 2-5**. Finalmente, se llevó a cabo una evaluación exhaustiva de la calidad de la malla, asegurando que se mantuvieran niveles adecuados de asimetría y ortogonalidad según los parámetros establecidos.

Con el fin de obtener una precisión adecuada y una total independencia de los resultados con respecto al tamaño de la malla. La calidad de la malla se evaluó mediante el valor de  $y^+$ , controlando este valor en el rango de validez que está en el intervalo de  $20 < y^+ < 200$ . Además, se evaluó el factor de asimetría, donde el 90.8% de los volúmenes activos mostraron un valor dentro del rango de 0-0.25, considerado de excelente calidad (Ansys, 2015).

**Figura 2-5:** Detalle de la malla utilizada en las simulaciones de CFD



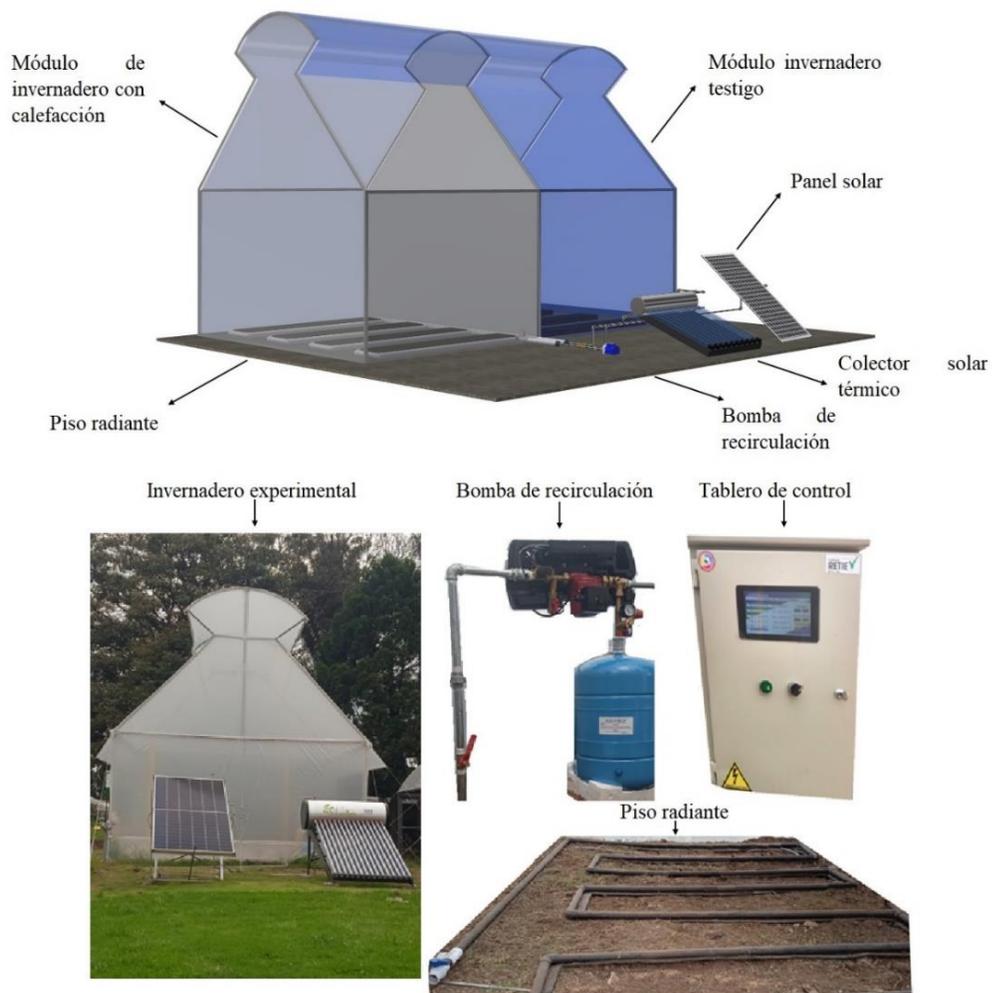
Nombre de la fuente: Elaboración propia

## 2.4. Evaluación experimental

### 2.4.1. Recopilación de datos climáticos, micro climáticos y del sistema de climatización

El invernadero experimental consta de dos módulos de igual área cubierta ( $20 \text{ m}^2$  cada uno), separados mediante una doble división de una pared plástica en la zona central del invernadero. Uno de los módulos está equipado con el sistema de calefacción (IC), mientras que el otro actúa como el invernadero testigo (ISC) (**Figura 2-6**).

**Figura 2-6:** Esquema geométrico del invernadero experimental



Nombre de la fuente: Elaboración propia

Para la recopilación de datos climáticos exteriores, se empleó una estación meteorológica automática con transmisión remota WSC11-Thies. La **Tabla 2-9** resume la descripción técnica de los sensores utilizados para medir variables como la velocidad y dirección del viento, radiación solar, temperatura y humedad relativa.

**Tabla 2-9:** Descripción técnica de los sensores de medición climática exterior

Variable	Datos técnicos de sensor
Velocidad del viento	Tipo: Anemómetro térmico, rango de medición: 0 a 40 ms <sup>-1</sup> , resolución: 0.1 ms <sup>-1</sup> , precisión: 0.1 ms <sup>-1</sup> .
Dirección del viento	Tipo: Anemómetro térmico, rango de medición: 1 a 360°, resolución: 1°, precisión: ± 10°.
Radiación solar	Tipo: Sensor de silicio, rango de medición: 1 a 1300 Wm <sup>-2</sup> , resolución: 1 Wm <sup>-2</sup> , precisión: ± 10%.
Temperatura	Tipo: PT1000, rango de medición: -30 a +60 °C, resolución: 0.1 °C, precisión: ± 1 °C.
Humedad relativa	Tipo: CMOS capacitivo, rango de medición: 0 a 100%, resolución: 0.1 %, precisión: ± 10 %.

Nombre de la fuente: Elaboración propia

Dentro de cada módulo del invernadero, se instalaron sensores para capturar datos de la temperatura del aire ambiente y se registraron a través de la estación de datos Aranet PRO licence versions select, Aranet PRO-50. Además, en el módulo con calefacción (IC), se utilizaron sensores programados en Arduino, para medir las temperaturas del suelo y la cubierta. También se implementaron sensores para monitorear la temperatura sobre la pantalla térmica, el agua y la superficie de la tubería. Las especificaciones técnicas detalladas de estos sensores se presentan en la **Tabla 2-10**.

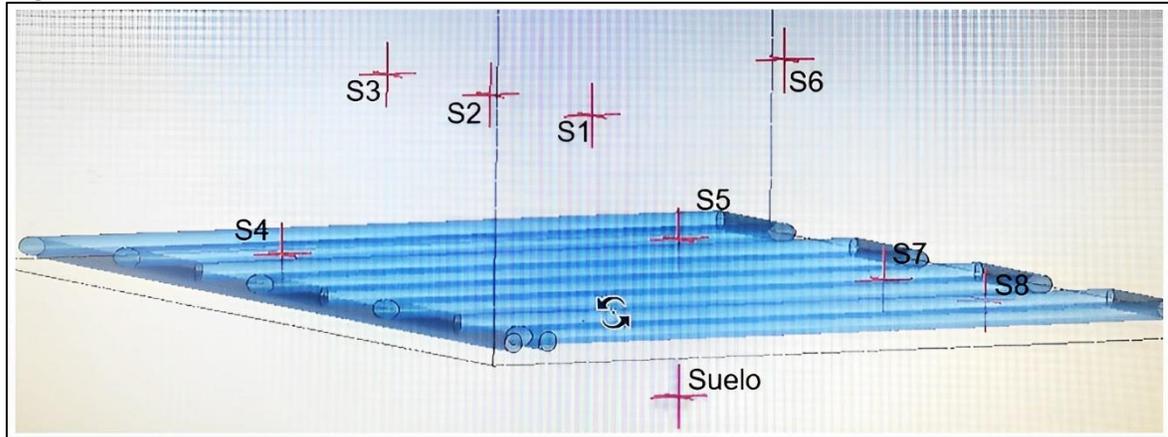
**Tabla 2-10:** Descripción técnica de los sensores de medición microclimática

Variable	Datos técnicos de sensor.
Estación registradora	Aranet PRO licence versions select, Aranet PRO 50.
Temperatura del aire	Tipo: Grado de protección IP67 inalámbrico y alimentado por pilas, Aranet IP 67, rango de medición: -40 a +60 °C y 0 a 100%, resolución: 0.1 °C y 0.1 %, precisión: ± 0.3 °C y ± 2 %.
Temperatura de la cubierta	Tipo: sensor de temperatura por IR, MLX90614ESF, rango de medición: -40 a 125 °C, resolución: 0.02 °C, precisión: ± 0.5 °C.
Temperatura del suelo	Tipo: termocupla tipo K MAX6675, rango de medición: 0 a 800 °C, resolución: 0.25 °C, precisión: ± 1 °C.
Temperatura del tubo	Tipo: NTC, rango de medición: -50 a +150 °C, Precisión: ±0,2 °C.
Temperaturas sobre la pantalla térmica y del agua	Tipo: RTD PT1000, rango de medición: -50 a 220 °C, Precisión: 0,1+0,0017*   t   ( °C ).

Nombre de la fuente: Elaboración propia

Se llevaron a cabo mediciones de temperatura a diferentes alturas desde el suelo (**Figura 2-7**) y se capturaron imágenes de CFD para analizar la distribución de temperaturas y velocidad del viento durante dos noches consecutivas, con un total de diez imágenes por noche.

**Figura 2-7:** Ubicación de los sensores de temperatura (m)



Coordenadas\Sensor	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	Suelo
x - Izquierda	1	2	3	4	4	3	2	1	2.5
y - Derecha	1	1	1	1	3	3	3	3	2
z - Altura	1	1	1	0.1	0.1	1	0.1	0.1	-0.15

Nombre de la fuente: Elaboración propia

Los datos tanto del exterior como del interior del invernadero se recopilaban entre el 27 de marzo y el 01 de abril de 2023, con una frecuencia de registro de un minuto. Estos datos, un total de 8637 para cada variable, se utilizaron en la calibración y evaluación del modelo de balance de energía. Para el análisis en CFD, los datos se recopilaban desde la medianoche del 10 de abril hasta las 23:59 horas del 30 de abril de 2023, con una frecuencia de registro de cinco minutos.

### 2.4.2. Análisis estadístico

Se compararon las temperaturas diurnas y nocturnas, destacando las diferencias promedio y máximas entre el invernadero IC, ISC y el exterior.

Se realizó un resumen descriptivo de los datos de temperatura para el exterior, invernadero IC e ISC, incluyendo medidas como temperatura mínima, primer cuartil, mediana, media, tercer cuartil y temperatura máxima. Se compararon los resultados para el invernadero IC, ISC y el exterior, tanto para el periodo diurno como nocturno.

Se analizaron las series de tiempo completas y en el periodo nocturno, evaluando para cada caso la normalidad y homogeneidad de los datos, determinando el coeficiente lambda con el fin de corregir la normalidad y realizando un análisis Anova, así como una prueba múltiple Tukey para las tres (3) parejas de tratamientos y verificar el cumplimiento de los supuestos sobre los residuos.

Así mismo, la falta de normalidad y homogeneidad implica el uso de pruebas no paramétricas como la prueba de Kruskal-Wallis para comparar tratamientos y la prueba de Wilcoxon con ajuste de p-valores mediante el método de Bonferroni para comparar las parejas posibles.

Se utilizó la prueba de Dickey-Fuller para evaluar la estacionariedad de las series de tiempo, con la prueba Ljung-Box se analizó el ruido de las series y se realizaron análisis de autocorrelación (ACF) para evaluar la dependencia temporal de las observaciones.

Finalmente, se implementaron modelos SARIMA para prever las tendencias de temperatura. Se realizaron pruebas de diagnóstico, incluyendo análisis de residuos, para verificar la calidad del modelo, se compararon diferentes modelos utilizando métricas como el AIC y se realizó la validación de modelos SARIMA utilizando medidas como el error cuadrático medio (MSE - **(2-4)**), error absoluto medio (MAE - **(2-3)**) y error porcentual absoluto medio (MAPE - **(2-5)**).

## **3. Análisis de resultados**

### **3.1. Análisis del estado del arte**

#### **3.1.1. Análisis bibliométrico**

La investigación proporcionó una visión profunda de la actividad científica global en climatización y energías renovables en invernaderos, identificando 397 publicaciones entre el 2005 y el 2021, El año pico fue 2019, con 47 publicaciones, evidenciando un creciente interés mundial en optimizar microclimas mediante energías renovables, con hasta un 58% de reducción en el uso de combustibles fósiles en países tropicales.

La implementación de sistemas de climatización, incluidos sistemas pasivos con energías renovables, han mejorado la producción, con un incremento del 35% en la cosecha de tomates y un eficaz control de condiciones microclimáticas. La investigación, mayormente experimental (66%), refleja un interés multidisciplinario en áreas como ingeniería (226 documentos), energía (185), y agricultura/ciencias biológicas (114). Se identificaron 1051 autores de 59 países, con China liderando en producción de alimentos bajo invernadero.

En la red de coautoría, Yang Q (China) destaca con 15 publicaciones, abordando temas como optimización energética y microclimática mediante sistemas fotovoltaicos. El Ministry of Agriculture of the People's Republic of China lidera con 30 documentos y 57 colaboraciones, mostrando una colaboración efectiva entre entidades gubernamentales, académicas y de investigación. Otro autor influyente es Abdelhamid Farhat, con 13 publicaciones en Túnez, centradas en modelado, simulación y evaluación de sistemas de calefacción alimentados por energía solar, geotérmica y almacenamiento latente a través de materiales de cambio de fase.

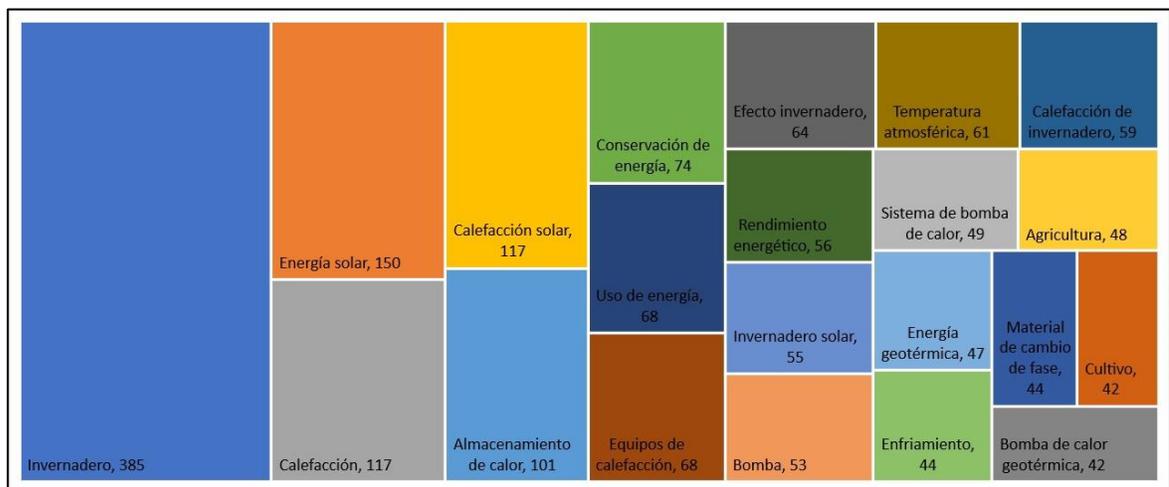
En la red de coautoría con 46 países, el clúster rojo está compuesto por Algeria, Bélgica, Egipto, Holanda, Omán, Arabia Saudita y Corea del Sur, contribuyendo con 44 documentos

principalmente en energía, ingeniería, ciencias agrícolas y biológicas, con temas de diseño de invernaderos, modelamiento o casos estudio de climatización, incluyendo el uso de energía geotérmica, energía solar y almacenamiento de energía térmica. El clúster morado incluye a China, Japón, Bangladés, Kenia y Vietnam, con 130 documentos en Ingeniería, ciencias agrícolas y biológicas, energía y ciencia medioambiental, con temas de bombas de calor y ahorro de energía en invernaderos, climatización con energía geotérmica, solar y de biomasa, almacenamiento de calor latente y por último invernaderos enterrados.

China destaca como actor principal, aportando 122 documentos en colaboración con 14 países, especialmente con Egipto, Reino Unido y Estados Unidos. Estados Unidos, en sí mismo, contribuye con 28 documentos.

En la interacción entre China y Egipto, se exploran temas de energía, ingeniería y agricultura, centrándose en la aplicación de energía solar en invernaderos mediante células fotovoltaicas, sistemas de bombas de calor y colectores solares. Se revelaron 3159 palabras clave, siendo "Greenhouse" el nodo central con 385 ocurrencias; seguida por "Solar energy", "Solar heating", "Heating" y "Heat storage" con 150, 117, 117 y 101 ocurrencias respectivamente (**Figura 3-1**). Lo anterior evidencia el interés en la utilización de la energía solar para la climatización de invernaderos.

**Figura 3-1:** Ocurrencias de palabras clave



Nombre de la fuente: Elaboración propia

El análisis de coocurrencia resaltó temáticas sobre la calefacción y el acondicionamiento micro climático y técnicas de almacenamiento de calor de calor sensible y latente,

utilizando dinámica de fluidos y modelamiento computacionales. El morado se centra en el almacenamiento.

El documento con mayor cantidad de enlaces de citación fue "Survey and evaluation of heating technologies for worldwide agricultural greenhouse applications" con 59 enlaces, seguido por "Advanced applications of solar energy in agricultural greenhouses" y "Recent advances in net-zero energy greenhouses and adapted thermal energy storage systems" con 45 y 43 enlaces respectivamente. Estos son considerados influyentes en climatización y energías renovables en invernaderos, debido a que son los documentos mayormente consultados y altamente citados por la comunidad científica y académica.

Se reconocieron 144 revistas, liderando "Gongcheng Xuebao/Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering" con 48 documentos, seguida de "Solar Energy" con 24. "Renewable and Sustainable Energy Reviews" se destaca por 19 documentos, 1548 citaciones y un índice SJR de 3.68 para 2021.

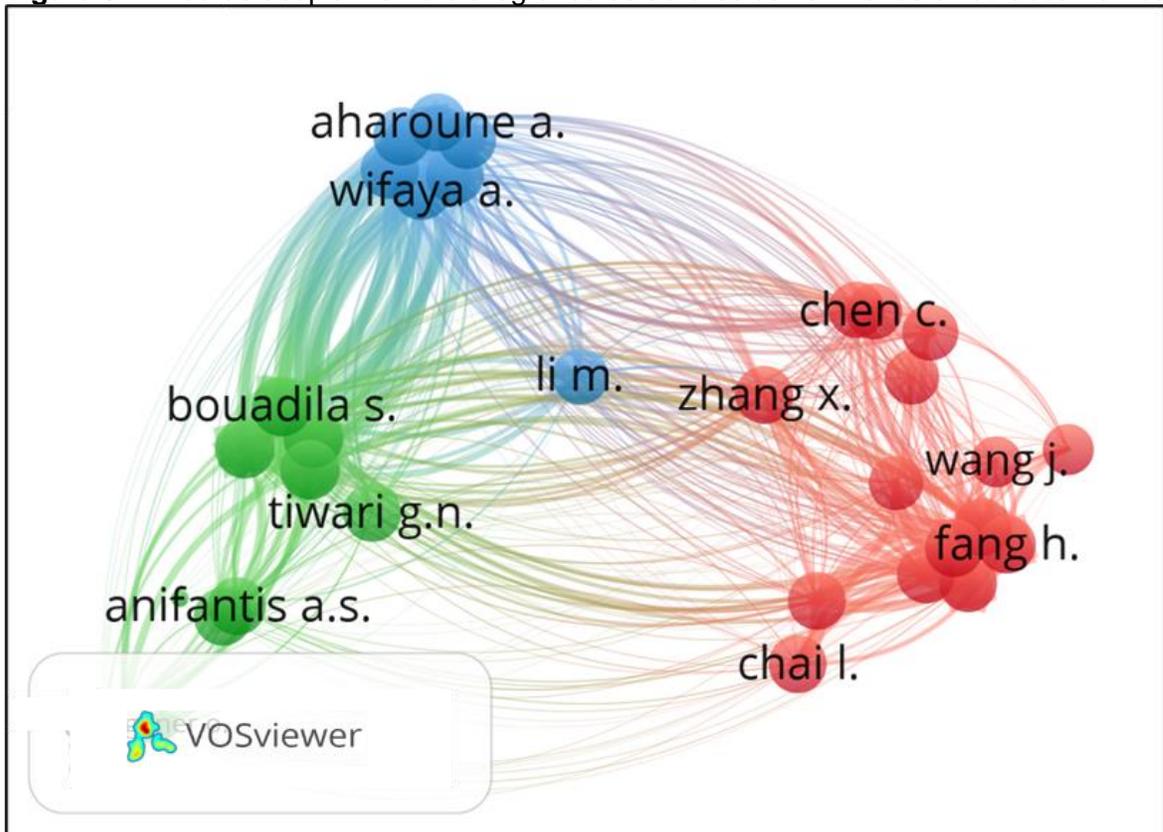
El análisis de organizaciones, El Oregon Institute of Technology lidera con más de 1000 citaciones, seguido por Firat University con 722. La colaboración más fuerte se da entre el Ministerio de Agricultura de la República Popular China y la Academia China de Ciencias Agrícolas, reflejando alineación entre agendas gubernamentales e instituciones académicas.

La red de citaciones entre países destaca una concentración en China y Turquía, con una fuerte conexión en temas de aprovechamiento geotérmico, energía solar y almacenamiento de calor latente. La relación entre China y Turquía se considera la más robusta, con una fuerza total de 68 y 1842 citaciones. Mientras que en la red de acoplamiento bibliográfico entre documentos, la conexión más fuerte fue entre "*A review on opportunities for implementation of solar energy technologies in agricultural greenhouses*" (Gorjian, Calise, et al., 2021) y "*Recent advances in net-zero energy greenhouses and adapted thermal energy storage systems*" (Gorjian, Ebadi, et al., 2021), con un valor de 40, evidenciado el interés activo en energía solar y almacenamiento térmico. Destaca la relación de acoplamiento bibliográfico entre Farhat A. y Lazaar M., con

un valor de 771, respaldada por una alta coautoría. Zhang Y., sobresale con 601 enlaces, centrándose en estrategias de climatización y energía geotérmica y solar en invernaderos.

Al considerar cinco como el número mínimo de documentos por autor, se obtiene la red presentada en la **Figura 3-2**, compuesta por 32 autores organizados en tres clústeres. En rojo se presentan las temáticas previamente descritas y representadas por el autor Zhang Y., En verde, corresponde a las temáticas del autor Farhat A. y en azul, con estudios sobre de calentamiento con aprovechamiento de la energía solar, resalta el autor Li Ming, por su posición central en la red, con trabajos en China y Egipto, enfocados al aprovechamiento de la energía solar y fotovoltaica, principalmente en cultivos de fresa, dentro de las áreas temáticas de energía, ingeniería, ciencias agrícolas y biológicas y ciencia de los materiales.

**Figura 3-2:** Red de acoplamiento bibliográfico de autores con al menos cinco documentos



Nombre de la fuente: Elaboración propia

Irán coincide con china en temas sobre implementación de muros norte, cortinas y mantas nocturnas, suelo estacional, bomba de calor geotérmica, colectores solares, enterrado, Intercambiador de Calor Tierra-Aire y colectores Fotovoltaicos/Térmicos, mientras que,

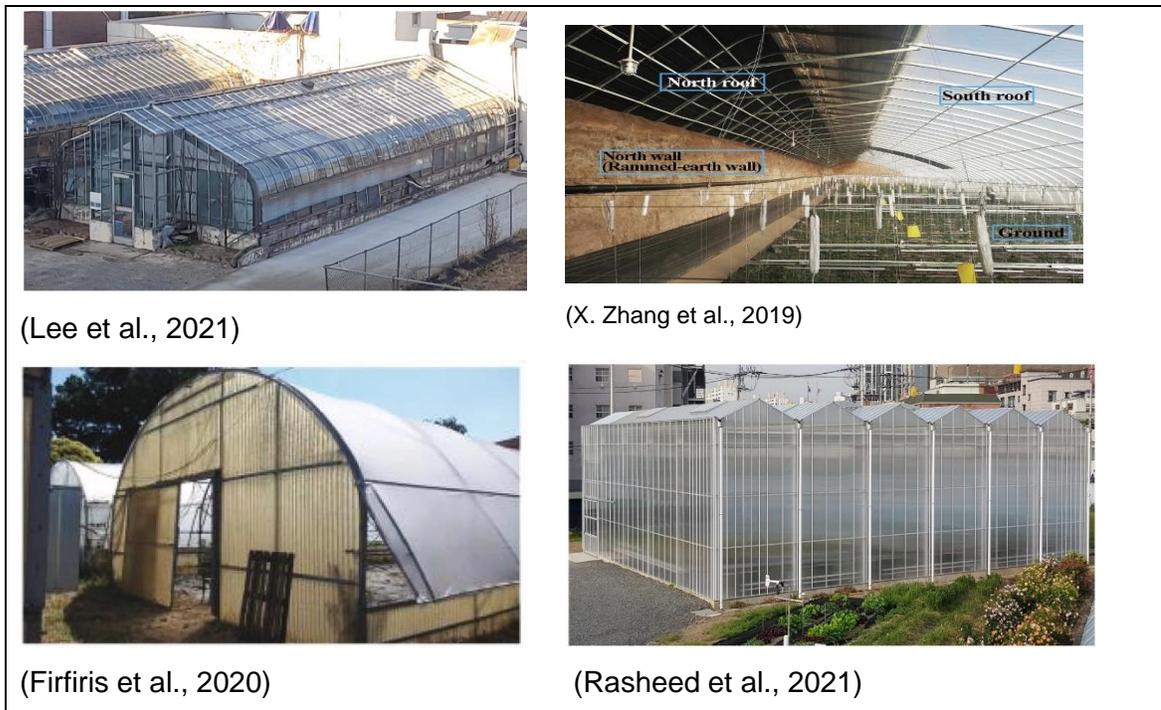
entre china e Italia, comparten intereses en los sistemas de calefacción geotérmica, térmica y fotovoltaica. Por su parte, entre China y Francia coinciden en temas de implementaciones de tecnologías de energía solar, como colectores solares y estrategias renovables y sostenibles para mejorar el entorno térmico de los invernaderos solares implementados en china.

### 3.1.2. Tipos de invernadero

Se identificaron varios tipos de invernaderos, siendo el tipo capilla el más común, seguido por el tipo solar implementado en china y el túnel (**Figura 3-3**). El plástico es el material de cubierta predominante, seguido por el vidrio. Además, se exploran combinaciones de vidrio y plástico, así como el uso de celdas fotovoltaicas en la cubierta. En cuanto al tamaño, se encuentran invernaderos de diversas dimensiones, con la mayoría siendo pequeños (menos de 500 m<sup>2</sup>).

El invernadero tipo capilla, fabricado en plástico o vidrio, presenta una forma de cubierta con pendiente a dos aguas (Bojacá et al., 2012). Por otro lado, el invernadero solar chino se fabrica principalmente en plástico, con forma semicircular o semi-elíptica y un muro de mampostería que actúa como almacenamiento térmico para optimizar las condiciones microclimáticas (X. Zhang et al., 2016). El invernadero tipo túnel, popular en la región del mediterráneo, puede ser de un solo vano o con múltiples vanos adosados. Finalmente, el invernadero tipo venlo con cubierta y cerramiento en vidrio, se utiliza principalmente en países de Europa central, Corea y China (Ortiz et al., 2021).

**Figura 3-3:** Invernadero tipo capilla (izquierda superior); invernadero solar implementado en china (derecha superior); invernadero tipo túnel (izquierda inferior) e invernadero tipo venlo (derecha inferior)



(Lee et al., 2021)

(X. Zhang et al., 2019)

(Firiris et al., 2020)

(Rasheed et al., 2021)

Nombre de la fuente: indicadas en la figura

El plástico es bastante usado a nivel mundial debido a su flexibilidad y versatilidad lo cual permite cubrir grandes superficies de suelo con estructuras simples y de bajo costo (Villagrán, Flores, Akrami, et al., 2021; Villagran & Bojacá, 2019). Mientras que el vidrio predomina como cubierta en los países de Europa central y requiere de estructuras de invernadero más robustas, por lo tanto, se requiere de una mayor inversión inicial (Villagran & Bojacá, 2020). Aunque en términos energéticos este material de cubierta tiene mayor eficiencia térmica (E. J. Baeza & Kacira, 2017).

Por último, en menor medida, se observa la combinación de vidrio y plástico como materiales de cubierta y cerramiento en algunas estructuras de invernadero. Esta práctica, posiblemente destinada a reducir costos y simplificar la fabricación, busca aprovechar los beneficios del vidrio, como su estabilidad a lo largo del tiempo y su capacidad para bloquear la radiación térmica nocturna. Estas propiedades contribuyen a una mayor retención de la energía almacenada durante el día y aumentan la eficiencia de los sistemas

de calefacción implementados (Flores et al., 2019). Además, se han identificado tres estudios que emplean materiales de cubierta, como celdas fotovoltaicas policristalinas y celdas fotovoltaicas integradas en plásticos semitransparentes. Este enfoque, conocido a nivel mundial como sistemas agrovoltaicos, emerge como una estrategia prometedora para lograr una producción de alimentos más sostenible al integrar la electricidad fotovoltaica con los sistemas agrícolas (Waller et al., 2022).

En Corea se evaluó a través de la modelación, 4 tipos de invernaderos medianos, 2 de tipo multi-túnel cubiertos con plástico, un venlo y un multi-túnel cada uno con cubierta de vidrio, los resultados permitieron concluir que los de tipo multi-túnel y venlo de cubierta de vidrio presentaron valores de carga de energía de calefacción similares, pero el multi-túnel de cubierta plástica requiere de 10% más de energía que los invernaderos anteriormente mencionados (Ha et al., 2011).

### **3.1.3. Sistemas de climatización**

Se emplean diversas fuentes de energías alternativas y sostenibles como; solar, geotérmica, biomasa, eólica, biogás e hidráulica. Los sistemas de climatización con uso de energías renovables incluyen colectores solares, paneles fotovoltaicos, bombas de calor geotérmicas, materiales de cambio de fase, almacenamiento geotérmico, intercambiadores de calor tierra-aire, calderas de biomasa, muros colectores y cortinas térmicas. La energía solar se aprovecha tanto para generación eléctrica como térmica, con casos de combinación de paneles fotovoltaicos y colectores solares (Hosseini et al., 2019).

Por su parte, en investigaciones que emplean los colectores solares reportan que su uso potencializa la producción en regiones donde predominan las temperaturas bajas durante todo el año, aunque bajo condiciones críticas con temperaturas de ambiente exterior inferiores a 5°C se deben incluir más colectores solares, y aumentar el tamaño del almacenamiento de agua caliente, para ofrecer un microclima adecuado para la producción (López et al., 2018).

Otra de las alternativas explorada por los investigadores, es el aprovechamiento de la energía eólica, con la cual se calienta agua través de agitadores mecánicos eólicos. Esta agua caliente posteriormente es recirculada a un piso radiante ubicado en el suelo del invernadero, logrando incrementar los niveles de temperatura en el interior del invernadero, garantizando el desarrollo de los cultivos, un aumento de rendimiento y calidad de los productos cosechados y finalmente se logra una mejora de los ingresos de los productores, optimizando los tiempos de producción y reduciendo los costos de operación (Ma, 2019).

Se destaca el uso de suelo radiante y pantallas térmicas para optimizar el microclima. Se evalúan diferentes métodos de almacenamiento térmico, como lechos de roca, PCM (Paksoy & Beyhan, 2015) y almacenamiento subterráneo. Además, se menciona la exploración de tecnologías emergentes, como sistemas de almacenamiento de energía mediante hidrógeno.

Los sistemas de almacenamiento térmico (TES) pueden basar su funcionamiento en el principio de calor sensible o latente. Los lechos de roca, ladrillo, concreto y agua son algunos ejemplos de materiales usados para el almacenamiento de calor sensible, mientras que la parafina, sal de Glauber y los materiales de cambio de fase orgánicos e inorgánicos corresponden a materiales de almacenamiento de calor latente, pues estos almacenan calor en el cambio de fase de sólido a líquido, calor que posteriormente se libera al ambiente del invernadero al solidificarse o congelarse (Haldorai et al., 2019; Sethi & Sharma, 2008). Las TES son una alternativa técnicamente viable y de gran importancia, especialmente para ser usadas en climas con grandes diferencias entre la temperatura del diaria y nocturna (Haldorai et al., 2019).

También es importante mencionar que la implementación de pantallas térmicas en algunas regiones tropicales es adecuada y puede disminuir el uso de los combustibles fósiles en hasta un 58%, la optimización microclimática por su lado permite disminuir la presencia de enfermedades como la Botritis y el tizón tardío, e incluso para algunos periodos del año no es necesario incurrir en la quema de combustibles fósiles para adelantar labores de calefacción del invernadero (Taki et al., 2016).

Para finalizar este apartado se debe mencionar que las tecnologías recientes implementadas para el almacenamiento de la energía solar se apoyan en la producción de

hidrogeno (H<sub>2</sub>), para la activación de una bomba de calor geotérmica como complemento a la energía fotovoltaica (Blanco et al., 2014). Todas estas tendencias de desarrollo para climatización de invernaderos han permitido que a nivel mundial existan invernaderos autosuficientes con generación de energía a través de diversas metodologías (Paksoy & Beyhan, 2015).

### **3.1.4. Validación experimental que realizan los autores**

En la validación experimental, se enfoca en variables como temperatura, radiación solar, humedad relativa y velocidad del viento. La presencia del cultivo también se considera en estudios, mostrando que diferentes sistemas de climatización afectan a las plantas de manera diversa. Se destaca la importancia de ajustar la tecnología a las necesidades específicas de cada cultivo.

Modelar y evaluar variables climáticas de un invernadero sin cultivos se justifica al considerar que el cultivo actúa como una resistencia en el sistema, proporcionando valores de temperatura dentro de un rango más controlado, con la introducción del cultivo se espera que estabilice la temperatura, ya que las plantas contribuyen con la transpiración y la interacción con la radiación solar, actuando como reguladores naturales (Duarte et al., 2022). Sin embargo, la modelación sin cultivo revela los límites más críticos del sistema, brindando información valiosa sobre su capacidad para mantener condiciones térmicas adecuadas. Este enfoque se respalda con estudios previos que destacan la influencia de los cultivos en las necesidades energéticas del invernadero (Chahidi et al., 2021) y la importancia de comprender los mecanismos de transpiración para estimar su impacto en el consumo de energía (Nimmermark & Maslak, 2015).

Además, se consideran estudios que cuantifican los efectos de la vegetación en la tasa de ventilación, demostrando cómo la resistencia de la vegetación afecta el flujo de aire dentro del invernadero (Chu et al., 2017). En conjunto, estos hallazgos respaldan la validez de modelar la temperatura sin cultivos para comprender a fondo las complejidades del sistema.

La radiación representa la energía emitida por el sol, siendo una variable de gran importancia en diferentes tipos de estrategias de climatización, así como en el manejo diario de los cultivos (Flores et al., 2022). Esta variable por su disponibilidad tiene influencia en el aprovechamiento de diversas fuentes de energía, pero principalmente en el aprovechamiento de la energía solar. Así mismo en el aprovechamiento de la energía eólica, ya que las corrientes de viento son el resultado de diferencias de presiones y temperaturas generadas por la radiación solar. Por último, la radiación también impacta sobre el aprovechamiento de la energía geotérmica, ya que esta la radiación influye en la temperatura del suelo, temperatura que puede limitar o potencializar la optimización micro climática que puede obtenerse de fuentes geotérmicas (Sepúlveda, 2014).

En los procesos de validación de los estudios recopilados, se identificó que en algunos se presta un total interés en el contenido de humedad de aire. En un estudio donde se aumentó la temperatura en 3°C, se demostró que es posible reducir en 10% la humedad relativa del aire del invernadero aun con la presencia de cultivo, esta optimización del ambiente permitió incrementar en 35% la producción de tomate y a su vez se generó una disminución de plagas y enfermedades; estas dos últimas, atribuidas principalmente a la disminución de humedad (Gourdo et al., 2019).

Finalmente, en la mayoría de los casos la temperatura, fue la variable de mayor interés experimental en las investigaciones. Chen et al., (2018) implementó un muro de ventilación activo-pasivo con PCM, como una solución para aumentar la capacidad de almacenamiento de calor, los resultados mostraron que es posible aumentarla temperatura del aire interior del invernadero hasta en 4.16°C y la temperatura del suelo en 1.09°C, lo que se tradujo en un incremento en el rendimiento del 28% y se redujo el ciclo de cultivo en aproximadamente en 15 días.

El cultivo de Tomate fue evaluado en 52 publicaciones. En cuanto a las hortalizas estas representan el tipo de cultivo que más se evaluó con 110 documentos, seguidos por frutas y ornamentales con 60 y 21 documentos respectivamente. Es importante mencionar que también hubo investigaciones donde se reportaron, cultivos de cereales, leguminosas, aromáticas, hongos, algodón e incluso plantas leñosas.

La consideración de los cultivos en estos estudios es crucial, ya que se ha comprobado que influyen en las necesidades energéticas del invernadero (Chahidi et al., 2021). Es fundamental comprender a fondo los mecanismos relacionados con la transpiración para estimar su impacto en el consumo de energía (Nimmermark & Maslak, 2015). Aunque el sombreado no es suficiente para mantener los niveles óptimos de temperatura y presión de vapor para los cultivos, existe un valor específico para cada tipo de cultivo, dependiendo de factores como las condiciones climáticas, las características del invernadero y otras variables. Por ejemplo, en Grecia, un sombreado del 35% mejora la producción de tomates, pero valores superiores o inferiores afectan la formación y aborto de frutos. La exposición excesiva a la luz puede causar fotoinhibición, afectando el crecimiento de la planta, mientras que la limitación de la luz reduce la fotosíntesis, generando un desequilibrio en la oferta y demanda de recursos vegetales como el carbono (Kitta et al., 2012).

Por otro lado, la utilización de un sistema adecuado de climatización puede llevar a mejoras significativas, como en el caso de la utilización de un invernadero de doble efecto desarrollado en china, con una manta térmica entre dos capas y una placa sándwich de policarbonato transparente en la mitad del techo y pared trasera, para conservar la energía en el periodo nocturno, complementado con un sistema de bomba de calor de energía solar con colectores solares de tipo bolsa y cortina de agua modulares y almacenamiento en piscina; sistema con el que se controla la temperatura y humedad del invernadero. Se evaluó el sistema con mediciones de temperatura mínima, temperatura promedio, intensidad de luz, humedad relativa, y rendimientos por área y por planta; los resultados demostraron que el sistema logró mantener una temperatura mínima de 12.5°C y una humedad relativa inferior al 80%, incrementó la temperatura promedio en 3.8°C con respecto al invernadero de referencia y la calidad de los productos y el rendimiento de las hortalizas hasta 55% en la producción por unidad de área; finalmente se recomienda este invernadero para zonas similares al norte de china pues mejoró las condiciones microclimáticas, disminuyendo las enfermedades y las pérdidas por frío, a la vez que aumenta la producción y los ingresos (Qiu et al., 2014).

De forma similar, Recientemente, se evaluó la eficacia de un invernadero tipo túnel de tamaño reducido con suelo radiante, que recolecta y almacena energía solar a 1 m de

profundidad en una tubería de 110 mm de diámetro. Este sistema logró mantener temperaturas en el invernadero entre 3 y 35 °C, permitiendo una siembra más temprana de hortalizas sin depender de las condiciones climáticas externas. Este enfoque también prolongó la vida de las plantas al utilizar de manera eficiente la Radiación Fotosintéticamente Activa (PAR), lo que se tradujo en un aumento de rendimientos y una alta calidad en las hortalizas (Belov et al., 2020). Además, se concluyó en otra investigación que la producción de hortalizas en invernaderos con colectores solares puede ser más sostenible en comparación con los invernaderos convencionales. Esto se debe a los ahorros en energía, agua, fertilizantes y emisiones de CO<sub>2</sub>, junto con mejores rendimientos comerciales. La naturaleza semicerrada del invernadero, que resulta en una mayor concentración de CO<sub>2</sub>, contribuye a mejoras en la huella de carbono, incluso alcanzando valores negativos al considerar el exceso de energía captada como energía de exportación (Ntinis et al., 2020).

También Se investigó un sistema de colector solar con almacenamiento subterráneo mediante tuberías en forma de "U" en la producción de arándanos en un invernadero de dimensiones reducidas. Los resultados indicaron un aumento del 120% en la producción y un incremento del 50-100% en los precios, atribuido a la influencia positiva de la temperatura en la producción y floración. Las plantas en el invernadero controlado florecieron hasta dos meses antes, permitiendo la comercialización con valores superiores a las fechas de producción convencionales (L. Zhang et al., 2015). Asimismo, se observaron mejoras en los rendimientos, superando los 11.550 kg/hm<sup>2</sup>, y se logró estabilizar la calidad, con más del 80% clasificado como alta calidad. La implementación de un sistema de calefacción de leña junto con la energía solar en un suelo radiante contribuyó a mantener una temperatura óptima para mejorar y estabilizar la calidad de los frutos. Además, el funcionamiento semiautomático del sistema redujo significativamente la intensidad de trabajo (D. Zhang et al., 2014).

Por otro lado, se investigó la implementación de un sistema fotovoltaico que genera energía eléctrica de 6288 kWh/año, siendo suficiente para satisfacer las necesidades energéticas del invernadero, adicionalmente al incluir un sistema de enfriamiento en el área fotovoltaica al instalar el cultivo a 1 m de altura, se mejora la productividad de los hongos, debido a la baja radiación solar, pues la intensidad de la luz tiene efecto en el diámetro del

sombreo, la altura del tallo de las setas y el peso, a la vez que se garantizaron las condiciones de temperatura y humedad óptimas para la producción (El Kolaly et al., 2020).

De acuerdo con los resultados obtenidos de la revisión bibliométrica y técnica, se tomó la decisión de calibrar y evaluar un modelo de predicción de temperatura sin ningún tipo de acondicionamiento climático mediante calefacción o enfriamiento y ningún tipo de cultivo, con el fin de analizar y reconocer el comportamiento térmico más crítico. Así mismo, diseñar un sistema integrado con agua en un sistema de tubería negra en el suelo y pantallas térmicas en el techo y dos paredes opuestas del invernadero con base en investigaciones que resaltan la eficacia de estas pantallas para optimizar el microclima y reducir el uso de combustibles fósiles (Taki et al., 2016). Este enfoque integral busca no solo maximizar la producción de cultivos, sino también minimizar el impacto ambiental y los costos operativos, alineándose con las tendencias actuales de desarrollo en climatización sostenible (Paksoy & Beyhan, 2015), al combinarse con un colector solar y un panel híbrido para aprovechar tanto la generación eléctrica como térmica de la energía solar (Hosseini et al., 2019), el agua caliente resultante respalda la creación de un microclima propicio para el cultivo, como lo indican estudios anteriores (Ma, 2019).

### **3.2. Demanda energética para prevenir los efectos de las heladas en el invernadero de estudio**

La precisión en la predicción de la temperatura dentro de un invernadero es esencial para garantizar condiciones óptimas de cultivo. Este estudio empleó con éxito un modelo diferencial de temperatura para invernaderos **(2-2)**, cuyos resultados detallados fueron publicados (Ortiz et al., 2023) y los parámetros calibrados se presentan en la **Tabla 2-1**.

La ecuación **(2-17)** posee una base lógica para la determinación de la demanda energética específica durante condiciones de helada, permitiendo que el sistema de climatización aporte la cantidad necesaria de energía para mantener el entorno térmico adecuado. Las variables de entrada corresponden a una temperatura externa de 0°C, interna de 5°C y

una velocidad de viento de un 1 m/s, de acuerdo con el comportamiento observado durante las noches. Con los parámetros finales del proceso de calibración y considerando la estructura y el comportamiento del invernadero evaluado, se obtuvo un requerimiento energético de 2.108 W **(3-1)**. Este valor es próximo a la potencia instalada media para el gradiente térmico contemplado (Valera et al., 2008).

$$\begin{aligned}
 Q_{demanda} = & 4.3 \left( \frac{97.76}{20} \right) (5 - 0) \\
 & + \left( \left( \frac{4 * 0.7}{2} \right) * 1.75 + 0.7 e^{-\frac{[4]}{32.5}]^{-0.5}} * \sqrt{0.045} * 1 + 20 \right. \\
 & \left. * 0.011 \right) * 1.1 * 1.006 * (5 - 0) = 2.108 W
 \end{aligned}
 \tag{3-1}$$

Adicionalmente, en un estudio realizado en el municipio de Nemocón – Cundinamarca, se registró que la duración de las heladas osciló entre cuatro y seis horas (González & Torres, 2012). Suponiendo una probable similitud en el rango de duración, se establece el requerimiento térmico en 12.648 W con 90% de probabilidad especialmente para los meses de diciembre y enero.

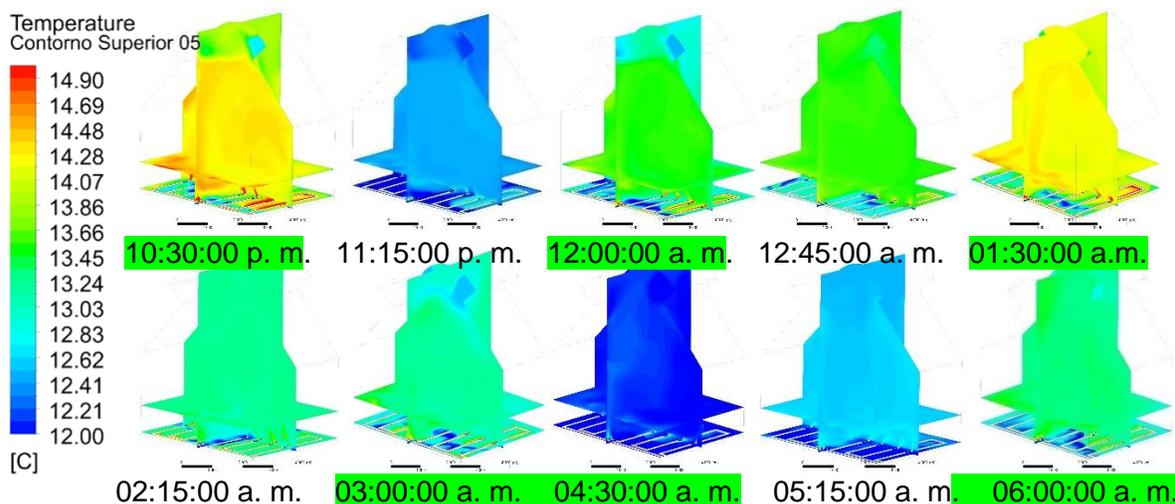
### 3.3. Diseño mediante el uso de CFD

#### 3.3.1. Validación

El sistema de climatización desde las 10:30 pm, cada 90 minutos. En la **Figura 3-4** se presentan 10 diferentes momentos durante el periodo en el cual estuvo activo el sistema el 17 de abril de 2023. El agua en el sistema con una temperatura de 42.15 °C y la temperatura del agua estancada correspondía a un valor de 17.2 °C, la menor temperatura exterior se dio a las 4:30 am, correspondiendo a 11.83 °C y de acuerdo con el modelo en CFD, la temperatura interior correspondió a la menor durante la noche con un valor de 12 °C, seguido de las 11:15 donde la temperatura exterior fue de 12.15 °C y de acuerdo con el modelo la del invernadero fue en promedio de 12.38°C, sin embargo, este punto

corresponde al de mayor error absoluto con respecto a los datos experimentales con un valor promedio de 2.32 °C, aunque el promedio general del error durante la noche fue de 0.89 °C. Así mismo el valor de mayor temperatura externa fue de 13.40 °C y se dio a la 1:30 am, con una temperatura interna promedio de 14.18 °C. Estas diferencias son similares a las reportadas por (Pérez et al., 2021)

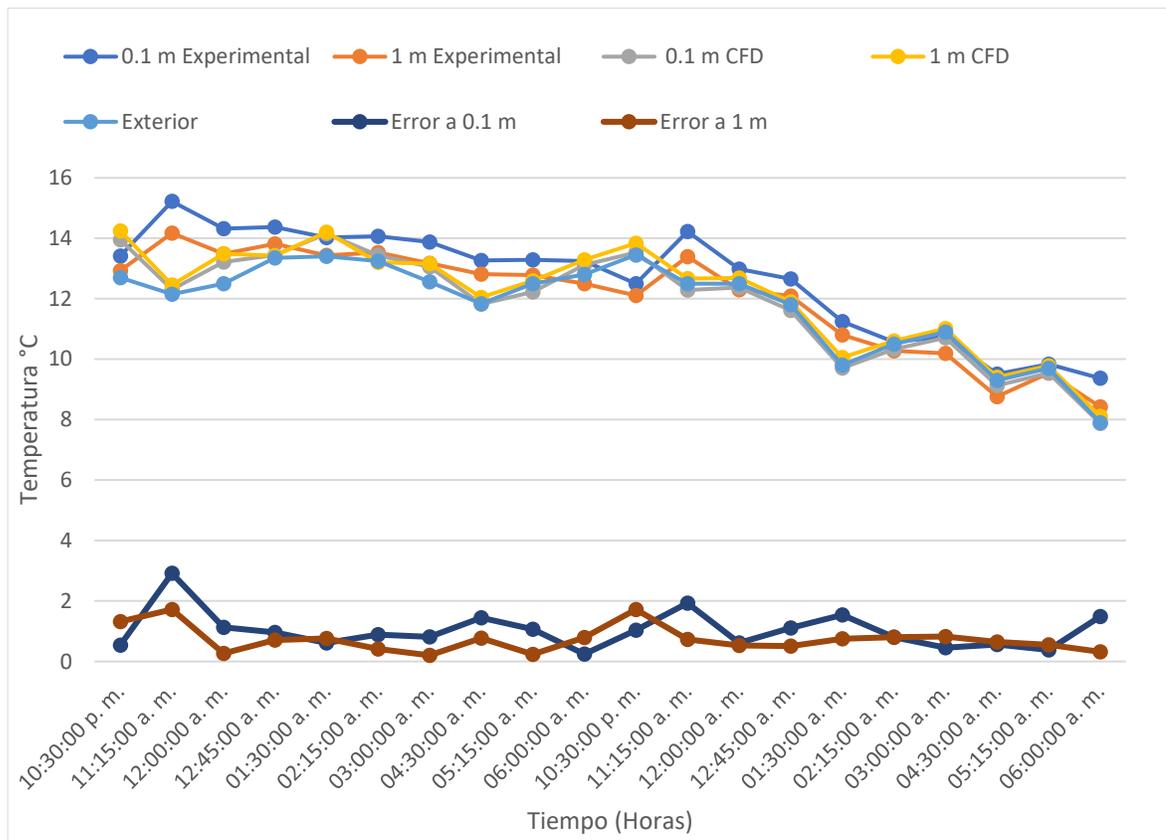
**Figura 3-4:** Comportamiento de la temperatura modelado en CFD, con la bomba apagada y encendida (resaltada la hora en verde)



Nombre de la fuente: Elaboración propia

En la **Figura 3-5** se observan las temperaturas promedio de los sensores, medidas experimentalmente y las obtenidas en la simulación con CFD, así mismo se incluye el error absoluto de acuerdo con la altura de medición, encontrando que en ambos casos se mantienen los errores similares, siendo un poco más preciso para detectar la temperatura a la altura de un (1) metro con un error promedio de 0.73°C y un error promedio de 1.03°C a 0.1 metros.

**Figura 3-5:** Error absoluto y temperaturas medidas y simuladas a 0.1 m y 1 m de altura.



Nombre de la fuente: Elaboración propia

En la

**Tabla 3-1** se presentan los errores absolutos entre la experimentación y el modelo CFD, los cuales son muy cercanos entre sí, obteniendo un valor máximo de 3.41 °C y promedio de 0.88 °C, lo cual se considera aceptable.

**Tabla 3-1:** Errores absolutos entre la experimentación y el modelo CFD

Fecha	Hora	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	Error prom
17/04/2023	10:30:00 p. m.	1.49	1.20	1.29	0.38	1.01	1.30	0.19	0.58	0.93
17/04/2023	11:15:00 a. m.	3.12	1.23	1.23	3.10	2.01	1.29	3.14	3.41	2.32
17/04/2023	12:00:00 a. m.	0.52	0.14	0.20	1.37	0.05	0.20	1.36	1.74	0.70
18/04/2023	12:45:00 a. m.	2.21	0.20	0.26	1.04	0.06	0.16	1.26	1.49	0.83
18/04/2023	01:30:00 a. m.	0.09	1.05	0.99	0.55	0.94	0.93	0.21	0.77	0.69

Fecha	Hora	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	Error prom
18/04/2023	02:15:00 a. m.	1.41	0.08	0.14	0.22	0.52	0.03	1.39	1.42	0.65
18/04/2023	03:00:00 a. m.	0.43	0.16	0.17	0.53	1.10	0.05	1.21	0.43	0.51
18/04/2023	04:30:00 a. m.	1.31	0.63	0.57	1.88	0.61	0.56	1.46	1.82	1.10
18/04/2023	05:15:00 a. m.	0.84	0.05	0.05	0.97	0.47	0.00	1.50	1.31	0.65
18/04/2023	06:00:00 a. m.	0.56	0.89	0.89	0.09	0.23	0.82	0.52	0.13	0.52
18/04/2023	10:30:00 p. m.	1.35	1.82	1.89	1.69	1.42	1.83	0.57	0.45	1.38
18/04/2023	11:15:00 a. m.	2.03	0.26	0.21	1.75	1.32	0.41	2.33	2.33	1.33
19/04/2023	12:00:00 a. m.	0.29	0.62	0.63	0.27	0.01	0.56	1.17	1.00	0.57
19/04/2023	12:45:00 a. m.	1.40	0.24	0.23	0.87	0.14	0.18	1.23	2.18	0.81
19/04/2023	01:30:00 a. m.	1.36	0.54	0.51	1.05	0.59	0.59	1.74	2.77	1.14
19/04/2023	02:15:00 a. m.	0.96	0.78	0.81	0.33	0.78	0.68	0.87	1.21	0.80
19/04/2023	03:00:00 a. m.	0.29	1.03	1.07	0.38	0.47	0.90	0.56	0.39	0.64
19/04/2023	04:30:00 a. m.	0.31	0.81	0.67	0.36	0.00	0.78	1.35	0.54	0.60
19/04/2023	05:15:00 a. m.	0.62	0.60	0.57	0.09	0.09	0.42	0.64	0.71	0.47

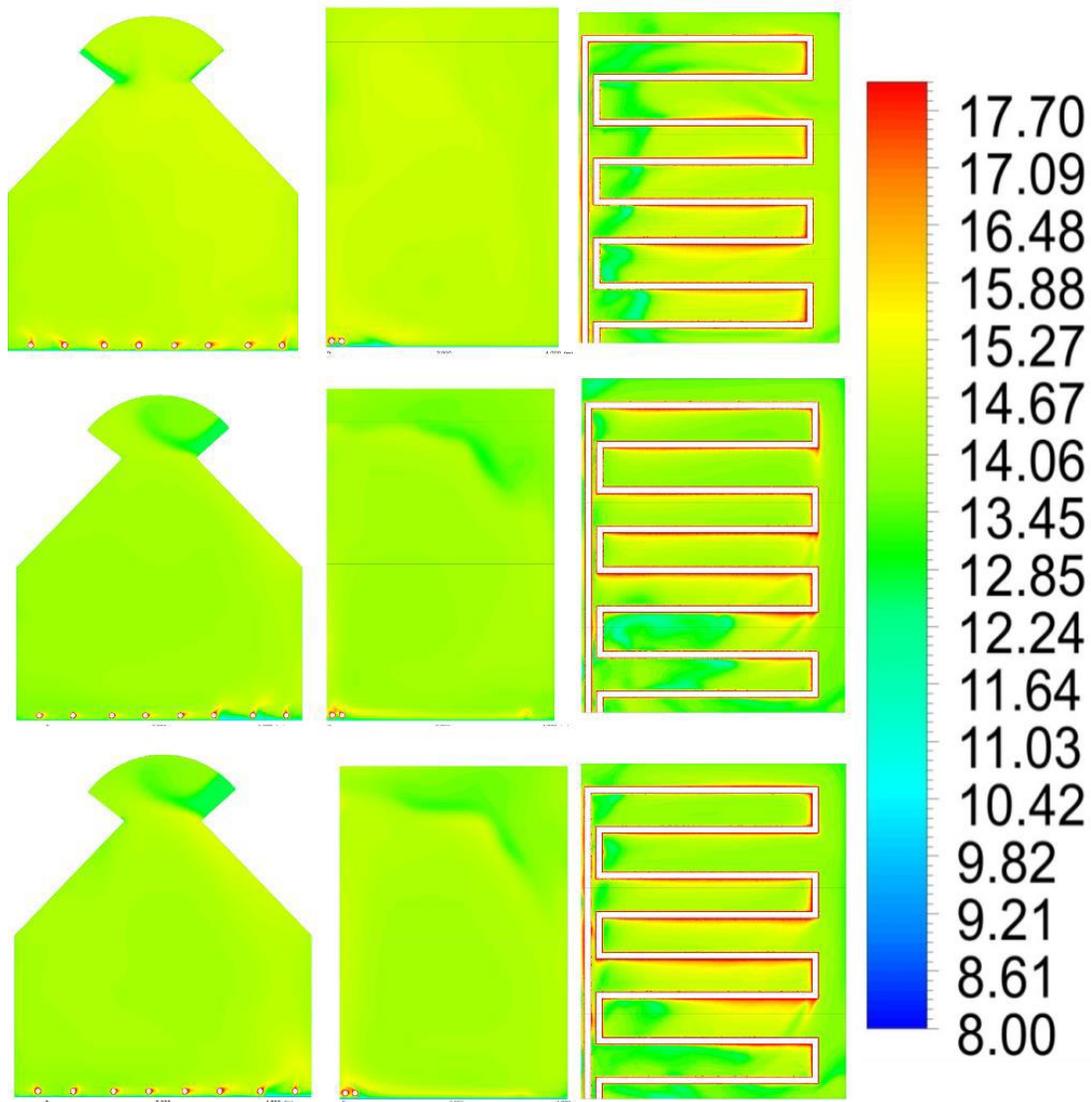
Nombre de la fuente: Elaboración propia

### 3.3.2. Calibración y análisis de sensibilidad

Se evaluaron tres materiales para la tubería en el sistema de calefacción: PVC, acero y Oxy pox. También se consideraron dos temperaturas de entrada al sistema: 42 °C y 80 °C. Se capturaron imágenes del comportamiento del sistema a las 10:30 pm y a las 6:00 am durante dos noches, con activaciones cada 90 minutos.

Con la entrada del agua a 42 °C, a las 10:30 pm, se registró una externa de 12.7°C, mientras que las imágenes mostraron que la temperatura promedio del invernadero correspondió a 14.55°C con PVC, 14.62°C con acero y 14.71 °C con el Oxy Pex (**Figura 3-6**).

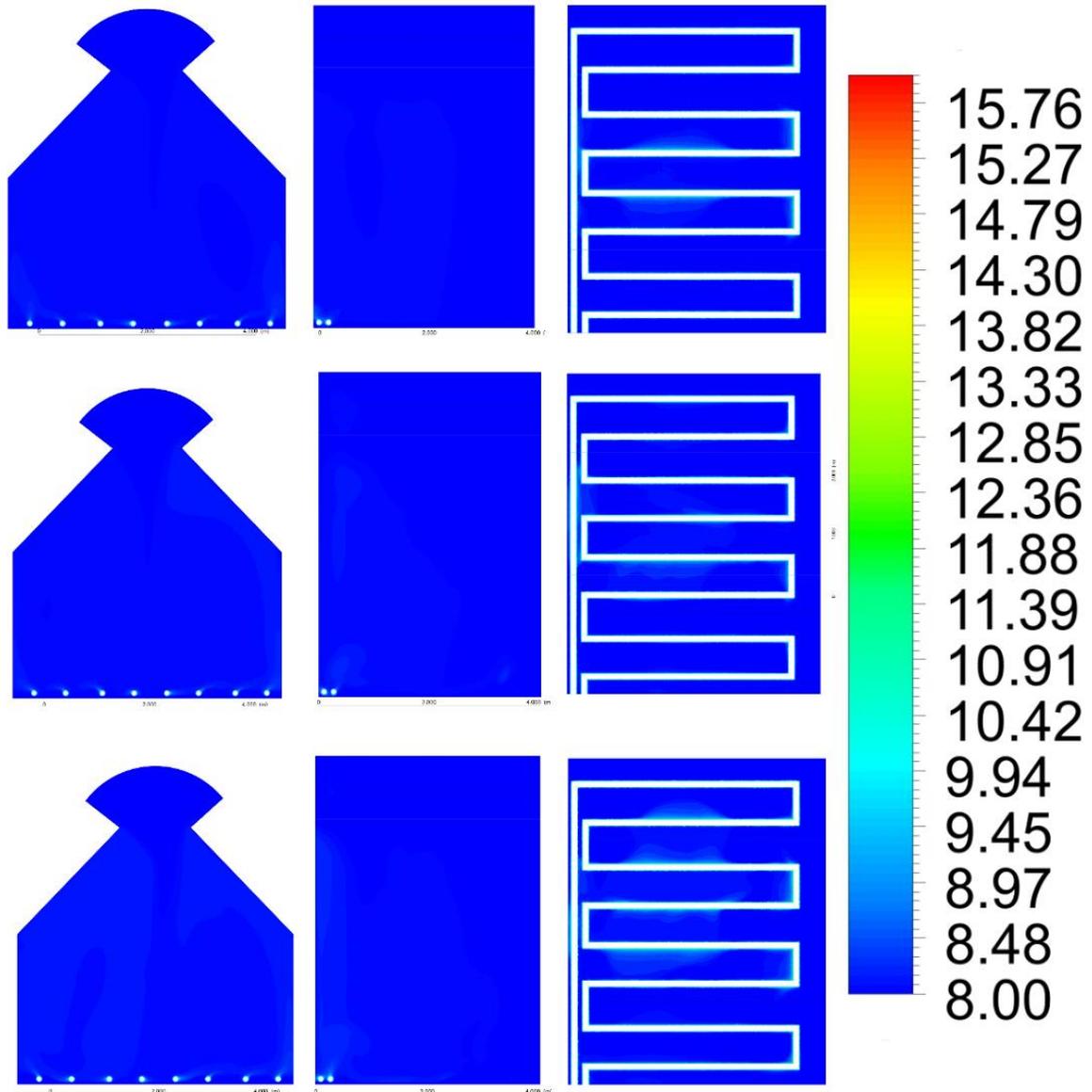
**Figura 3-6:** Capturas de las condiciones de temperatura (°C) con tubería en PVC, Acero y Oxy Pex con entrada del agua a 42°C a las 10:30 pm del 17 de abril de 2023



Nombre de la fuente: Elaboración propia

Al cabo de los dos días, a las 6:00 am, con una temperatura exterior de 7.90°C, se observaron temperaturas promedio del invernadero de 7.87°C con el PVC, 8.11 °C con el acero y 8.15°C con Oxy pex, evidenciando en este último una leve transferencia las proximidades de la tubería (**Figura 3-7**).

**Figura 3-7:** Capturas de las condiciones de temperatura (°C) con tubería en PVC, Acero y Oxy Pex con entrada del agua a 42°C a las 6:00 am del 19 de abril de 2023



Nombre de la fuente: Elaboración propia

El análisis Anova confirmó que no existen diferencias significativas al cambiar de material y tener una temperatura del agua 42°C (**Tabla 3-2**).

**Tabla 3-2:** Análisis Anova del cambio de material con una temperatura inicial del agua de 42°C

RESUMEN						
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>		
PVC	160.00	1,917.67	11.99	3.32		
Acero	160.00	1,954.49	12.22	3.25		
Oxy Pex	160.00	1,967.72	12.30	3.33		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	8.41	2.00	4.20	1.27	0.28	3.01
Dentro de los grupos	1,574.12	477.00	3.30			
Total	1,582.53	479.00				

Nombre de la fuente: Elaboración propia

Al incrementar la temperatura del agua de 42 °C a 80 °C y al analizar los datos en un enfoque general, promediando los resultados de los sensores para cada escenario, se identifican diferencias notables que varían según el material utilizado. Según los resultados específicos del análisis ANOVA para cada material, no se aprecian diferencias significativas en el acero, mientras que en PVC y Oxy pex, el cambio en la temperatura ambiente se considera significativo (Tabla 3-3). No obstante, al examinar la totalidad de los datos, se evidencia que existe una diferencia significativa, incluso en el caso del acero (Tabla 3-4).

**Tabla 3-3:** Análisis ANOVA general para evaluar el cambio de temperatura del agua, en cada material de tubería

RESUMEN						
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>		
PVC ( 80 °C )	20.00	262.88	13.14	2.96		
PVC (42 °C)	20.00	239.71	11.99	3.38		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Prob.</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	13.42	1.00	13.42	4.24	0.05	4.10
Dentro de los grupos	120.43	38.00	3.17			
Total	133.85	39.00				

RESUMEN						
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>		
Acero (80 °C)	20.00	266.86	13.34	3.65		
Acero (42 °C)	20.00	244.31	12.22	3.31		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Prob.</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	12.71	1.00	12.71	3.65	0.06	4.10
Dentro de los grupos	132.41	38.00	3.48			
Total	145.12	39.00				

RESUMEN						
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>		
Oxy Pex (42 °C)	20.00	245.97	12.30	3.40		
Oxy Pex (80 °C)	20.00	287.28	14.36	2.84		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Prob.</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	42.67	1.00	42.67	13.67	0.00	4.10
Dentro de los grupos	118.57	38.00	3.12			
Total	161.24	39.00				

Nombre de la fuente: Elaboración propia

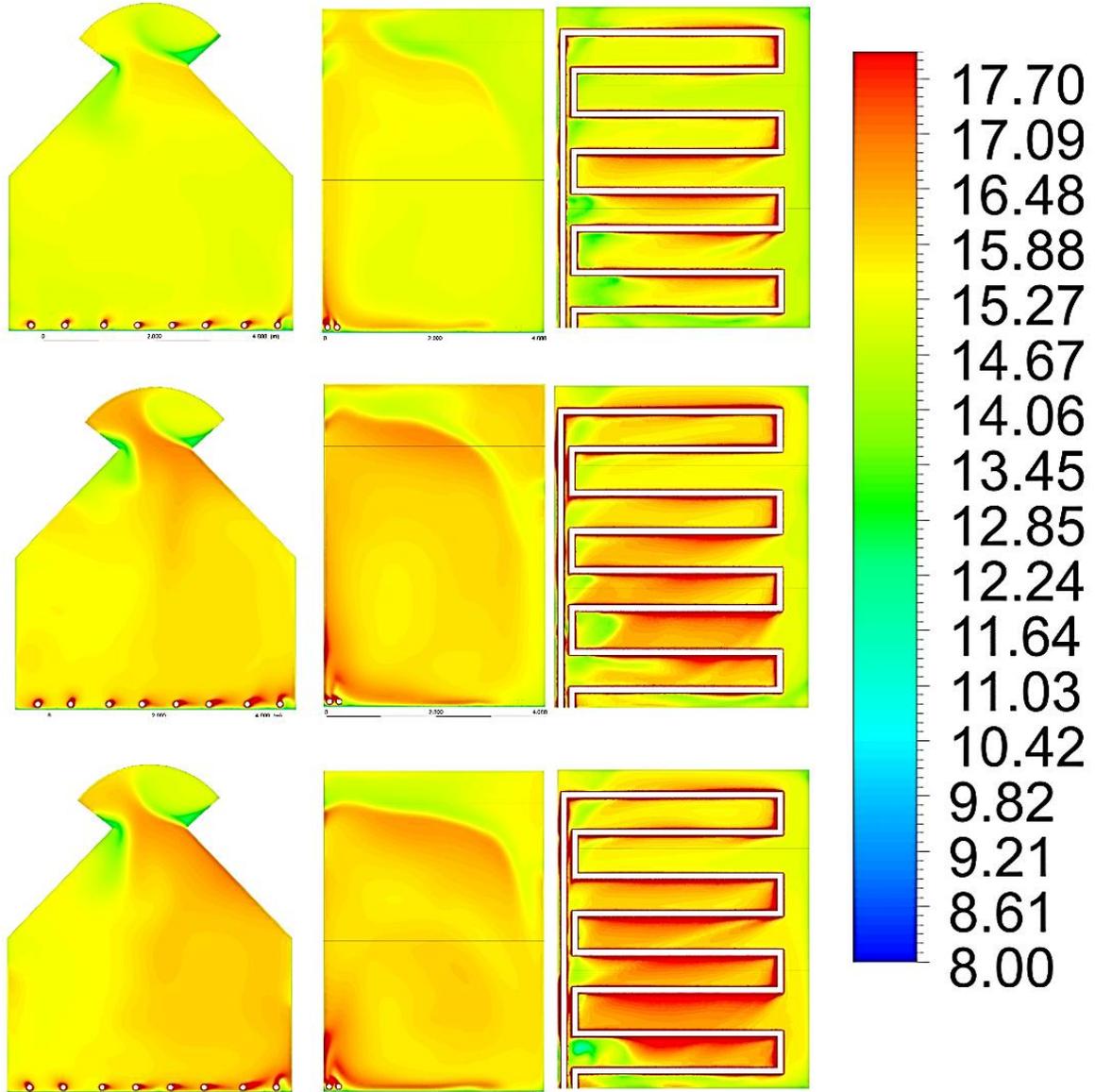
**Tabla 3-4:** Análisis ANOVA detallado para evaluar el cambio de temperatura del agua, en la tubería de acero

RESUMEN						
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>		
Acero (80 °C)	160	2134.86	13.34	3.71		
Acero (42 °C)	160	1954.49	12.22	3.25		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Prob.</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	101.67	1	101.67	29.24	0.00	3.87
Dentro de los grupos	1105.73	318	3.48			
Total	1207.41	319				

Nombre de la fuente: Elaboración propia

En el modelo CFD al aumentar la temperatura del agua a 80 °C, se registró un aumento promedio de 1.19 °C a las 10:30 pm con valores de 15.31 °C, 15.91 °C y 16.22 °C en la temperatura promedio del invernadero con tubería en el suelo de PVC, acero y Oxy pex correspondientemente (**Figura 3-8**).

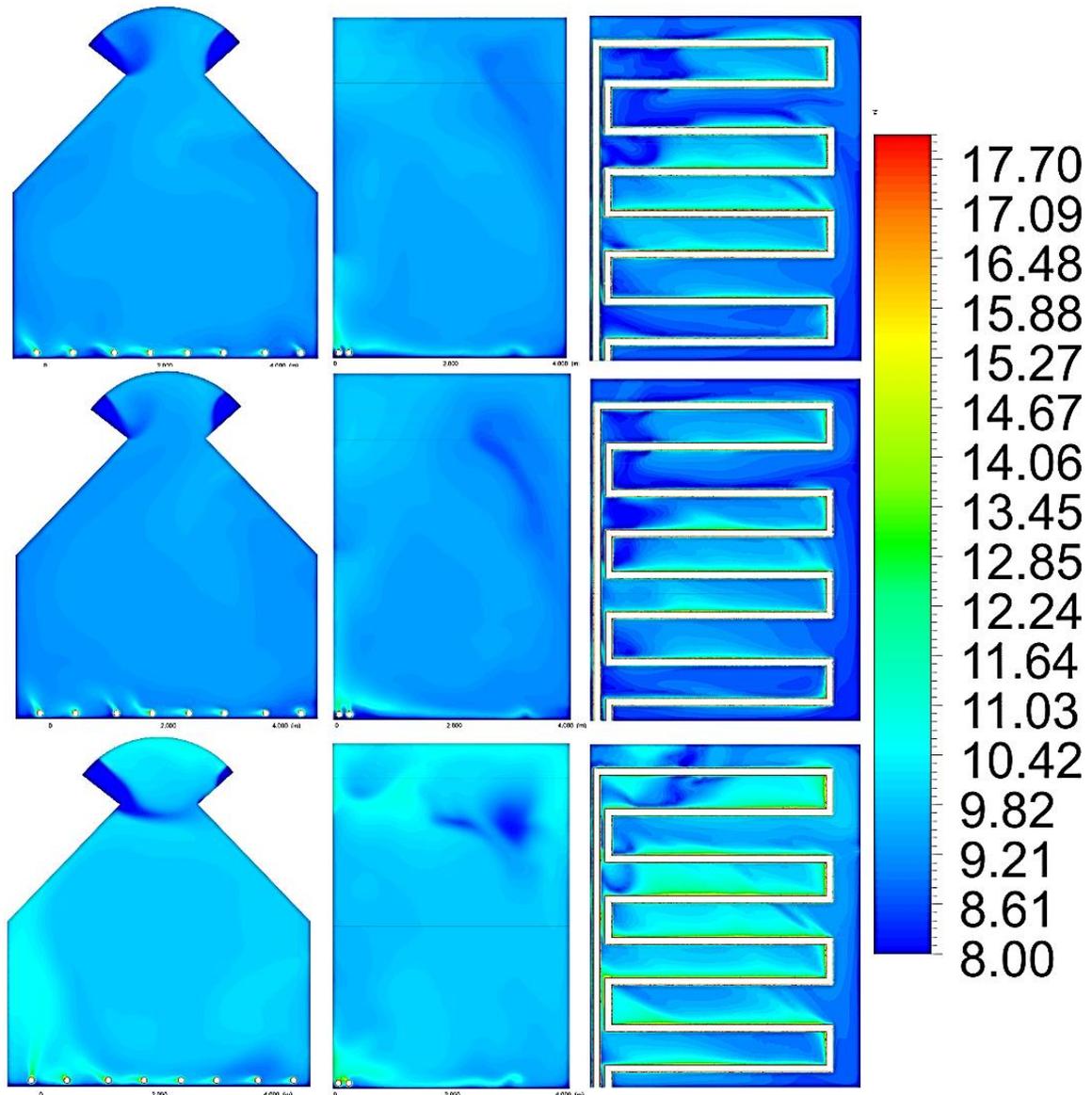
**Figura 3-8:** Capturas de las condiciones de temperatura (°C) con tubería en PVC, Acero y Oxy Pex con entrada del agua a 80°C a las 10:30 pm del 17 de abril de 2023



Nombre de la fuente: Elaboración propia

Así mismo, al cabo de los dos días, a las 6:00 am, se observaron temperaturas promedio del invernadero de 9.26 °C con el PVC, 8.98 °C con el acero y 9.92°C con Oxy pex, evidenciando un aumento promedio de 1.34°C (**Figura 3-9**).

**Figura 3-9:** Capturas de las condiciones de temperatura (°C) con entrada del agua a 80°C con tubería en PVC, Acero y Oxy Pex a las 6:00 am del 19 de abril de 2023



Nombre de la fuente: Elaboración propia

El análisis de varianza (ANOVA) revela diferencias significativas entre las condiciones de temperatura generadas por los tres materiales cuando el agua se encuentra a 80 °C (**Tabla 3-5**). Sin embargo, al realizar comparaciones específicas entre pares mediante análisis de ANOVA para cada combinación, se evidenció que entre el acero y el PVC no existen diferencias significativas (**Tabla 3-6**). Contrariamente, el material OXY Pex demuestra generar condiciones significativamente superiores en comparación con ambos materiales (**Tabla 3-7**).

**Tabla 3-5:** Análisis ANOVA de los tres (3) materiales con una temperatura del agua de 80 °C

RESUMEN						
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>		
PVC (80 °C)	160.00	2,103.03	13.14	3.03		
Acero (80 °C)	160.00	2,134.86	13.34	3.71		
Oxy Pex (80 °C)	160.00	2,298.21	14.36	2.88		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Proba.</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	137.07	2.00	68.53	21.37	0.00	3.01
Dentro de los grupos	1,529.69	477.00	3.21			
Total	1,666.76	479.00				

Nombre de la fuente: Elaboración propia

**Tabla 3-6:** Análisis ANOVA de la tubería en PVC y Acero con una temperatura del agua de 80 °C

RESUMEN						
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>		
PVC (80 °C)	160.00	2,103.03	13.14	3.03		
Acero (80 °C)	160.00	2,134.86	13.34	3.71		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>Prob F</i>	<i>Valor crítico para F</i>	
Entre grupos	3.17	1.00	3.17	0.9	0.3	3.87
Dentro de los grupos	1,071.35	318.00	3.37			
Total	1,074.51	319.00				

Nombre de la fuente: Elaboración propia

**Tabla 3-7:** Análisis ANOVA de la tubería en Oxy Pex, comparada con el Acero y el PVC, con una temperatura del agua de 80 °C

RESUMEN						
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>		
Acero a (80 °C)	160.00	2,134.86	13.34	3.71		
Oxy Pex (80 °C)	160.00	2,298.21	14.36	2.88		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	83.39	1.00	83.39	25.30	0.00	3.87
Dentro de los grupos	1,047.99	318.00	3.30			
Total	1,131.37	319.00				
RESUMEN						
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>		
PVC a (80 °C)	160.00	2,103.03	13.14	3.03		
Oxy Pex (80 °C)	160.00	2,298.21	14.36	2.88		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Prob.</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	119.05	1.00	119.05	40.3	0.00	3.87
Dentro de los grupos	940.05	318.00	2.96			
Total	1,059.10	319.00				

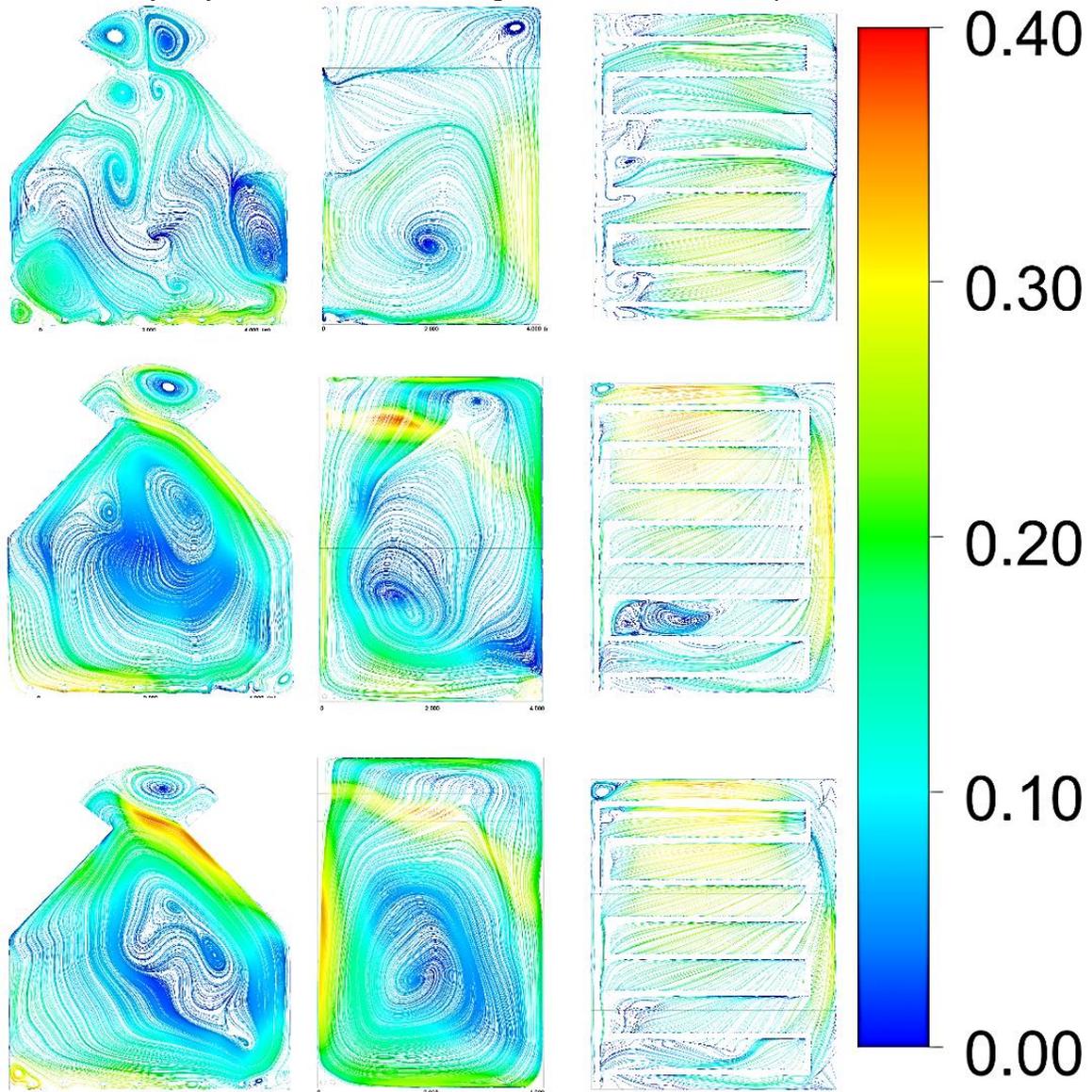
Nombre de la fuente: Elaboración propia

Se destaca la capacidad del material Oxy Pex para mantener condiciones adecuadas incluso después de transcurrir 2 días. Este comportamiento se atribuye especialmente a su valor de conductividad térmica, permitiéndole suministrar calor de manera más eficiente que el PVC, aunque de manera más sostenida en comparación con el acero. Este último, con una mayor capacidad de conductividad, aporta calor al entorno de manera rápida y efectiva.

En cuanto a la velocidad del viento, esta varía según el material y la temperatura de entrada. Por ejemplo, en PVC a 42 °C, la mayoría de las velocidades estaban en 0.1 m/s,

con algunas zonas cercanas al sistema de tubería que alcanzan valores de 0.2 m/s, mientras que, en acero a 42 °C, se observaron valores cercanos a 0.3 cerca de la ventana cenital y 0.2 n/s en el borde interno del invernadero y en Oxy pex a 42 °C, las velocidades fueron más altas, alcanzando hasta 0.4 m/s en el contorno, disminuyendo al acercarse al centro (**Figura 3-10**), valores similares a los reportados por Espinal-Montes et al., (2015).

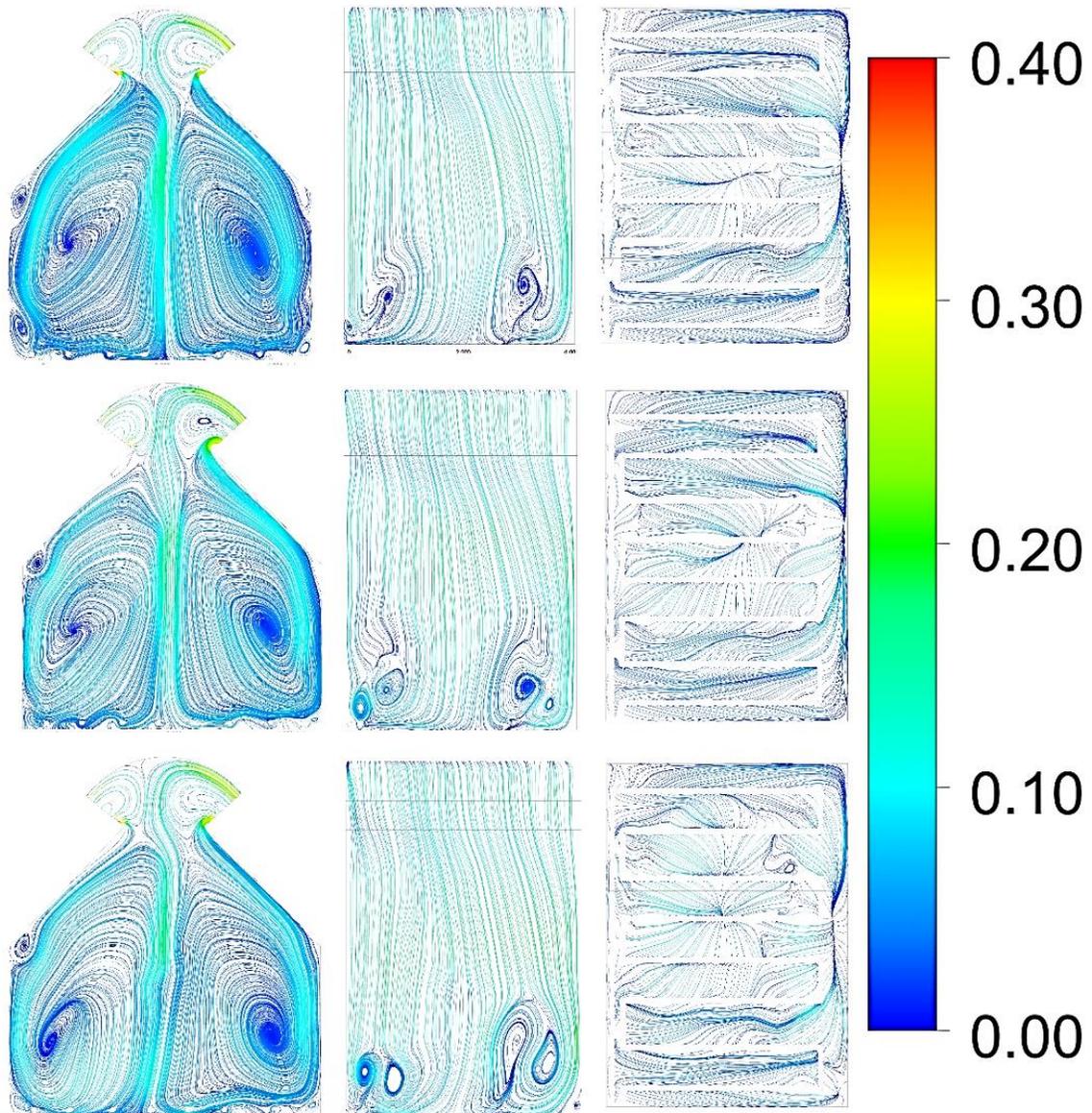
**Figura 3-10:** Capturas de las condiciones de velocidad del viento (m/s) con tubería en PVC, Acero y Oxy Pex con entrada del agua a 42°C a las 10:30 pm del 17 de abril de 2023



Nombre de la fuente: Elaboración propia

Al cabo de dos días, a las 6:00 am, en las esquinas, se observaron vórtices con velocidades cercanas a cero, mientras que la mayoría de las zonas presentaron velocidades de 0.1 m/s (Figura 3-11).

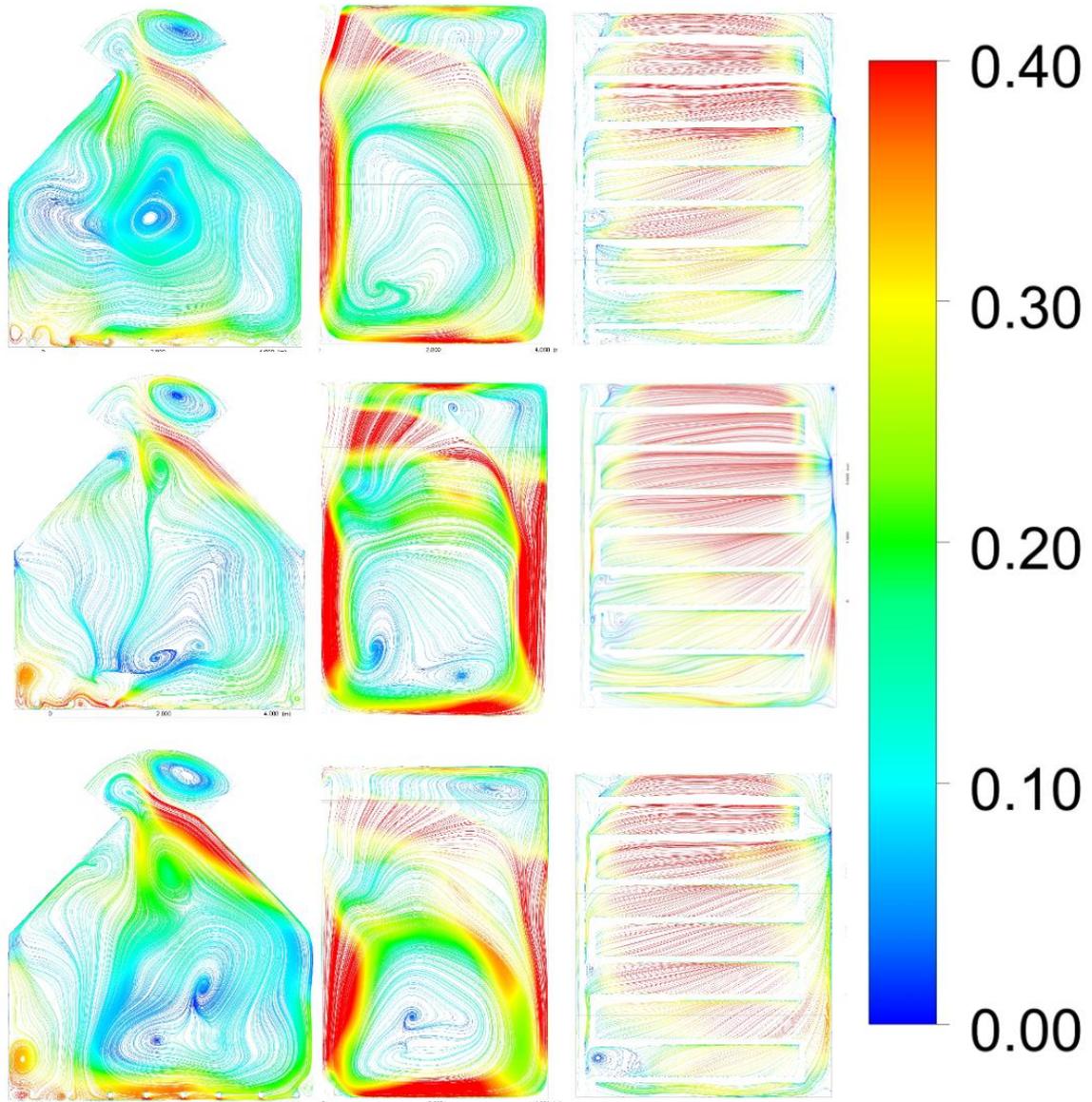
**Figura 3-11:** Capturas de las condiciones de velocidad del viento (m/s) con tubería en PVC, Acero y Oxy Pex con entrada del agua a 42°C a las 6:00 am del 19 de abril de 2023



Nombre de la fuente: Elaboración propia

Así mismo, a una temperatura de entrada de 80 °C, en PVC, acero y Oxy pex se encontraron zonas con velocidades de 0.4 m/s, principalmente en los bordes, suelo, y techo, mientras que la mayoría de la zona central presenta velocidades de 0.1 m/s, con algunas áreas alcanzando valores de 0.2 o 0.3 al alejarse hacia el contorno (**Figura 3-12**).

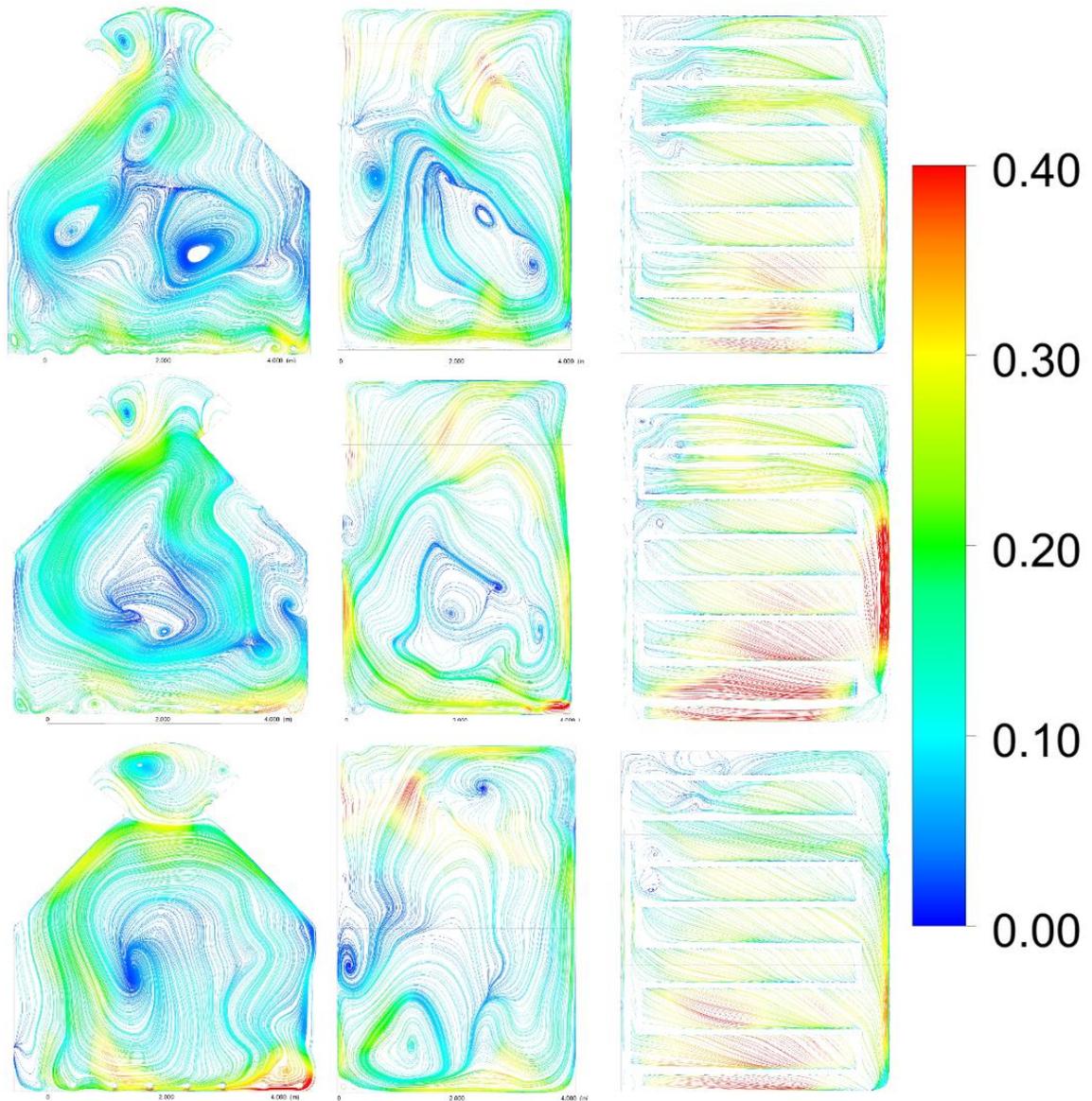
**Figura 3-12:** Capturas de las condiciones de velocidad del viento (m/s) con tubería en PVC, Acero y Oxy Pex con entrada del agua a 80°C a las 10:30 pm del 17 de abril de 2023



Nombre de la fuente: Elaboración propia

Al cabo de dos días, a las 6:00 am, dicho comportamiento permaneció constante, aunque mitigado, pues las velocidades de 0.4 m/s, se alcanzan en pequeñas secciones del suelo y techo, mientras que la mayoría de la zona central presenta velocidades de 0.1 m/s, con algunas áreas alcanzando valores de 0.2 o 0.3 m/s en el contorno (**Figura 3-13**).

**Figura 3-13:** Capturas de las condiciones de velocidad del viento (m/s) con entrada del agua a 80°C y con tubería en PVC, Acero y Oxy Pex a las 6:00 am del 19 de abril de 2023



Nombre de la fuente: Elaboración propia

En el entorno del invernadero, se puede observar un patrón de circulación de aire dirigido hacia las paredes y el techo, impulsado por las variaciones de densidad, lo que da lugar a la creación de áreas más frescas y a la disipación del calor. Investigaciones previas, como las simulaciones bidimensionales realizadas por Rojano et al., (2013) han identificado que este flujo ascendente de calor se origina principalmente debido al término de flotabilidad. Además, estudios posteriores, como el de Flores et al., (2019), han detallado y predicho el movimiento interno del aire mediante la consideración de fuerzas transitorias y convectivas. Estos términos se derivan de la fuerte dependencia de la densidad del aire con respecto a la temperatura, revelando así la complejidad de la dinámica del flujo de aire en el invernadero.

Aunque la simulación de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) ha demostrado ser una herramienta poderosa para diseñar sistemas de ventilación más eficientes, es crucial tener en cuenta que los resultados no pueden generalizarse de manera directa. Por lo tanto, se aboga por una investigación sistemática, específicamente dirigida a los tipos de invernaderos más comunes como lo sugiere Mistriotis et al., (1997), en este caso se valió uno tipo capilla. Se espera que, al introducir el cultivo, el flujo de aire se torne más homogéneo, como se ha destacado en investigaciones previas, como la de (Flores & Montero, 2008).

## **3.4. Evaluación experimental**

### **3.4.1. Comportamiento de la temperatura**

En la **Figura 3-14** se muestran los valores de temperatura registrados en el exterior y en los invernaderos IC e ISC. Los valores de temperatura en el exterior oscilaron entre 7.3 °C y 26.2 °C, mientras que en el invernadero ISC variaron entre 7.85 °C y 29.65 °C, y en el invernadero IC se encontraron en el rango de 9.25 °C a 31.5 °C.

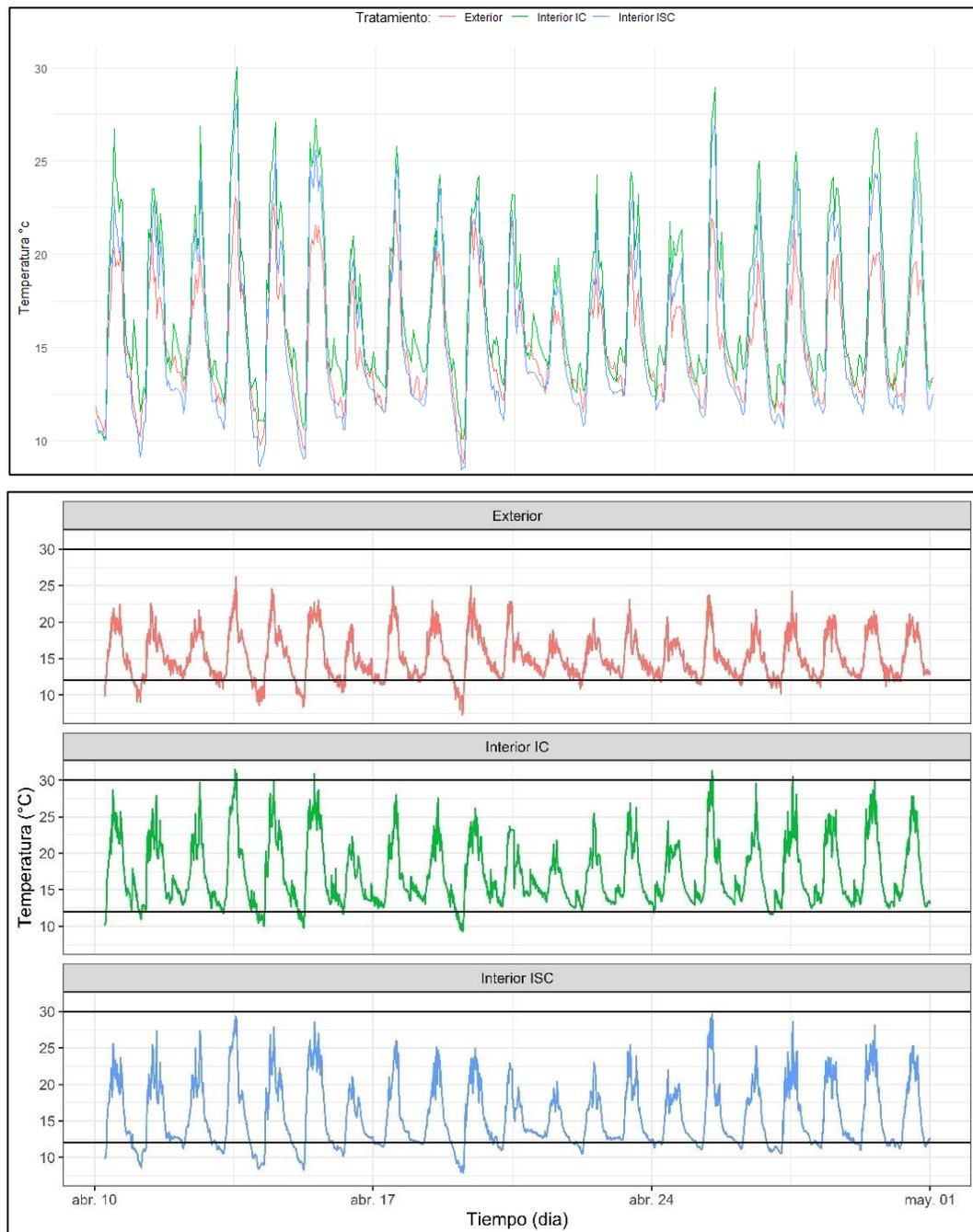
En el periodo nocturno durante el cual se activó periódicamente el sistema de calefacción se observó que el invernadero IC presentó una diferencia promedio de 1.94 °C en comparación con el invernadero ISC y de 1.18 °C con la temperatura exterior, con

diferencias hasta de 6.7 °C y 6 °C respectivamente. En general, se observa que los invernaderos, tanto IC cómo ISC, presentan temperaturas ligeramente inferiores a las del espacio exterior, aunque las diferencias son relativamente pequeñas y 73.98% menos constantes en el invernadero IC.

Así mismo, en dicho periodo nocturno el invernadero IC logró mantener la temperatura sobre 12.00 °C el 42.88% de veces más que el invernadero ISC y el 14.37% con respecto al exterior.

Por otra parte, las diferencias alcanzadas en el periodo diurno corresponden al efecto de la pantalla térmica, con una diferencia promedio de 3.08 °C con respecto al exterior y máxima de 11.45 °C, a su vez con respecto al invernadero ISC de 1.5 °C hasta 7.75 °C, resultados similares se observaron en Túnez, en un invernadero tipo capilla de cubierta plástica, donde con un colector solar plano lograron aumentar la temperatura en 5°C (Attar et al., 2013) y concuerda con López et al., (2018) sobre el uso de colectores solares con tecnología heat pipe, que permite un aprovechamiento más eficiente de la radiación solar disponible en la zona e indirectamente potencializar la producción en periodos de bajas temperaturas durante todo el año.

**Figura 3-14:** Comportamiento de la temperatura en el ambiente exterior y en el interior de los invernaderos IC y ISC

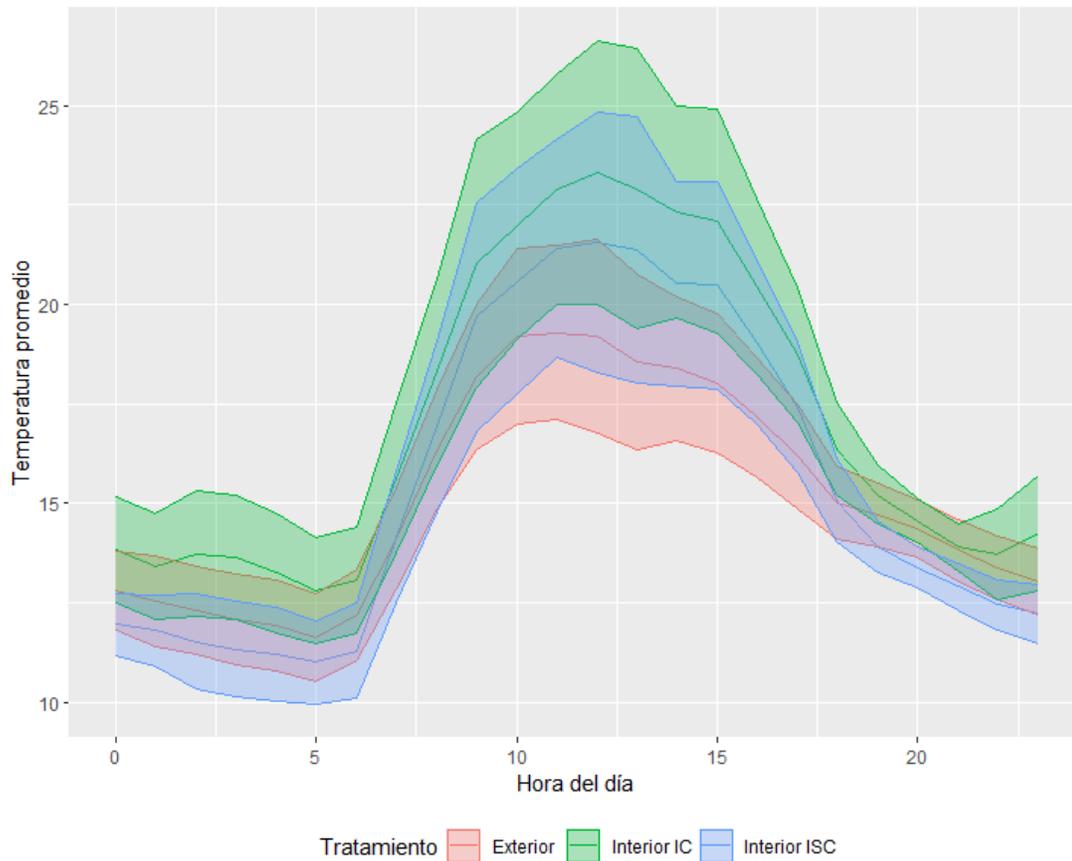


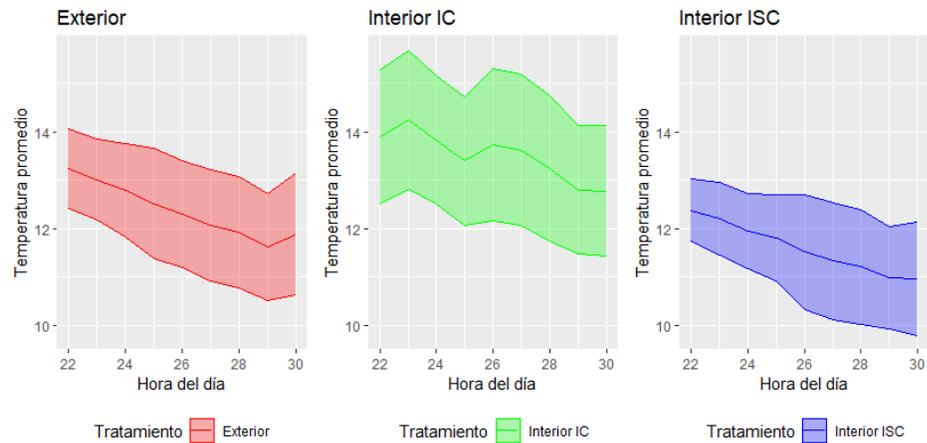
Nombre de la fuente: Elaboración propia

En la **Figura 3-15** se puede observar el comportamiento de la temperatura en el ambiente exterior y en los invernaderos IC y ISC, en términos generales, esta variable muestra un patrón donde la temperatura alcanza su punto máximo alrededor del mediodía y su punto

mínimo durante la madrugada, lo cual es típico en los invernaderos establecidos en la sabana de Bogotá (Villagrán & Bojacá, 2019c). El invernadero IC presenta mayores valores tanto para el período diurno como para el período nocturno en comparación con los ambientes exterior e invernadero ISC. Numéricamente, los resultados muestran que para el período diurno, la temperatura media alcanzó un valor promedio de  $17.3 \pm 2.6$  °C en el ambiente exterior, mientras que en el invernadero ISC fue de  $18.8 \pm 3.8$  °C y en el invernadero IC de  $20.4 \pm 3.7$  °C. En el período nocturno, la temperatura media fue de  $13.1 \pm 1.2$  °C en el ambiente exterior, de  $12.5 \pm 1.3$  °C en el invernadero ISC y de  $14.3 \pm 1.2$  °C en el invernadero IC.

**Figura 3-15:** Día promedio con las variaciones presentadas en 21 días



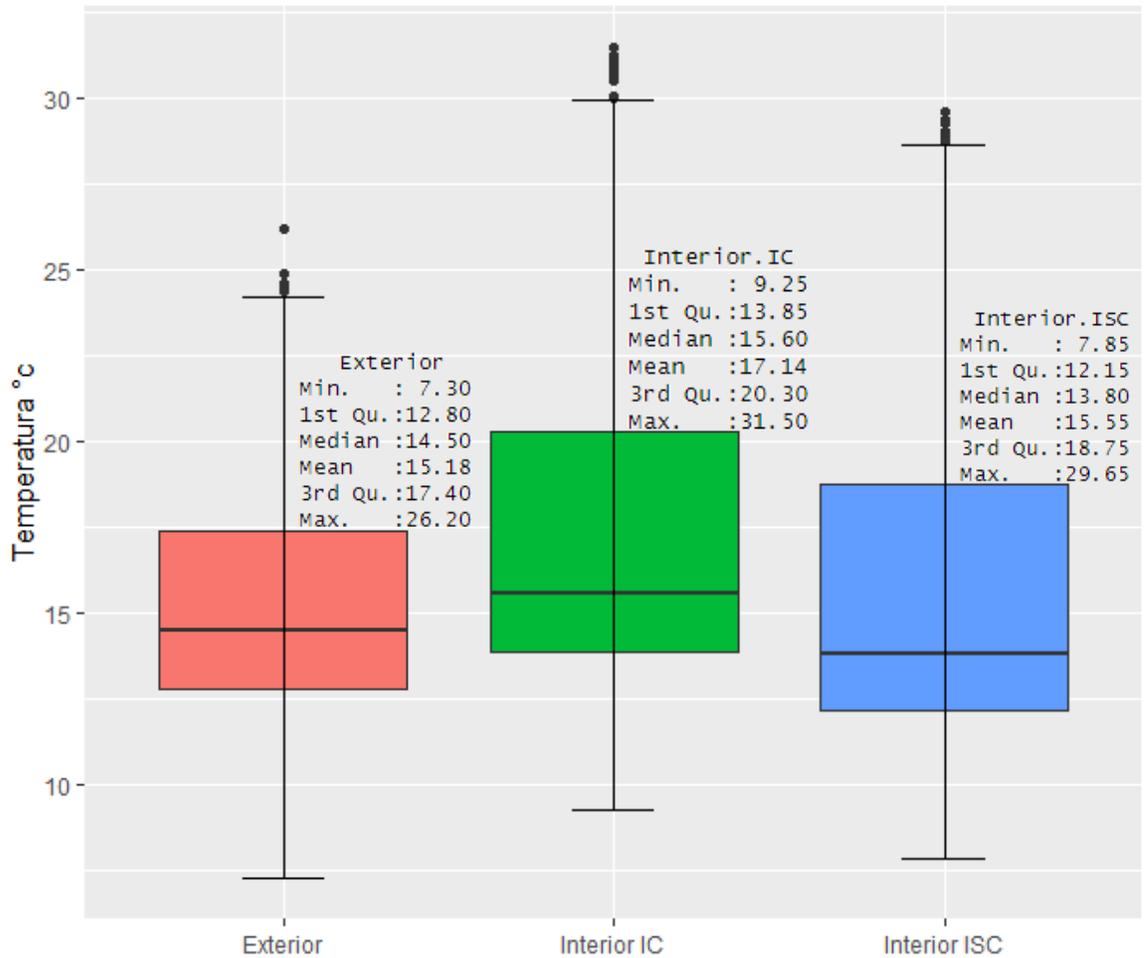


Nombre de la fuente: Elaboración propia

Por lo tanto, el sistema de calefacción permite alcanzar una mayor temperatura en el invernadero IC en un 8.5%, 6.2% y 10.1% para la temperatura media, máxima y mínima, respectivamente, en comparación con el valor obtenido en el invernadero ISC.

El resumen descriptivo de los datos de temperatura presentado en la **Figura 3-16** muestra que la temperatura mínima registrada para el exterior fue de 7.30 °C, mientras que para el invernadero con sistema y sin sistema fueron de 9.25 °C y 7.85 °C respectivamente. Estos valores indican que todas las condiciones presentaron temperaturas relativamente bajas en su valor mínimo, aunque el invernadero con sistema ofrece una mejor condición.

**Figura 3-16:** Resumen descriptivo de los datos de temperatura del exterior y del interior de IC e ISC



Nombre de la fuente: Elaboración propia

En el primer cuartil, representando el 25% de los datos, se registraron temperaturas de 12.80 °C en el exterior, 13.85 °C en el invernadero IC y 12.15 °C en el ISC. Se destaca que los valores más bajos de temperatura se mantuvieron en una franja similar para todas las condiciones, sugiriendo consistencia en estas condiciones.

La mediana, que refleja el valor central en los datos ordenados, fue de 14.50 °C para el exterior, 15.60 °C para el invernadero IC y 13.80 °C para el ISC. Estos datos indican que la mayoría de las observaciones se agruparon alrededor de estos valores en cada condición, proporcionando un panorama claro de la distribución central.

Calculada como la suma de todas las temperaturas dividida por el número de observaciones, la media fue de 15.18 °C para el exterior, 17.14 °C para el invernadero IC y 15.55 °C para el ISC. Estos valores promedio ofrecen una visión general de los niveles promedio en cada condición, complementando la comprensión de la distribución.

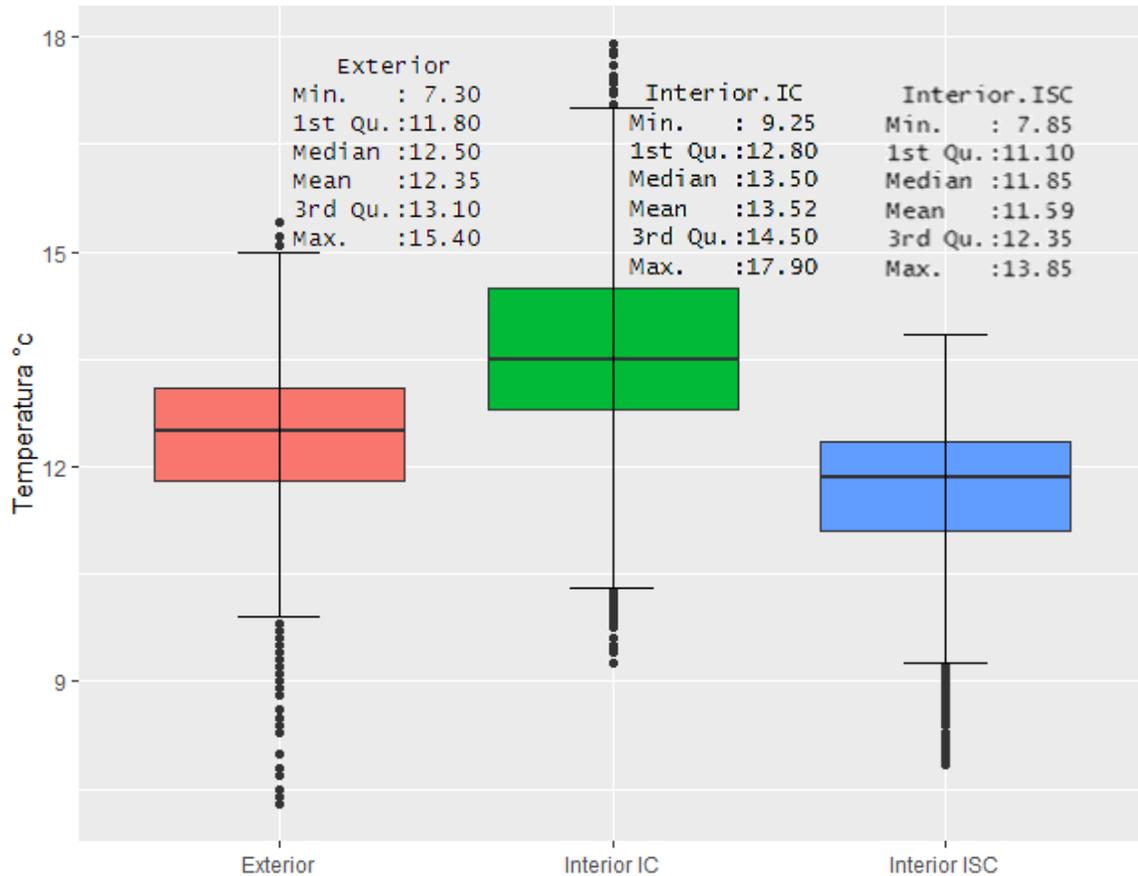
En el tercer cuartil, abarcando el 75% de los datos, se registraron temperaturas de 17.40 °C en el exterior, 20.30 °C en el invernadero IC y 18.75 °C en el ISC. Estos resultados señalan que los valores más altos de temperatura fueron mayores para el invernadero IC en comparación con el ISC y el exterior, proporcionando una perspectiva sobre la variabilidad de temperaturas.

La temperatura máxima registrada fue de 26.20 °C para el exterior, 31.50 °C para el invernadero IC y 29.65 °C para el ISC. Estos datos demuestran que, en las condiciones del IC y el ISC, se alcanzaron temperaturas más altas en comparación con el exterior, resaltando las diferencias en los extremos térmicos.

En resumen, al analizar los resultados, se destaca que el invernadero IC y el ISC presentaron temperaturas más altas en promedio en comparación con el exterior. Además, las variaciones en la temperatura entre el primer y tercer cuartil fueron más amplias para el IC y el ISC, especialmente durante el periodo diurno, reflejando el efecto de la pantalla térmica en el aumento de temperatura en el IC. Estos hallazgos sugieren que los invernaderos pueden haber experimentado condiciones ambientales o de control más favorables en términos de temperatura en comparación con el exterior.

La **Figura 3-17** muestra de manera visual los valores mínimos, primer cuartil, mediana, media, tercer cuartil y máximos de las temperaturas registradas en cada espacio durante el periodo nocturno, cuando se activó periódicamente el sistema de calefacción. Para el espacio exterior, se observaron temperaturas mínimas de 7.30 °C, una mediana de 12.50 °C y temperaturas máximas de 15.40 °C, con una temperatura promedio durante este período de aproximadamente 12.35 °C.

**Figura 3-17:** Resumen descriptivo de los datos de temperatura exterior, invernadero IC e invernadero ISC en el periodo entre las 10:30 pm y las 6:30 am



Nombre de la fuente: Elaboración propia

En el invernadero IC, las temperaturas oscilaron entre 9.25 °C y 17.90 °C. La mediana de temperatura fue de 13.50 °C y la temperatura media se registró en alrededor de 13.52 °C. Por otro lado, en el invernadero ISC, las temperaturas variaron desde 7.85 °C hasta 13.85 °C. La mediana de temperatura fue de 11.85 °C, mientras que la temperatura promedio se mantuvo en aproximadamente 11.59 °C.

Los valores de los cuartiles (primer cuartil y tercer cuartil) indican la dispersión de las temperaturas, mientras que la media y la mediana ofrecen una visión de la tendencia central de los datos.

Con la prueba de Anderson-Darling se descartó que exista normalidad en los datos del día promedio en las tres series, aunque cumplen con el supuesto de homocedasticidad, así

mismo, se analizaron los datos como series de tiempo y aunque sus observaciones promediadas por hora y tratamiento no rechazaron el supuesto de normalidad, la homogeneidad de las varianzas se vio comprometida, por lo que se determinó el coeficiente lambda con el fin de corregir la normalidad, lo cual fue posible y permitió un análisis Anova sobre los datos transformados, así como una prueba múltiple Tukey para las tres (3) parejas de tratamientos y se verificó el cumplimiento de los supuestos sobre los residuos (**Figura 3-18** y **Figura 3-19**).

**Figura 3-18:** Resultados de las pruebas de normalidad y homogeneidad de varianzas en las series de datos completas

```

Tratamiento  Anderson_Darling_Test
<chr>          <dbl>
Exterior      0.0243
Interior IC   0.000350
Interior ISC  0.00128

Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = median)
Df F value Pr(>F)
group 2  1.9178 0.1547
69

Grupo          Anderson_Darling_Test_Ts
<chr>          <dbl>
Exterior      0.903
Interior IC   0.495
Interior ISC  0.280

Bartlett test of homogeneity of variances

data: Promedio_Ts by Grupo
Bartlett's K-squared = 7.2022, df = 2, p-value = 0.02729
Tratamiento  Anderson_Darling_Test_Transformed
<chr>          <dbl>
Exterior      0.706
Interior IC   0.769
Interior ISC  0.612
Bartlett test of homogeneity of variances

data: Promedio_Transformed by Tratamiento
Bartlett's K-squared = 2.5875, df = 2, p-value = 0.2742

```

Nombre de la fuente: Elaboración propia

La falta de normalidad y homogeneidad sugieren el uso de una prueba no paramétrica como la prueba de Kruskal-Wallis y pruebas post hoc para comparar las parejas posibles como la prueba de Wilcoxon con el ajuste de p-valores mediante el método de Bonferroni (**Figura 3-19**).

**Figura 3-19:** Resultados de la evaluación de diferencias significativas en las series de datos completas

```

Kruskal-Wallis rank sum test

data: Promedio by Tratamiento
Kruskal-Wallis chi-squared = 4.5744, df = 2, p-value = 0.1016

Kruskal-Wallis rank sum test

data: Valor by Grupo
Kruskal-Wallis chi-squared = 69.048, df = 2, p-value = 1.015e-15

Pairwise comparisons using Wilcoxon rank sum test with continuity correction

data: data_series$Valor and data_series$Grupo

      Exterior Interior IC
Interior IC 1.3e-12 -
Interior ISC 1      3.4e-12

P value adjustment method: bonferroni

Tukey multiple comparisons of means
 95% family-wise confidence level

Fit: aov(formula = Promedio_Transformed ~ Tratamiento, data = promedios_transformed)

$Tratamiento
              diff          lwr          upr          p adj
Interior IC-Exterior    0.0065983199  0.004526296  0.008670344  0.0000000
Interior ISC-Exterior  -0.0006469376 -0.002718962  0.001425087  0.7359208
Interior ISC-Interior IC -0.0072452575 -0.009317282 -0.005173233  0.0000000

```

Nombre de la fuente: Elaboración propia

Los resultados presentados en la **Figura 3-19** evidencian no se encontraron diferencias significativas al comparar el día promedio de cada tratamiento, sin embargo, al comparar las series de tiempo completas, se evidenció que existen diferencias significativas entre el invernadero IC con respecto al exterior y al invernadero ISC, así mismo, no se evidencian diferencias significativas entre el invernadero ISC y el exterior, corroborado con el análisis Anova a las series transformadas.

Para las series de datos del periodo nocturno en el cual se activó periódicamente el sistema de calefacción se usó de Shapiro-Wilk de acuerdo con la cantidad de datos y arrojó que no se descarta que la normalidad, si mismo con la prueba de homogeneidad de varianza no se rechazó este supuesto, por lo que no hubo necesidad de realizar transformaciones

y permitió el uso de Anova y Tukey, el cual indicó que existen diferencias significativas entre los tres (3) tratamiento y entre las tres (3) posibles parejas, con un nivel de significancia de 0.05 (**Figura 3-20**).

**Figura 3-20:** Resultados de las pruebas de normalidad, homogeneidad de varianzas, Anova y Tukey en las series en el periodo entre las 10:30 pm y las 6:30 am

```

Tratamiento shapiro_Test
<chr> <dbl>
Exterior 0.762
Interior IC 0.659
Interior ISC 0.552

```

```

Bartlett test of homogeneity of variances

data: Promedio by Tratamiento
Bartlett's K-squared = 0.086736, df = 2, p-value = 0.9576

```

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Tratamiento	2	16.662	8.331	30.19	2.81e-07 ***
Residuals	24	6.624	0.276		

```

---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Tukey multiple comparisons of means
95% family-wise confidence level

Fit: aov(formula = Promedio ~ Tratamiento, data = promedios)

$Tratamiento
              diff          lwr          upr          p adj
Interior IC-Exterior  1.1341410  0.5156831  1.7525989  0.0003443
Interior ISC-Exterior -0.7791464 -1.3976043 -0.1606885  0.0117345
Interior ISC-Interior IC -1.9132874 -2.5317453 -1.2948295  0.0000002

```

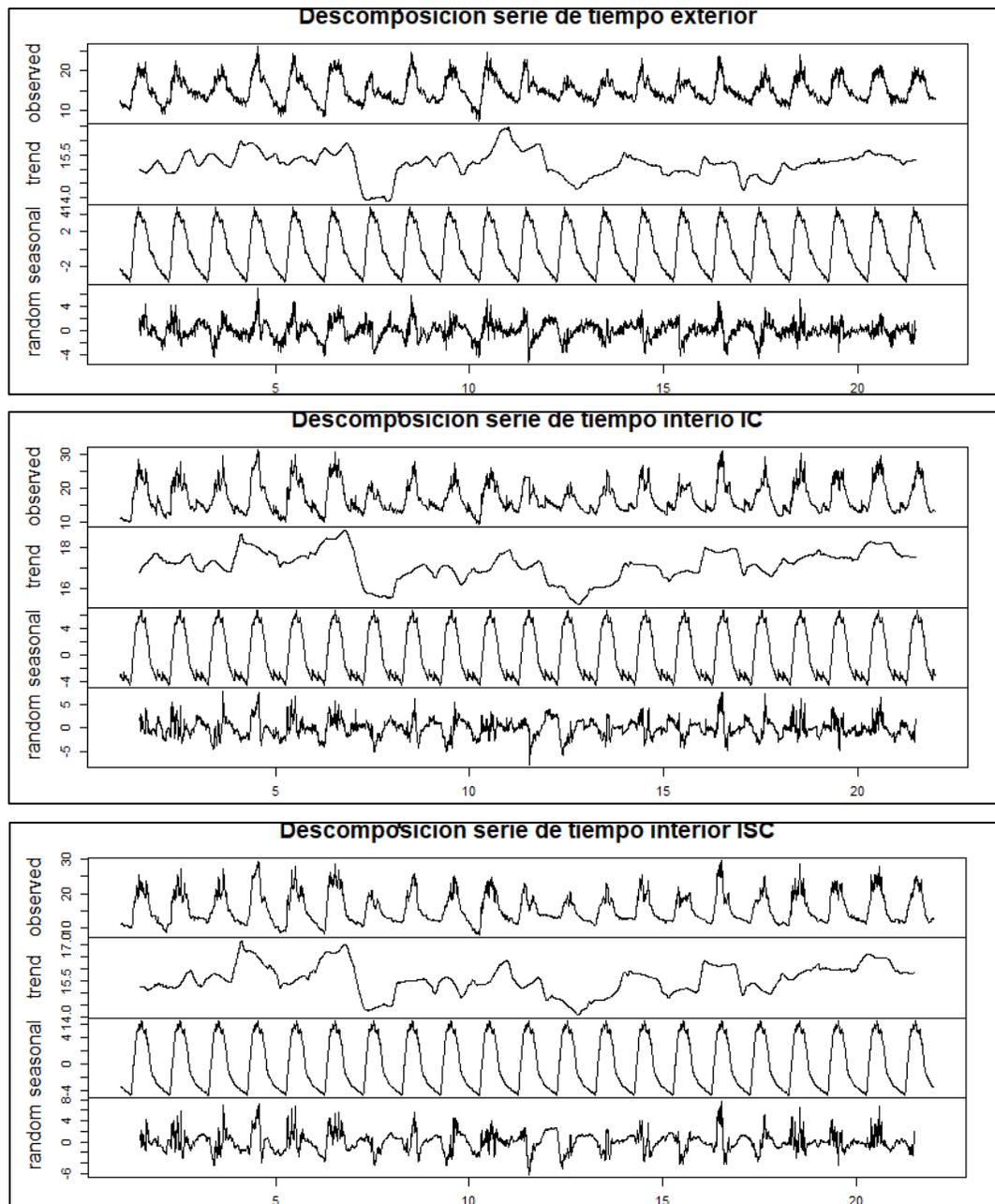
Nombre de la fuente: Elaboración propia

De acuerdo con la naturaleza de los datos y el comportamiento observado en las gráficas se estableció que la temperatura varía en función de la hora del día, los datos corresponden a una serie de tiempo al ser una secuencia de observaciones tomadas en diferentes momentos a lo largo del tiempo, con intervalos regulares de cinco (5) minutos, por lo cual se evaluó la estacionariedad con la prueba Dickey-Fuller, evidenciando la hipótesis alternativa de estacionariedad, también se identificó la estacionalidad diaria (**Figura 3-21**) y la alta autocorrelación de cada una de las series de tiempo (**Figura 3-22**).

En la **Figura 3-21** se observa la descomposición de las series de tiempo, considerando la tendencia, la cual no está completamente definida en las tres series de tiempo, la

estacionalidad, evidenciando su presencia e importancia en estas series y el ruido, aunque con la prueba Ljung-Box se demostró que existe autocorrelación significativa, indicando que no corresponden a ruido blanco y que estos valores deben considerarse en el modelo.

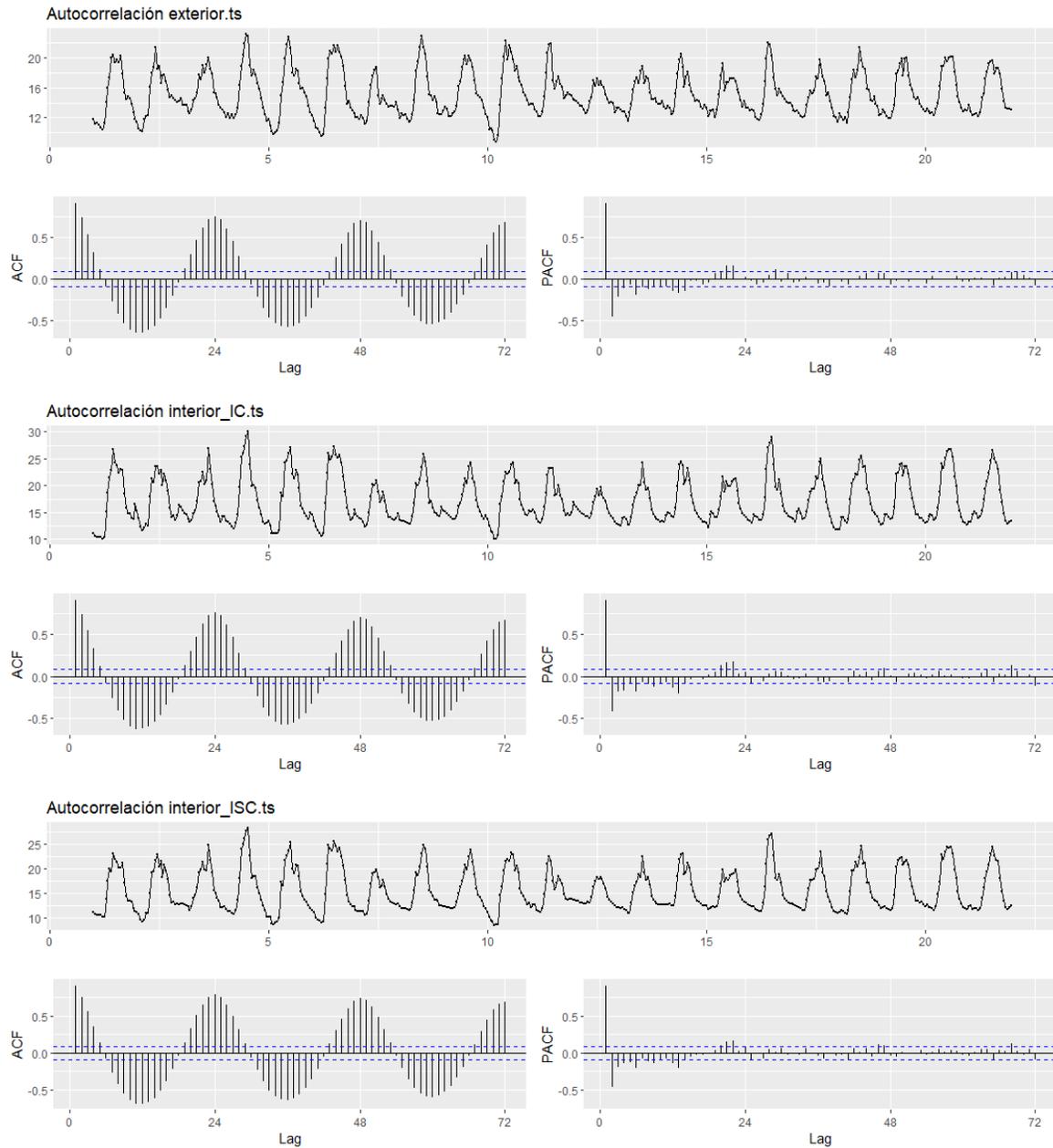
**Figura 3-21:** Descomposición de las series de tiempo



Nombre de la fuente: Elaboración propia

Así mismo, en la **Figura 3-22** se presentan los gráficos ACF que evidencian la alta autocorrelación y estacionalidad definida en las tres series de tiempo.

**Figura 3-22:** Gráficos de autocorrelación de las series exterior, interior IC e interior ISC



Nombre de la fuente: Elaboración propia

La implementación de estos sistemas permite aumentar la temperatura nocturna en el interior de un invernadero en hasta 5°C o incluso reducir la temperatura en el día en hasta

3 °C, sin embargo, la eficiencia de cada sistema debe ser evaluada en función del contexto local donde se pretende implementar (Reyes-Rosas et al., 2017; Villagrán & Bojacá, 2019c).

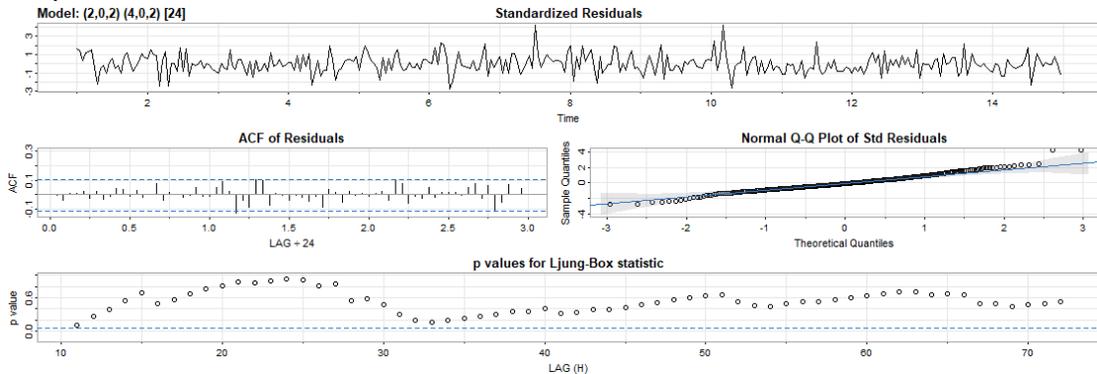
### **3.4.2. Modelado y predicción de la temperatura en diversos ambientes de invernaderos: análisis de modelos SARIMA, diagnóstico, validación y comparación con modelos de alisado exponencial estacional**

Estas características sugieren el uso de un modelo SARIMA y de acuerdo con su característica estacional no es necesario realizar diferenciación para determinar los parámetros adecuados para el modelo SARIMA ( $p, d, q, P, D, Q$  y  $S$ ), siendo necesario dividir los datos en una sección de entrenamiento para la formulación del modelo, catorce (14) días y en datos de validación de siete (7) días, además de realizar pruebas de diagnóstico que incluyen el análisis de los residuos para verificar si son ruido blanco, el cumplimiento de los supuestos del modelo y la comparación de diferentes modelos SARIMA utilizando métricas de ajuste como el AIC (Criterio de información Akaike) o el error cuadrático medio, con el fin de evaluar la calidad del modelo y su capacidad para hacer pronósticos precisos, también se incluyó la comparación con otro tipo de modelo, usando el modelo de alisado exponencial estacional.

Dicho procedimiento conlleva a seleccionar por el menor valor de  $AIC = -2759.89$ , un modelo SARIMA  $(2,0,2)(4,0,2)[24]$  para la serie de datos exterior, el diagnóstico presentado en la **Figura 3-23** evidencia que el modelo está capturando adecuadamente la variabilidad de los datos, los residuos no tienen autocorrelación, lo que es deseable en un buen modelo pues indica que el modelo está capturando correctamente la estructura de la serie de tiempo y con la prueba Anderson-Darling, no se rechazó la normalidad de estos, al igual que con la prueba studentized Breusch-Pagan no se rechazó la homocedasticidad. En general el modelo es adecuado para los datos de temperatura exterior y los residuos se comportan de manera satisfactoria como ruido blanco, cumpliendo con las suposiciones

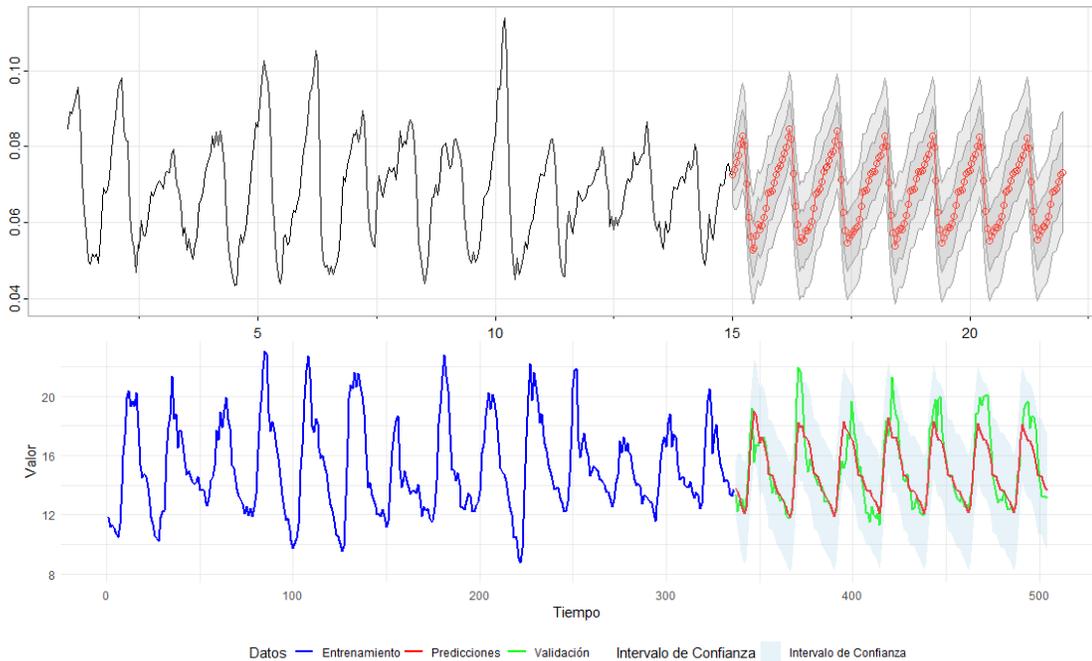
del modelo, sus predicciones se presentan en la **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, adicionalmente en la **Figura 3-25** se presentan las predicciones del modelo de alisado exponencial estacional, no seleccionado por poseer un mayor valor de AIC = -1700.804.

**Figura 3-23:** Diagnostico del modelo SARIMA (2,0,2)(4,0,2)[24] para la serie de datos de temperatura del exterior



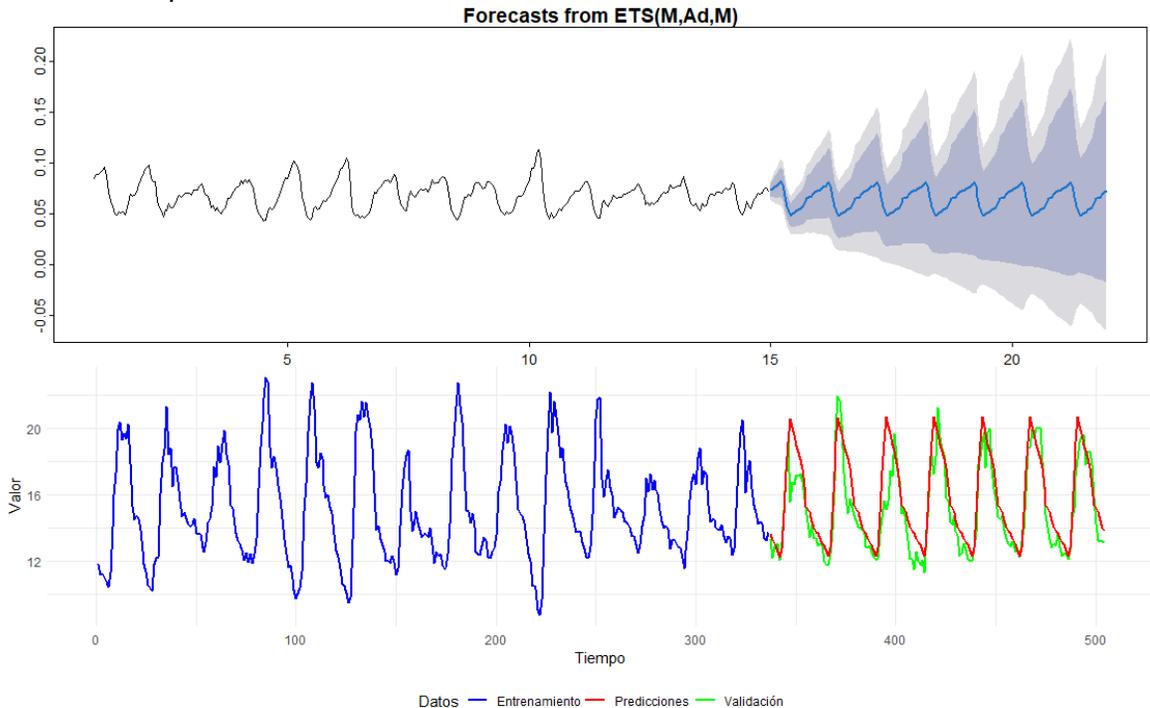
Nombre de la fuente: Elaboración propia

**Figura 3-24:** Predicciones del modelo SARIMA (2,0,2)(4,0,2)[24] ] para la serie de datos de temperatura del exterior



Nombre de la fuente: Elaboración propia

**Figura 3-25:** Predicciones del modelo de alisado exponencial estacional para la serie de datos de temperatura del exterior



Nombre de la fuente: Elaboración propia

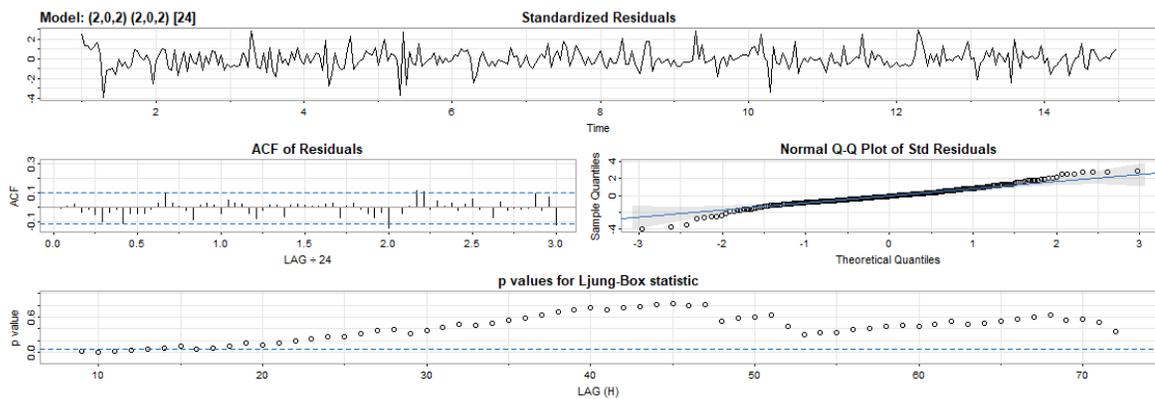
En cuanto a la validación del modelo SARIMA, el valor medio de los errores es aproximadamente 0.1918, lo que indica que, en promedio, las predicciones están bastante cerca de los valores reales, el error cuadrático medio (MSE) es de aproximadamente 1.6373, lo que indica que el modelo tiene un buen ajuste general a los datos, pero todavía hay cierto error en las predicciones, el error absoluto medio (MAE) es de aproximadamente 0.8955, lo que implica que, en promedio, las predicciones difieren de los valores reales en alrededor de 0.8955 unidades y el error porcentual absoluto medio (MAPE) es de aproximadamente 5.4978%, lo que indica que, en promedio, las predicciones tienen un error del 5.4978% en comparación con los valores reales.

Así mismo, para la serie Interior IC con un valor de AIC = -2667.178 para el modelo SARIMA (2,0,2)(2,0,2)[24] para la serie de datos interior IC, el diagnostico presentado en la

**Figura 3-26** evidencia que el modelo está capturando adecuadamente la variabilidad de los datos, los residuos no tienen autocorrelación, entonces el modelo está capturando

correctamente la estructura de la serie de tiempo y con la prueba Anderson-Darling, no se rechazó la normalidad de estos, al igual que con la prueba studentized Breusch-Pagan no se rechazó la homocedasticidad. En general el modelo es adecuado para los datos de temperatura interior IC y los residuos se comportan de manera satisfactoria como ruido blanco, cumpliendo con las suposiciones del modelo, sus predicciones se presentan en la **Figura 3-27**, adicionalmente en la **Figura 3-28** se presentan las predicciones del modelo de alisado exponencial estacional, no seleccionado por poseer un mayor valor de AIC = -1644.953.

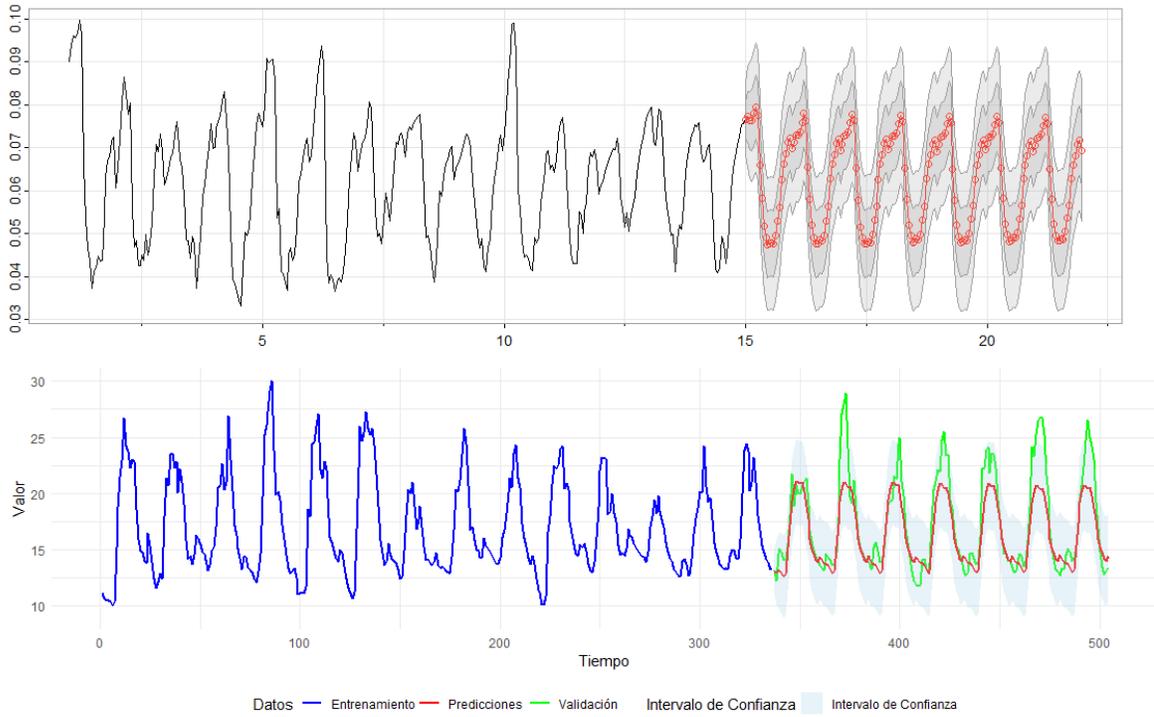
**Figura 3-26:** Diagnostico del modelo SARIMA (2,0,2)(2,0,2)[24] para la serie de datos de temperatura del interior del invernadero con sistema de calefacción



Nombre de la fuente: Elaboración propia

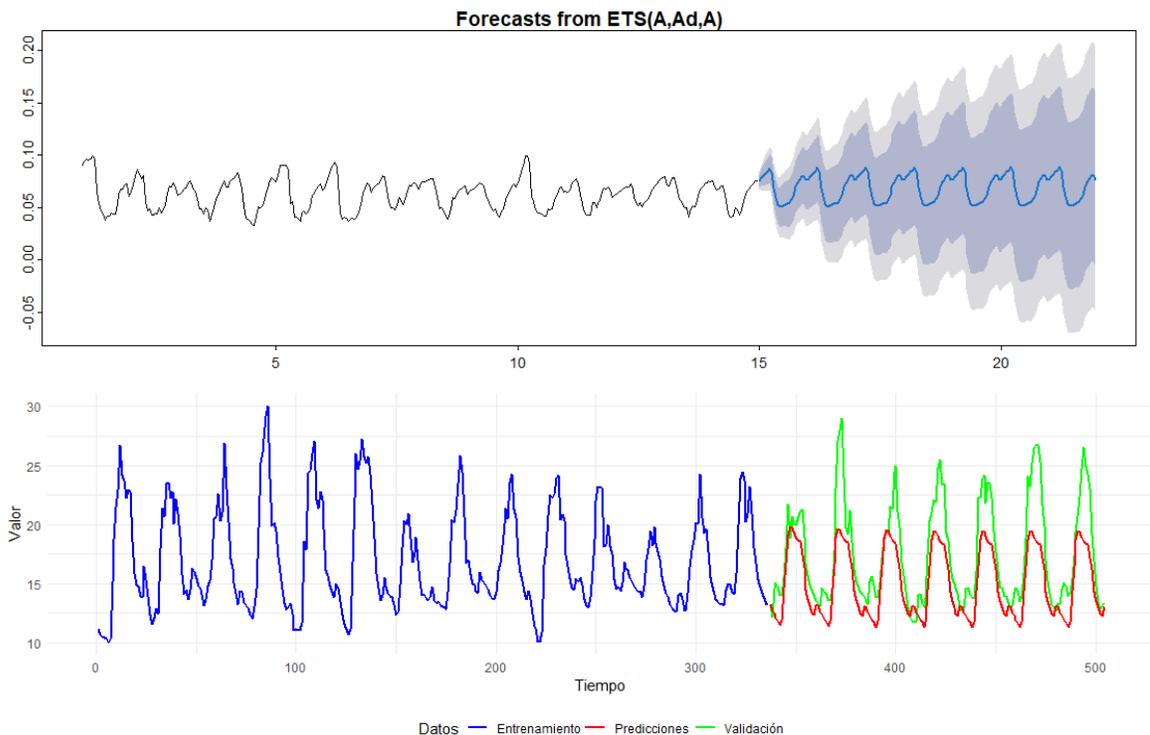
En cuanto a la validación del modelo SARIMA, el valor medio de los errores es aproximadamente 1.0677, lo que indica que las predicciones tienen un sesgo promedio de aproximadamente 1.0677 unidades en comparación con los valores reales, el error cuadrático medio (MSE) es de aproximadamente 5.0588, lo que indica que el modelo tiene un ajuste aceptable, pero todavía hay un error significativo en las predicciones, el error absoluto medio (MAE) es de aproximadamente 1.5667, lo que implica que, en promedio, las predicciones difieren de los valores reales en alrededor de 1.5667 unidades y el error porcentual absoluto medio (MAPE) es de aproximadamente 8.0252%, lo que indica que, en promedio, las predicciones tienen un error del 8.0252% en comparación con los valores reales.

**Figura 3-27:** Predicciones del modelo SARIMA (2,0,2)(2,0,2)[24] para la serie de datos de temperatura del interior del invernadero con sistema de calefacción



Nombre de la fuente: Elaboración propia

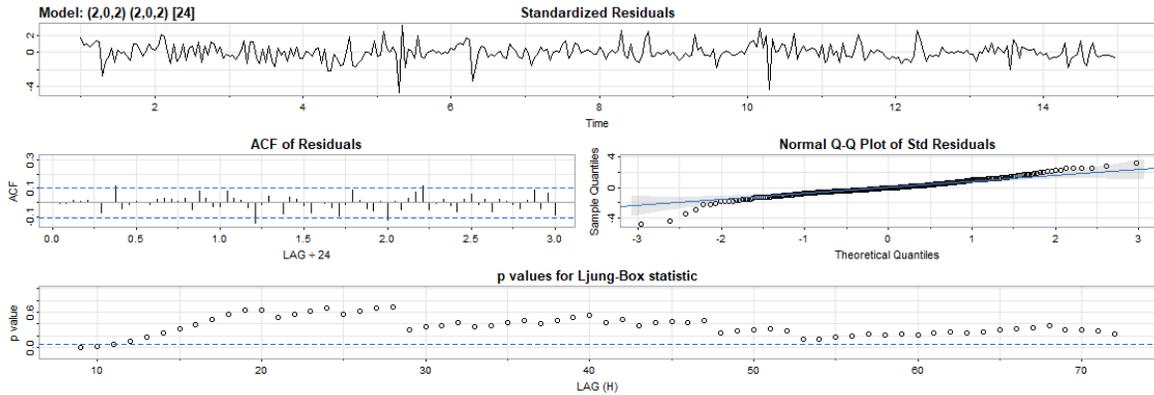
**Figura 3-28:** Predicciones del modelo de alisado exponencial estacional para la serie de datos de temperatura del interior del invernadero con sistema de calefacción



Nombre de la fuente: Elaboración propia

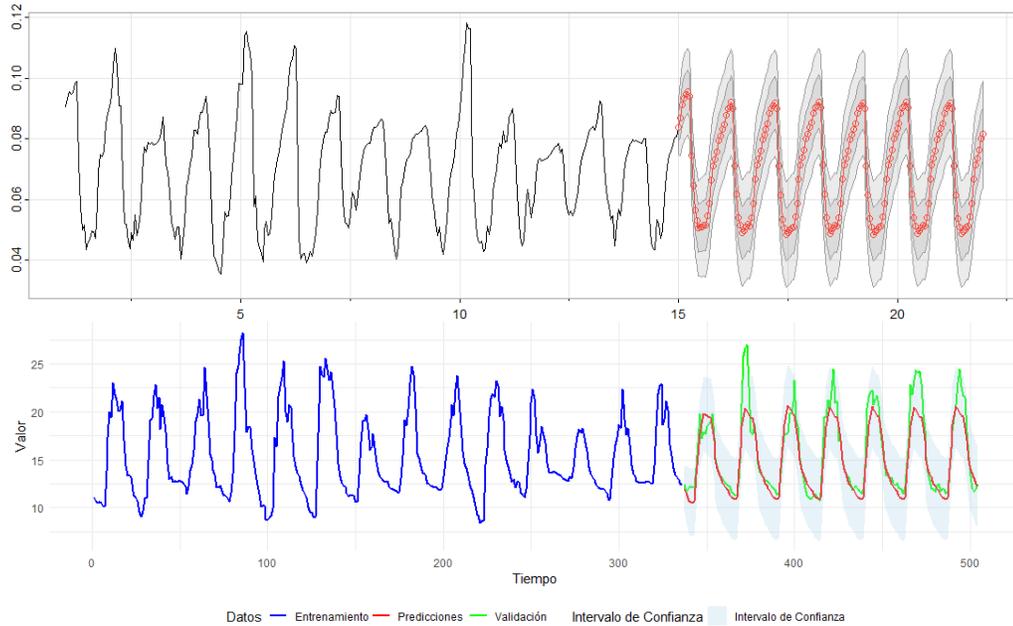
Finalmente, para el invernadero ISC se ajustó un modelo SARIMA (2,0,2)(2,0,2)[24] con un valor de AIC= -2604.79, su diagnóstico presentado en la **Figura 3-29** evidencia que el modelo está capturando adecuadamente la variabilidad de los datos, los residuos no tienen autocorrelación, entonces el modelo está capturando correctamente la estructura de la serie de tiempo y con la prueba Anderson-Darling, no se rechazó la normalidad de estos, al igual que con la prueba studentized Breusch-Pagan no se rechazó la homocedasticidad. En general el modelo es adecuado para los datos de temperatura interior ISC y los residuos se comportan de manera satisfactoria como ruido blanco, cumpliendo con las suposiciones del modelo, sus predicciones se presentan en **Figura 3-30**, adicionalmente en la **Figura 3-31** se presentan las predicciones del modelo de alisado exponencial estacional, no seleccionado por poseer un mayor valor de AIC = -1570.279.

**Figura 3-29:** Diagnostico del modelo SARIMA (2,0,2)(2,0,2)[24] para la serie de datos de temperatura del interior del invernadero sin sistema de calefacción (ISC)



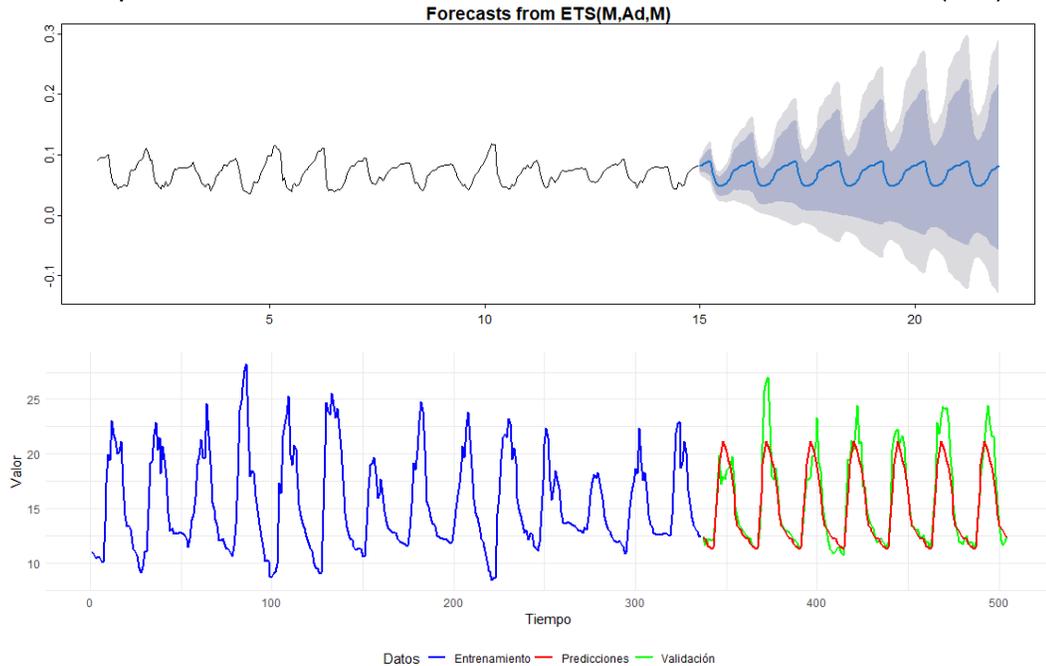
Nombre de la fuente: Elaboración propia

**Figura 3-30:** Predicciones del modelo SARIMA (2,0,2)(2,0,2)[24] para la serie de datos de temperatura del interior del invernadero sin sistema de calefacción (ISC)



Nombre de la fuente: Elaboración propia

**Figura 3-31:** Predicciones del modelo de alisado exponencial estacional para la serie de datos de temperatura del interior del invernadero sin sistema de calefacción (ISC)



Nombre de la fuente: Elaboración propia

En cuanto a la validación del modelo SARIMA la media de los errores es 0.695355. Esto indica que, en promedio, las predicciones del modelo están desviadas por aproximadamente 0.70 unidades con respecto a los valores reales. Una media cercana a cero sugiere que el modelo está haciendo predicciones relativamente cercanas al promedio de los datos reales, el error cuadrático medio (MSE) es 2.969481 mide el promedio de los cuadrados de los errores entre las predicciones y los valores reales. Un MSE más bajo indica que el modelo tiene mejores predicciones, ya que los errores son más pequeños, el error absoluto medio (MAE) es 1.159041 y mide el promedio de las magnitudes de los errores entre las predicciones y los valores reales. Al igual que el MSE, un MAE más bajo indica que el modelo tiene mejores predicciones, ya que los errores son más pequeños y el error porcentual absoluto medio (MAPE) es 6.552702, lo que significa que, en promedio, el modelo tiene un error absoluto del 6.55% en las predicciones en comparación con los valores reales. Un MAPE más bajo indica un mejor ajuste del modelo a los datos. En general, estos resultados indican que el modelo SARIMA tiene un desempeño aceptable en la validación, ya que los errores no son demasiado altos y están en línea con el tamaño de los datos, coincidiendo con lo concluido por Carrillo, (2023) y por Chinlli, (2021) en sus predicciones de temperatura con modelos Sarima.

## **4. Conclusiones**

### **4.1. Análisis estado del arte**

Esta investigación contribuye al conocimiento científico y a la aplicación de tecnologías de climatización en invernaderos.

La implementación de sistemas sostenibles mejora la eficiencia de la producción agrícola, reduce las emisiones y promueve prácticas respetuosas con el medio ambiente.

Este estudio sienta las bases para futuras investigaciones en climatización sostenible, fomentando la agricultura económicamente viable y ecológica.

### **4.2. Identificación de la demanda energética**

Se destaca la importancia de una descripción detallada y específica del invernadero, incluyendo su estructura, características técnicas y propiedades de los materiales.

Las consideraciones para el sistema de climatización priorizan la accesibilidad para pequeños agricultores y la mejora de la producción agrícola.

El modelo dinámico de balance de energía proporciona una herramienta eficaz para calcular la demanda energética durante heladas, contribuyendo a la gestión eficiente del invernadero.

Los resultados indican una estimación del requerimiento térmico durante condiciones de helada, brindando información valiosa para la planificación y optimización de sistemas de climatización en invernaderos.

### **4.3. Diseño mediante el uso de CFD**

La implementación de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) fue esencial para analizar y diseñar el sistema de climatización.

El CFD brinda representaciones precisas del intercambio de calor, contribuyendo a decisiones informadas y optimización del rendimiento térmico.

La combinación de mediciones experimentales y simulaciones CFD, permiten mejorar la eficiencia energética y promueve enfoque sostenible en la producción agrícola.

Se recomienda el material Oxy pex por su capacidad para suministrar el calor de manera eficiente, homogénea y conservar energía.

En términos de simulación, variaciones de temperatura y flujo de aire identificadas, la comparativa entre el modelo CFD y los datos experimentales demostró errores mínimos y aceptables, con un máximo de 3.41 °C y un promedio de 0.88 °C.

### **4.4. Evaluación experimental**

La evaluación del sistema de climatización en el invernadero colombiano demostró resultados satisfactorios, generando temperaturas medias en un 13.1% más altas que en un invernadero sin este sistema. Esta estrategia se presenta como una opción sostenible para mejorar las condiciones microclimáticas nocturnas.

El análisis estadístico proporcionó una comprensión integral del comportamiento térmico en los invernaderos IC e ISC, permitiendo comparaciones significativas y la predicción de tendencias de temperatura mediante modelos estadísticos.

La evaluación experimental respalda la eficacia del sistema de calefacción implementado en el invernadero IC, destacando su capacidad para mantener condiciones térmicas más favorables, lo que puede traducirse en un ambiente propicio para el crecimiento de cultivos.

## **5.Recomendaciones**

### **5.1. Estado del arte**

Continuar investigando y promover la aplicación de sistemas de climatización en invernaderos, considerando la colaboración multidisciplinaria para impulsar avances significativos.

Incorporar energías renovables, como solar, geotérmica y eólica, en sistemas de climatización para reducir la dependencia de combustibles fósiles y promover la sostenibilidad.

Promover la difusión de resultados de investigación en revistas de alto impacto y multidisciplinarias para compartir conocimientos y facilitar la colaboración en proyectos futuros

### **5.2. Identificación de la demanda energética**

Mejorar la precisión y eficiencia de los modelos de balance de energía, priorizando la calibración y validación para pronósticos más confiables de condiciones internas de invernaderos.

extender el análisis del balance de energía al incorporar un balance de masa. Este enfoque permitirá complementar el modelo de demanda con información sobre la humedad relativa y los niveles de CO<sub>2</sub>, contribuyendo así a una asignación más eficiente de recursos y a la creación de un entorno óptimo para las plantas en términos de calidad del aire y condiciones hídricas.

Tener en cuenta los diferentes tipos de producción de la zona de estudio al planificar y gestionar los recursos. Esto implica considerar las necesidades específicas de cada tipo de producción y adaptar las condiciones del entorno para favorecer su desarrollo. Integrar estas consideraciones en la gestión de la demanda asegurará una asignación eficiente de recursos y promoverá un entorno propicio para el crecimiento y rendimiento óptimo de las plantas.

### **5.3. Diseño mediante el uso de CFD**

Explorar la integración de tecnologías avanzadas, como CFD, en el diseño y análisis de sistemas de temperatura en invernaderos, para una simulación más precisa del comportamiento térmico y seleccionar adecuadamente los materiales en el sistema de calefacción, considerando la conductividad térmica y capacidad de retención de calor para mejorar la eficiencia.

Evaluar la combinación de diferentes sistemas de climatización, así como la configuración y disposición al interior del invernadero, considerando incluso la opción de enterrar el intercambiador de calor en busca de optimizar la eficiencia del sistema, aprovechando la influencia de la disposición espacial y explorando estrategias innovadoras, para mejorar aún más el rendimiento climático del invernadero.

Incorporar los diferentes tipos de producción existentes en la zona de estudio en el modelo de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD). Esto permitirá capturar de manera más precisa la interacción de estos tipos de producción en el sistema, brindando una representación más completa de las condiciones ambientales. Además, se recomienda considerar las condiciones específicas que favorecen el desarrollo de estas plantas en el entorno, lo que contribuirá a una simulación más precisa y relevante.

Se sugiere enriquecer el análisis del balance de energía en el modelo de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) mediante la inclusión de un balance de masa. Este enfoque permitirá complementar el modelo con información sobre la humedad relativa y los niveles de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), brindando una comprensión más integral de las interacciones en el sistema y su impacto en las condiciones ambientales.

## 5.4. Evaluación experimental

Adaptar el sistema de calefacción al contexto local, considerando condiciones específicas de cada invernadero y ubicación geográfica, fomentar prácticas sostenibles en invernaderos, incluyendo estrategias de eficiencia energética, reciclaje de recursos y gestión adecuada de residuos y promover la difusión de resultados de investigación en revistas de alto impacto y multidisciplinarias para compartir conocimientos y facilitar la colaboración en proyectos futuros.

Establecer un monitoreo constante y ajustes regulares en el sistema de calefacción, respondiendo a las fluctuaciones en la demanda térmica y condiciones climáticas cambiantes.

Integrar los diversos tipos de producción presentes en la zona de estudio en el diseño y ejecución de los experimentos. Esto permitirá evaluar de manera integral cómo interactúan estos tipos de producción en el sistema y proporcionará datos más representativos de las condiciones reales. Asimismo, se recomienda ajustar las condiciones experimentales para reflejar de manera óptima los entornos propicios para el desarrollo de estas plantas, asegurando así resultados más aplicables y significativos.

Ampliar la evaluación del balance de energía mediante la incorporación de un balance de masa. Esto posibilitará la complementación del modelo experimental con datos relativos a la humedad relativa y los niveles de CO<sub>2</sub>. Integrar estas mediciones en el análisis proporcionará una visión más completa de las condiciones ambientales y permitirá una interpretación más precisa de los resultados experimentales.

Adoptar un enfoque integral en el análisis de series de tiempo, considerando diversas la inclusión de variables exógenas para enriquecer el modelo, la realización de análisis de sensibilidad para evaluar la robustez del modelo frente a cambios y la exploración de enfoques alternativos de modelización, para mejorar la calidad del modelo y su rendimiento predictivo.

# A. Anexo: Descripción del sistema de calefacción implementado

El sistema de calefacción se complementa con un panel solar fotovoltaico híbrido monocristalino de 320 W para generar energía eléctrica. Se compone con un colector solar térmico SNP15 con un tanque de almacenamiento de agua de 150 litros, capaz de calentar el agua hasta 80 °C. Para la recirculación del agua caliente a través del piso radiante dentro del invernadero, se utilizó una electrobomba de 1.5 kW. El control de la recirculación de agua se llevó a cabo mediante un programador PLC especialmente estructurado para este sistema de calefacción. Durante el ensayo experimental, el sistema de calefacción se encendía automáticamente durante 1 minuto cada 90 minutos, desde las 22:30 horas hasta las 6:30 horas del día siguiente.

## 1.1. Diseño del colector solar

La eficiencia y funcionalidad de un sistema de climatización, particularmente en lo que respecta al diseño para calentar el agua, es crucial para garantizar un rendimiento óptimo.

En el contexto de la calefacción pasiva, la combinación de una pantalla térmica y una tubería en el suelo representa una estrategia prometedora, sin embargo, es imperativo ajustar el diseño de acuerdo con las condiciones locales, considerando especialmente la capacidad del sistema para hacer frente a situaciones críticas, como las heladas.

Investigaciones previas revelan que un solo colector solar puede resultar insuficiente cuando las temperaturas exteriores descienden por debajo de los 5°C (López et al., 2018). Esta información subraya la necesidad de complementar el sistema, priorizando el calentamiento del agua en la tubería.

En respuesta, se ha implementado un enfoque innovador que incorpora tanto un colector solar (**Figura A-1**) como un panel híbrido. Estos elementos no solo contribuyen al

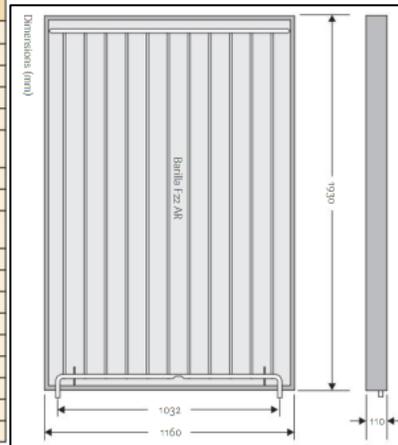
calentamiento térmico del agua, sino que también actúan como generadores de energía fotovoltaica, permitiendo la automatización del sistema y asegurando su auto sustentabilidad al prescindir de fuentes externas de energía. Este enfoque integral busca no solo controlar, sino también mitigar el impacto de las condiciones más adversas, garantizando así un funcionamiento fiable y eficiente del sistema de climatización.

**Figura A-1:** Características de los colectores solares seleccionados



Capacidad	SNP15	SNP 25	SNP 30
Capacidad - Litros	150 Litros	250 Litros	300 Litros
Peso con agua (KG)	225 Kg	345 Kg	410 Kg
Medidas	2mX1,5m	2mX2m	2,3mx2m
Usuarios sugeridos	2 A 3	4 A 5	5 A 8
Numero de tubos	15 Tubos	25 Tubos	30 Tubos
Presión máxima operación	0		
Presión de trabajo	0		
Material de los tubos	Cristal de borosilicato 3,3 Mn		
tamaño del tubo	58 mm x 1800mm		
Diámetro interior/ Exterior	470 mm / 360mm		
Aislamiento térmico	55mm de poliuretano		
Tanque interior	Espesor 0,50 mm acero inoxidable 304		
Tanque exterior	Espesor 0,40 mm acero galvanizado Zincado		
Eficiencia diaria	> 80%		
Resistencia al granizo	Granizo de hasta 25mm		
Conservación del calor	72 Horas		
Controlador (opcional)	Alimentación eléctrica, 110V		
Temperatura diaria de agua caliente	50°C - 70°C		
Orientación	SUR		

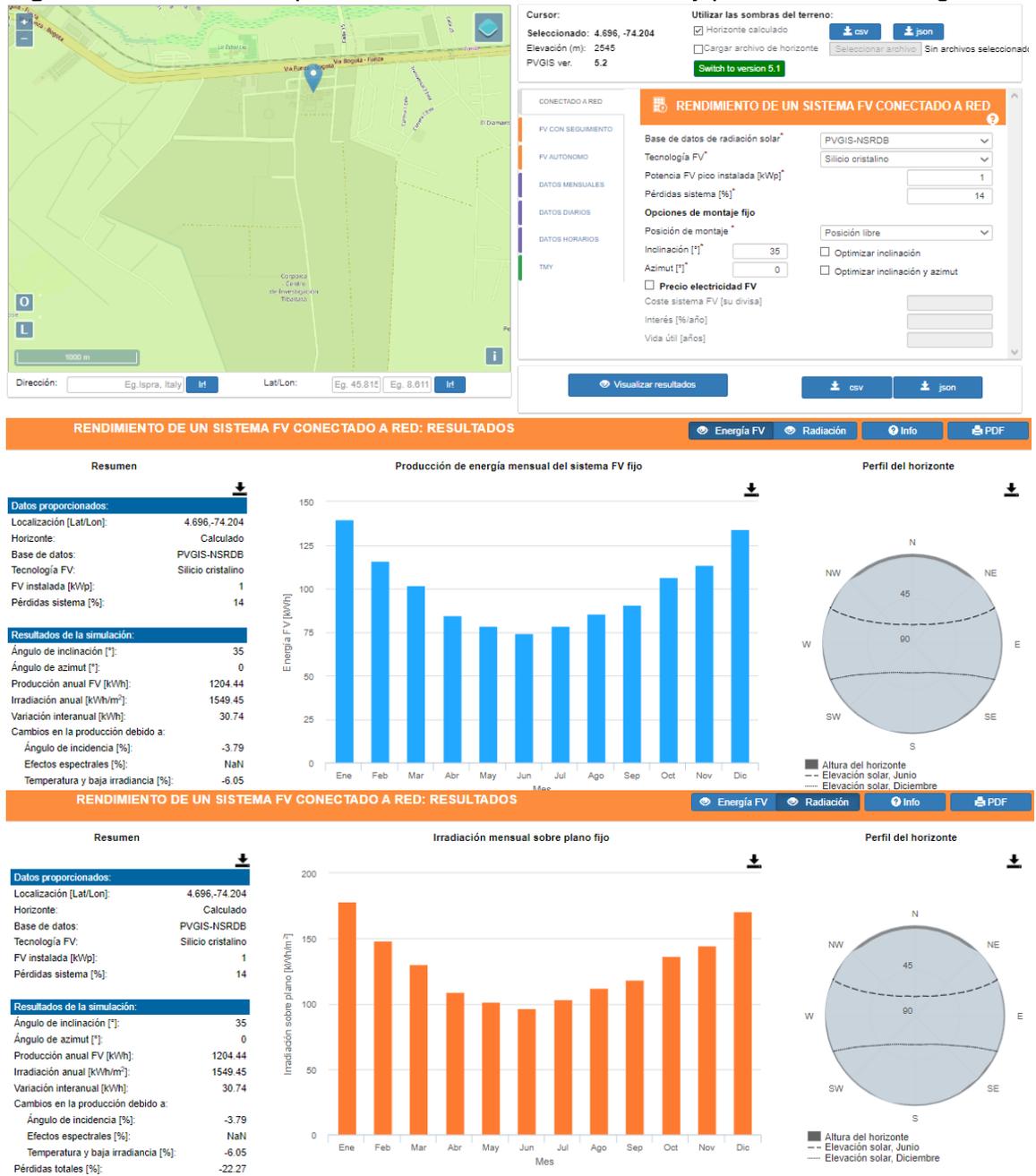
Features	Barilla F2z AR
Total area/aperture area (acc. to EN 12975)	2.24m <sup>2</sup> /2.01m <sup>2</sup>
Dimensions (L x D x H)	1930mm x 1160mm x 110mm
Collector efficiency (ass. to EN 12975)	$\eta_0 = 83.1\%$ ; $a_1 = 3.44 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ ; $a_2 = 0.0176 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^2$
Incident angle modifier ( $50^\circ$ )	$k_{\theta}(50^\circ) = 92\%$ ; $K_{diff} = 84\%$
Annual collector yield (ITW 5m <sup>2</sup> )	499 kWh/m <sup>2</sup>
Collector encasing	Silver or black anodized aluminium frame, aluminium back sheet, stone wool insulation WLG 040 for back side and frame (melting point > 1000°C)
Specific heat capacity	4.6kJ/m <sup>3</sup> K
Glass cover and light transmission	4mm solar safety glass with sunarc® anti reflection surface; $\tau = 96\%$
Absorber	Pipe register absorber: aluminium heat conductor sheet and 12 closely spaced copper pipes, laser fused
Absorber coating	Highly selective vacuum coating, $\alpha = 95\%$ , $\epsilon = 5\%$
Absorber content	1.24 litres
Heat carrier	Barilla Solar Heat Transfer Fluid
Operational pressure	max. 10 bar
Stagnation temperature (acc. to EN 12975)	208°C
Solar sensor	Receptacle, 6mm internal diameter
Collector connections	1/2" M - threaded connection
Certificate/mark	CE-Mark, tests acc. to EN 12975, Solar Keymark Certificate Number 011-7S1580 F
Weight	43kg



Nombre de la fuente: Fichas técnicas de los colectores solares propuestos (Barilla, 2012)

Con base en la ubicación geográfica donde se encuentra instalado el colector solar y utilizando el software PVGIS, es posible obtener información sobre el rendimiento teórico del equipo. Los resultados correspondientes a este diseño se presentan en la **Figura A-2**.

**Figura A-2: Inclinación óptima del colector, radiación solar y producción de energía**



Nombre de la fuente: Sistema de información geográfica fotovoltaica (Comisión Europea, 2022)  
Sin embargo, la energía aprovechable depende de la eficiencia del colector solar y se determina con las siguientes ecuaciones (A-1) y (A-2):

$$\eta = \eta_0 - a_1 \frac{(T_m - T_a)}{G} - a_2 \frac{(T_m - T_a)^2}{G} \quad (\text{A-1})$$

$$Q = \dot{G} * \eta \quad (\text{A-2})$$

Los datos de eficiencia nominal y coeficientes de cada uno de los colectores fueron hallados en sus fichas técnicas y se presentan en la **Figura A-3**:

**Figura A-3:** Especificaciones técnicas de los colectores solares

			Features	Barilla T22 AK
$\eta_0$ (aperture), DIN 4757-4 or EN 12975	%	64.2	Total area/aperture area	2.24m <sup>2</sup> /2.01m <sup>2</sup>
$c_1$ with wind, in relation to aperture	W/(m <sup>2</sup> k)	0.89	Dimensions (L x D x H)	1930mm x 1160mm x 110mm
$c_2$ with wind, in relation to aperture	W/(m <sup>2</sup> k)	0.001	Collector efficiency (ass. to EN 12975)	$\eta_0 = 83.1\%$ ; $a_1 = 3.44 \text{ W/m}^2\text{K}$ ; $a_2 = 0.0176 \text{ W/m}^2\text{K}^2$
$K_{e,trans}$ (50°), in relation to aperture		1	Incident angle modifier (50°)	$k_{\theta}(50^\circ) = 92\%$ ; $K_{diff} = 84\%$
$K_{e,long}$ (50°), in relation to aperture		0.9	Annual collector yield (ITW 5m <sup>2</sup> )	499 kWh/m <sup>2</sup>
Yield forecast	kWh/m <sup>2</sup> a	589		

Nombre de la fuente: (Barilla, 2012; Ritter Energie, 2020)

Con los datos de temperatura media mensual, obtenidos de los datos registrados por la estación agrometeorológica Tibaitata del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM), durante el periodo 1978-2021, la temperatura mínima diaria de agua caliente, que corresponde a 50°C, la radiación en el lugar y las características de cada colector, se realizaron los cálculos de eficiencias y energía aprovechable, superando el requerimiento previamente calculado (**Tabla A-1**):

**Tabla A-1:** Resultados del cálculo de eficiencias reales y energía aprovechable

Mes	Ta (°C)	G (kWh/m <sup>2</sup> )	n (%)	n (%)	Q (W/m <sup>2</sup> )	Q (W/m <sup>2</sup> )	QT (W)
Enero	12.55	178.3	0.64	0.80	3,657.81	4,626.09	16,567.80
Febrero	13.14	148.2	0.64	0.80	3,363.85	4,247.65	15,223.00
Marzo	13.58	130.5	0.63	0.80	2,668.87	3,349.60	12,036.95
Abril	14.01	108.8	0.63	0.79	2,295.00	2,867.17	10,324.34
Mayo	13.92	101.8	0.63	0.79	2,074.83	2,581.85	9,313.35
Junio	13.30	96.8	0.63	0.78	2,037.51	2,531.42	9,137.86
Julio	12.87	103.2	0.63	0.79	2,102.82	2,614.44	9,434.51
Agosto	12.85	111.9	0.63	0.79	2,282.97	2,847.58	10,261.11
Septiembre	12.88	118.2	0.63	0.79	2,495.07	3,122.21	11,234.55
Octubre	13.32	136.3	0.63	0.80	2,788.74	3,503.88	12,585.24
Noviembre	13.48	144.5	0.63	0.80	3,058.46	3,853.55	13,824.03
Diciembre	12.85	170.8	0.64	0.80	3,502.77	4,426.47	15,858.49

Nombre de la fuente: Elaboración propia

## 1.2. Tubería de distribución

Para el diseño del sistema distribuidor de calor, se tomó como coeficiente de global de transferencia de calor (U), el menor valor promedio de intercambiadores de calor agua aire

el cual es de  $10 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ , los datos de diseño se presentan en la **Tabla A-2** y las ecuaciones utilizadas a continuación **(A-3)** y **(A-4)**:

$$LMTD = (T_s - T_e) - (T_s - T_i) / \ln \left( \frac{T_s - T_e}{T_s - T_i} \right) \quad (\text{A-3})$$

$$Q = A * U * LMTD \quad (\text{A-4})$$

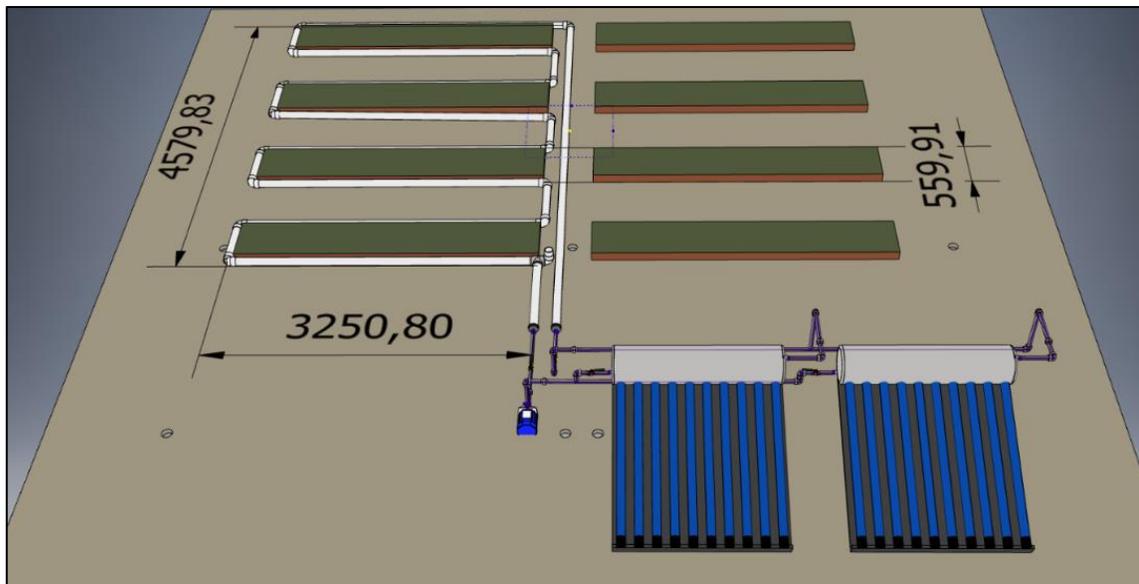
**Tabla A-2:** Datos de diseño para el intercambiador de calor

Temperatura mínima de entrada del agua caliente	Ti	50	°C
Temperatura mínima ambiente	Ts	5	°C
Temperatura mínima de salida del agua	Te	23	°C
Temperatura media logarítmica	LMDT	29.5	°C
Coefficiente global de transferencia de calor	U	10	W/m <sup>2</sup> °C
Energía térmica mínima esperada	Q	2.108	W
Área de transferencia de calor	A	7.15	m <sup>2</sup>

Nombre de la fuente: Elaboración propia

De acuerdo con el área calculada, en la **Figura A-4** se presenta la distribución propuesta:

**Figura A-4:** Distribución propuesta para el intercambiador de calor



Nombre de la fuente: Planos de diseño del sistema con energía solar (Espitia, 2022)

### 1.3. Diseño Hidráulico

Para determinar la cabeza de altura de la bomba, se deben calcular las pérdidas del sistema, que dependen del diámetro de la tubería, el cual se definió considerando la distribución propuesta con una longitud de 36 m y haciendo uso de la siguiente ecuación **(A-5)**:

$$A = P * L; A = 2\pi r * L; r = \frac{A}{2\pi L} \quad \text{(A-5)}$$

$$r = \frac{7.15 \text{ m}^2}{2\pi * 36\text{m}} = 0.03 \text{ m}$$

Donde:

A es el área de transferencia

P es el perímetro de sección transversal de la tubería

L es la longitud del tubo y r es el radio

Para fines prácticos se seleccionó un tubo comercial con un diámetro nominal de 0.06 m, con un área transversal interna de 0.00234 m<sup>2</sup> permitiendo el almacenamiento y circulación del agua caliente, a una velocidad mínima de 0,6 m/s, corresponde a un caudal de 0.0014031 m<sup>3</sup>/s (84.22 lpm), de acuerdo con las ecuaciones **(A-6)** y **(A-7)**.

$$Q = A * v \quad \text{(A-6)}$$

$$A = \pi * r^2 \quad \text{(A-7)}$$

El siguiente paso fue calcular el número de Reynolds **(A-8)**, usando el valor de viscosidad cinemática, calculada con la densidad y la viscosidad dinámica para agua a 29.5 °C, como temperatura media logarítmica del fluido.

$$\text{Re} = \frac{v D}{\nu} \quad \text{(A-8)}$$

$$\text{Re} = \frac{0.6 * 0.05458 * 995}{0.000822} = 39640.22$$

Para determinar el factor de fricción **(A-9)**, se requiere el valor de la rugosidad absoluta ( $\epsilon$ ) del material polietileno, que corresponde a 0.0015 mm y con el número de Reynolds determina a través de la siguiente ecuación:

$$f = \frac{0,25}{\left[ \text{Log} \left( \frac{\epsilon}{3.7(D)} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right)^2 \right]} \quad (\text{A-9})$$

$$f = \frac{0,25}{\left[ \text{Log} \left( \frac{0.0000015}{3.7(0.05458)} + \frac{5.74}{39640.22^{0.9}} \right)^2 \right]} = 0.0371$$

Las pérdidas por la longitud de la tubería se calcularon así (A-10):

$$h_l = f * \left( \frac{L}{D} \right) * \left( \frac{v^2}{2g} \right) \quad (\text{A-10})$$

$$hl = 0.0371 * \frac{36}{0.05458} * \left( \frac{0.6^2}{2 * 9.81} \right) = 0.4487$$

En donde:

L es la longitud de la tubería

D es el diámetro de la tubería

Para las pérdidas por accesorios (A-11), resaltados en la **Figura A-5** (Pág.111), se hizo uso de la siguiente ecuación y de los coeficientes de resistencia correspondientes a cada accesorio (K).

$$h_a = \sum K * \left( \frac{v^2}{2g} \right) \quad (\text{A-11})$$

En donde:

- K de reducción brusca = 0.35
- K de ampliación brusca = 0.2
- K de los codos de 90 - 1" = 1.5
- K de los codos de 90 - 2" = 0.95
- K de las Tee salida lateral - 2" = 1.4
- K de las Tee paso directo = 0.9
- K de las Tee salida lateral - 1" = 1.8
- K de válvula de cheque tipo cortina= 4.7
- K de unión universal = 1.822
- K de la válvula compuerta abierta = 2.9
- K de válvula de globo - 1" = 0.24
- K de la salida del depósito = 0.5

- K de la entrada del depósito = 1
- K del manómetro = 5
- K de un caudalímetro = 7
  
- K total del intercambiador de calor =  $0.9 + 16 \cdot 0.95 + 1.4 = 17.5$

$$h_a = 17.5 * \left( \frac{0.6^2}{2 * 9.81} \right) = 0.3211$$

$$h_{intercambiador} = 0.4487 + 0.3211 = 0.7698$$

El área transversal en el sistema fuera del intercambiador de calor corresponde a un valor de  $0.000507 \text{ m}^2$  con una velocidad de  $2.7 \text{ m/s}$ , siendo necesario calcular las pérdidas en estas secciones como se presenta a continuación **(A-8)** y **(A-11)**:

- K total de la succión de la bomba =  $0.5 + 2 \cdot 1.5 + 0.24 + 1.8 + 1.822 + 4.7 = 12.062$

$$h_a = 12.062 * \left( \frac{2.7^2}{2 * 9.81} \right) = 4.4818$$

$$Re = \frac{2.7 * 0.0254 * 995}{0.000822} = 83013.5$$

Para determinar el factor de fricción, se requiere el valor de la rugosidad absoluta ( $\epsilon$ ) del acero galvanizado, que corresponde a  $0.15 \text{ mm}$  y con el número de Reynolds determina a través de la ecuación **(A-9)**:

$$f = \frac{0,25}{\left[ \text{Log} \left( \frac{0.00015}{3.7(0.0254)} + \frac{5.74}{83013.5^{0.9}} \right)^2 \right]} = 0.04558$$

Las pérdidas por la longitud de la tubería se calcularon así **(A-10)**:

$$h_l = 0.04558 * \left( \frac{3.75}{0.0254} \right) * \left( \frac{2.7^2}{2 * 9.81} \right) = 2.5$$

$$h_{succión} = 2.5 + 4.48187 = 6.9817$$

- K de la descarga de la bomba

$$1.5+7+1.5+0.9+1.822+1.5*3+0.2 = 17.422$$

$$0.35+2.9+ 1.5+0.9+1.5+2.9+1.5+1+0.5+1.8+1.5*2+1.822+1 = 20.672$$

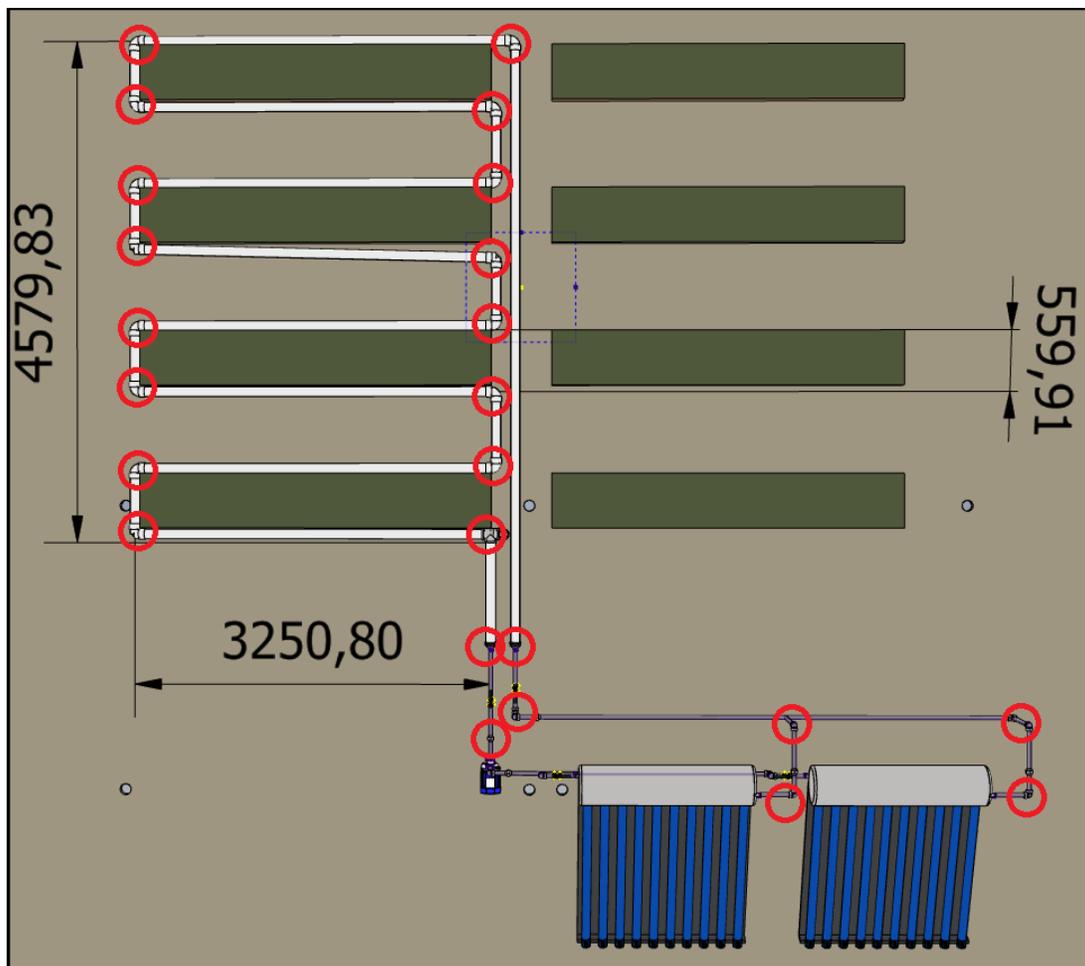
$$h_a = 38.094 * \left( \frac{2.7^2}{2 * 9.81} \right) = 14.1542$$

$$h_l = 0.04558 * \left( \frac{1.75 + 11}{0.0254} \right) * \left( \frac{2.7^2}{2 * 9.81} \right) = 8.5012$$

$$h_{Descarga} = 14.1542 + 8.5012 = 22.6554$$

$$h_{Sistema} = 0.7698 + 6.98175 + 22.6554 = 30.41$$

Figura A-5: Accesorios del sistema propuesto



Nombre de la fuente: Planos de diseño del sistema con energía solar (Espitia, 2022)

Un sistema cerrado se caracteriza por mantener el flujo confinado dentro del sistema, por lo cual la energía cinética del agua se mantiene constante y la cabeza de velocidad se considera despreciable en el cálculo de la presión necesaria para la bomba. Así mismo, en lugar de la cabeza de posición, es más importante considerar la presión necesaria para superar la altura de la columna de agua en el sistema, junto con la presión de vapor del agua y las pérdidas del sistema **(A-12)**.

$$h_b = h_{pT} + \frac{p}{\gamma} + Pa \quad \text{(A-12)}$$

En donde:

$h_{pT}$  = Perdidas totales por tubería

$\frac{p}{\gamma}$  = Cabeza de Presión

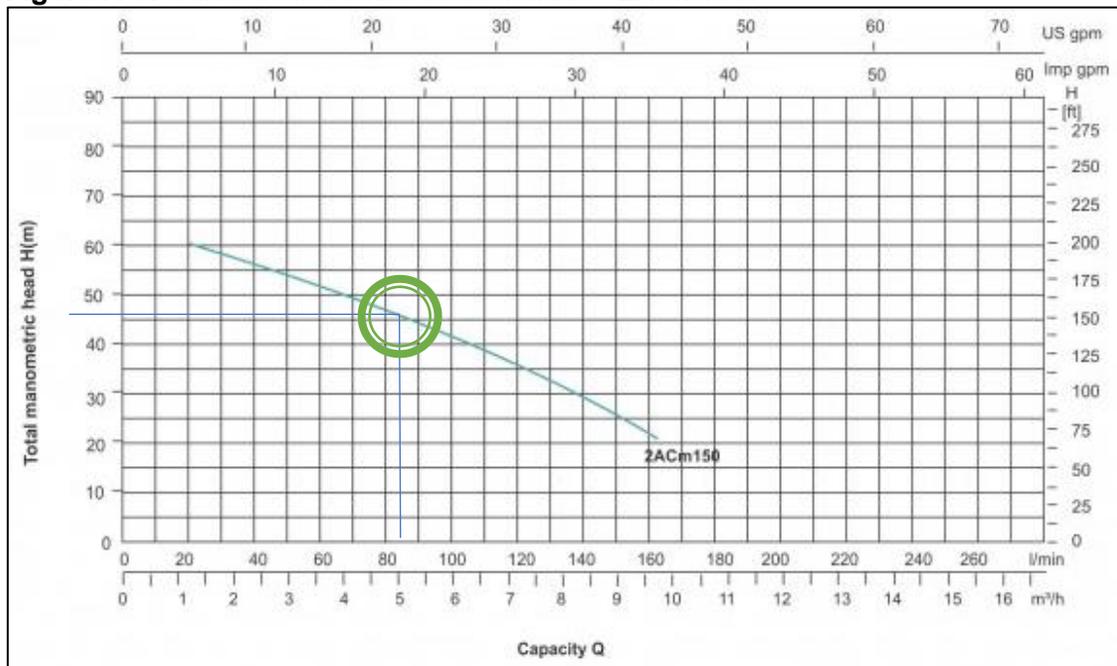
$Pa$  = Presión de vapor del agua absoluta

La presión de vapor del agua se relaciona con el fenómeno de cavitación, que ocurre cuando la presión del agua disminuye hasta formar vapor y para evitarlo, la presión proporcionada por la bomba debe ser superior a la presión interna requerida, que corresponde a la presión absoluta, como la suma de la presión atmosférica y la presión de vapor del agua que es directamente proporcional a su temperatura.

La temperatura máxima del agua de acuerdo con la ficha técnica del colector es de 70 °C, considerando un factor de seguridad de 1.2, se determina la presión de vapor a 84°C y corresponde a un valor de 556.35 HPa = 5.6733 m.c.a. + la atmosférica que a una altura de 2545 m.s.n.m. es de 742.61 HPa = 7.5727 m.c.a. Haciendo uso de la ecuación **(A-12)** se obtiene un valor de:  $h_b = 30.41 + 2 + 13.246 = 45.6$  m. c. a.

La bomba fue seleccionada de acuerdo con el caudal y la presión necesaria calculada, así mismo, para garantizar el funcionamiento adecuado del sistema, se busca que esta condición se encuentre en el segundo tercio de la curva de la bomba como se observa en

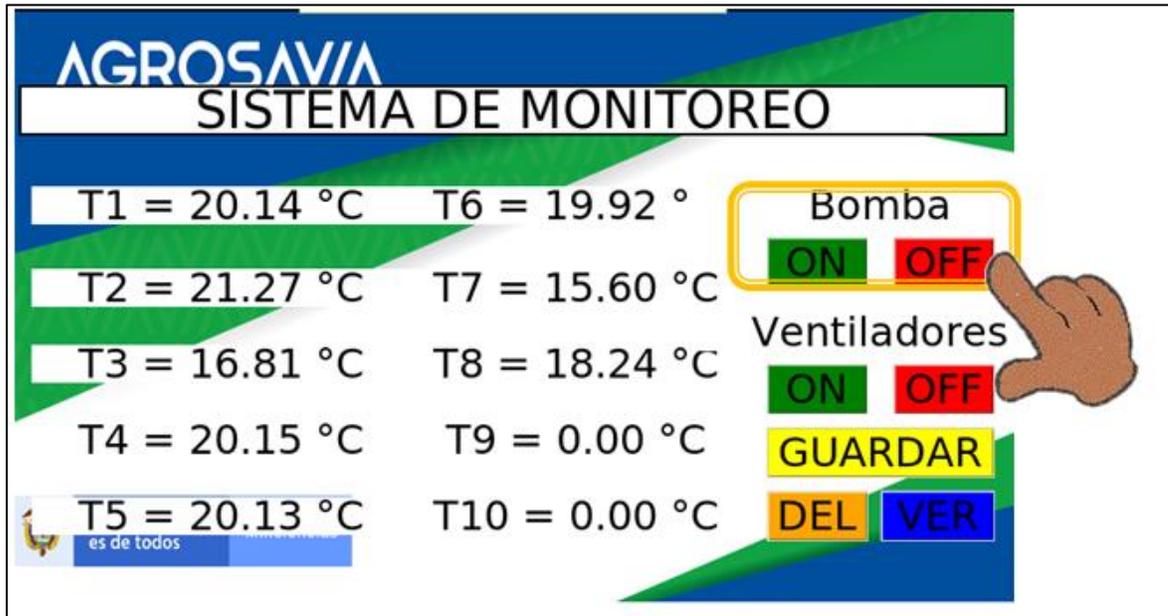
**Figura A-6:**

**Figura A-6:** Curva de la bomba seleccionada - 2ACM150.

Nombre de la fuente: (Condustrial, 2020)

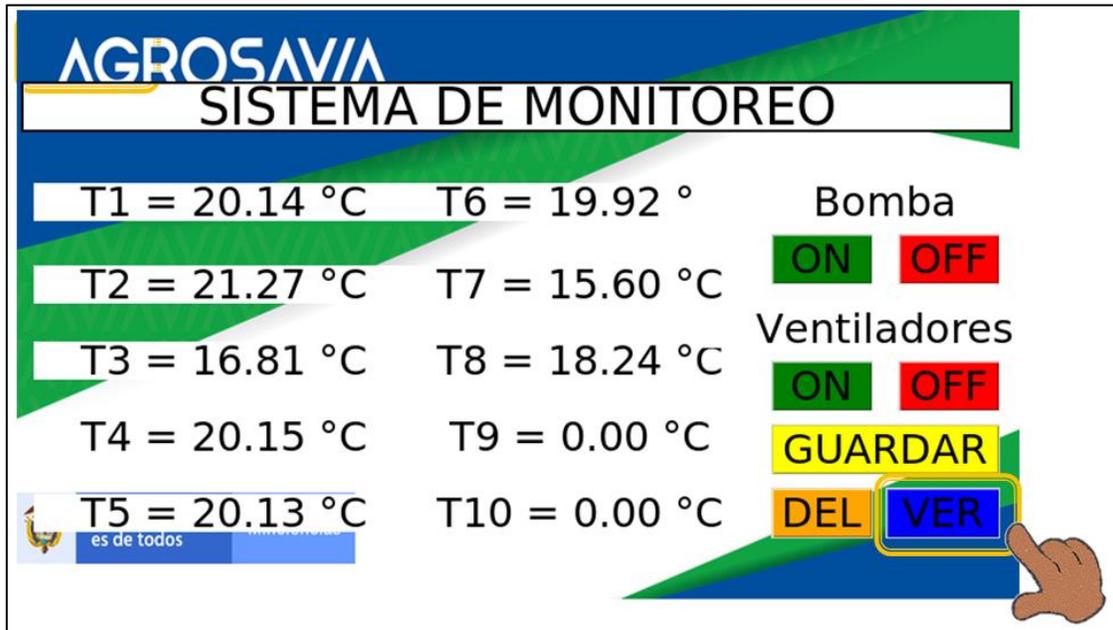
## 1.4. Control del suelo radiante

El control del sistema se realizó utilizando un sistema PLC integrado con un Raspberry Pi como herramienta de interfaz de usuario. Para activar el sistema de suelo radiante, se proporcionaron dos opciones: una alternativa manual con los botones "ON" y "OFF" ubicados debajo de la palabra "Bomba" (**Figura A-7**) y también la posibilidad de control programado utilizando la sección "VER". Esto permitió flexibilidad en la operación y ajuste del sistema según las necesidades a través de una configuración horaria.

**Figura A-7:** Control manual del suelo radiante

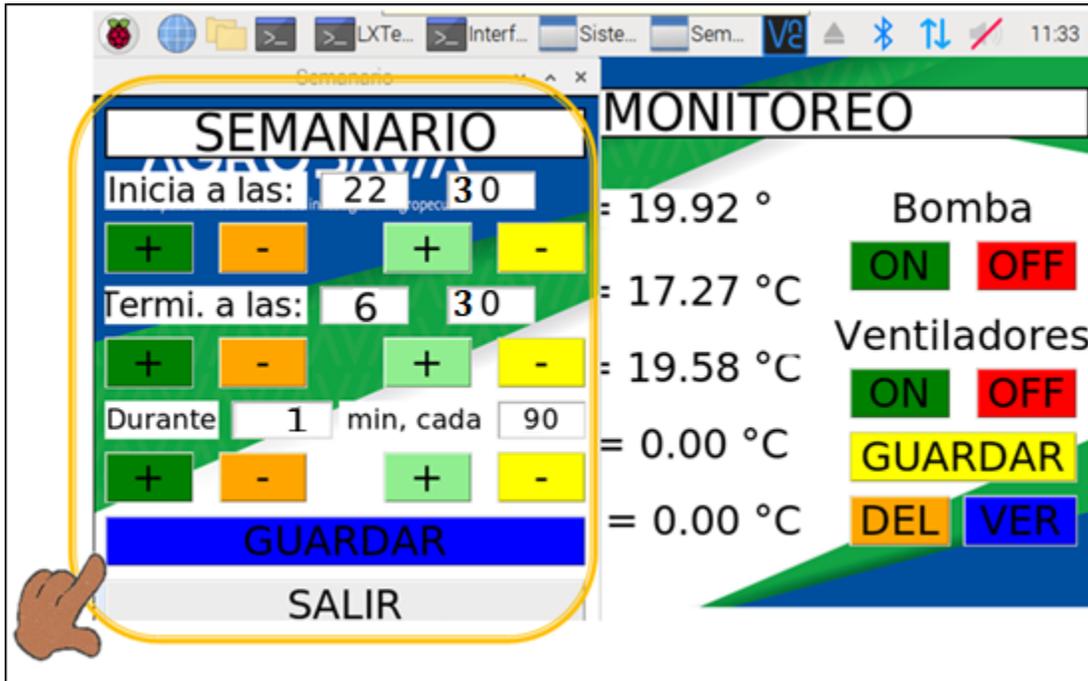
Nombre de la fuente: Elaboración propia

Al pulsar la opción “VER”, ubicada en la parte inferior derecha de la pantalla principal del sistema de monitoreo, se activará una nueva ventana denominada “SEMANARIO”, la cual permite la configuración del periodo de tiempo, dentro del cual se encenderá la bomba de agua, permitiendo la circulación de agua calentada en el periodo diurno, a través del colector solar y dispuesta en el suelo radiante. Con la periodicidad también definida dentro de dicho semanario (**Figura A-8**).

**Figura A-8:** Control programado del suelo radiante

Nombre de la fuente: Elaboración propia

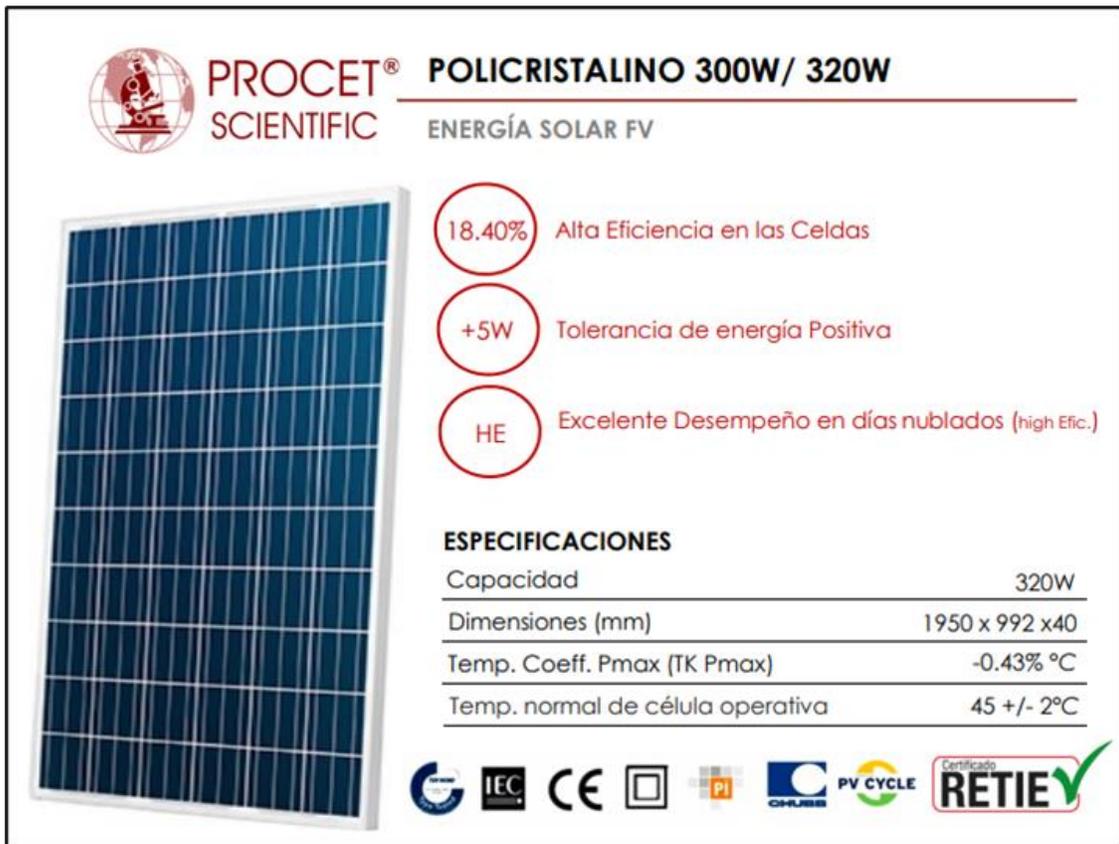
La franja de tiempo corresponde a veinticuatro horas (24h) en la sección de “Inicia a las:” y también, en la de “Termi. a las:” se cuenta con dos parejas de signos más y menos, donde la del lado izquierdo, corresponde a las horas, mientras que la del derecho a los minutos. Así mismo, en la sección “Durante” sus primeros signos corresponden a min, tal como se indica a continuación del numeral. Mientras que los signos del lado derecho inferior, corresponden a los minutos entre cada encendido de la bomba. Finalmente, cuando se encuentre conforme con la configuración dada, debe dar en el botón “GUARDAR” o de lo contrario en el botón “SALIR” para mantener la configuración inicial (Figura A-9).

**Figura A-9:** Ajuste semanario encendido y apagado bomba

Nombre de la fuente: Elaboración propia

## 1.5. Diseño fotovoltaico

La demanda energética corresponde al consumo de la bomba y del PLC, la cual es de 1.5 kW y será encendida en cortos lapsos de tiempo que totalizan 0.1 h y de 30 W, encendido durante las 24 h. Dando como resultado un requerimiento de 1.044 Wh/día, con factor de seguridad del 20%. En la **Figura A-10**, se presenta la ficha técnica del módulo propuesto, de donde se tomaron los datos necesarios para realizar los cálculos:

**Figura A-10:** Ficha técnica del módulo propuesto


**PROCET® SCIENTIFIC** POLICRISTALINO 300W/ 320W  
ENERGÍA SOLAR FV

18.40% Alta Eficiencia en las Celdas

+5W Tolerancia de energía Positiva

HE Excelente Desempeño en días nublados (high Efic.)

**ESPECIFICACIONES**

Capacidad	320W
Dimensiones (mm)	1950 x 992 x40
Temp. Coeff. Pmax (TK Pmax)	-0.43% °C
Temp. normal de célula operativa	45 +/- 2°C

IEC CE PI PV CYCLE Certificado RETIE

Nombre de la fuente: (PROCET SCIENTIFIC, 2020)

Se obtuvieron los datos de producción de energía y radiación solar para la ubicación geográfica del panel, utilizando el software PVGIS, los resultados se presentaron en la **Figura A-2**. Así mismo, en la **Tabla A-1** se presentó la temperatura media mensual, obtenida de los datos registrados de la estación agrometeorológica Tibaitatá del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM), durante el periodo 1978-2021.

Con la demanda, la ubicación asignada y las siguientes ecuaciones se realizaron los cálculos:

### 1.5.1. Producción de referencia

Se define una producción de referencia de la radiación solar ( $Y_r$ ) como **(A-13)**:

$$Y_r = \frac{H_{opt}}{G_0} \quad (\text{A-13})$$

donde H es la irradiación global en un plano para un tiempo determinado (en W·h/m<sup>2</sup>) y la irradiación de referencia es G<sub>0</sub>= 1000 W/m<sup>2</sup>.

### 1.5.2. Índice de rendimiento modificado

Este parámetro es un factor de corrección entre el valor medio de la eficiencia y el valor nominal de la eficiencia del módulo en STC, AM1.5 y 25°C y corresponde al efecto de la temperatura sobre el rendimiento fotovoltaico (A-14).

$$PR_m = PR_0 * [1 + \alpha_{PT} * (T_a - 25 + T_{NOC} - 20)] \quad (\text{A-14})$$

$$PR_m = PR_0 * [1 + 0.0043 * (T_a - 25 + 45 - 20)]$$

Donde:

- PR<sub>0</sub> = (Energía generada por el sistema) / (Radiación solar incidente en el sistema).
  - α<sub>PT</sub> es el coeficiente de temperatura del rendimiento, que indica cómo varía el rendimiento del módulo con respecto a la temperatura.
  - T<sub>a</sub> es la temperatura ambiente en grados Celsius durante el período considerado.
  - T<sub>NOC</sub> es la temperatura nominal de funcionamiento del módulo en grados Celsius.
- **Índice de rendimiento del sistema complementario**

Considera las pérdidas adicionales debidas a: polvo, resistividad, desequilibrio de los módulos, inversor, transformadores en el cableado (A-15) y (Tabla A-3).

$$PR_{BOS} = 1 - L_{DC} - L_{mismatch} - L_{inv} - L_{AC} - L_{transformers} - L_{Dust} \quad (\text{A-15})$$

**Tabla A-3:** Índice de rendimiento del sistema complementario

PARÁMETRO	SIGLA	VALOR
PERDIDAS POLVO	$L_{DUST}$	2,0%
PERDIDAS ENTRE PANELES	$L_{mismatch}$	0,4%
PERDIDAS CONEXIONES DC	$L_{DC}$	1,0%
PERDIDAS INVERSOR	$L_{INV}$	4,0%
PERDIDAS AC	$L_{AC}$	0,1%
PERDIDAS TRANSFORMADORES	$L_{transf}$	0,0%
PERDIDAS BALANCE DEL SISTEMA	$P_{RBOS}$	92,5%

Nombre de la fuente: Elaboración propia

### 1.5.3. Razón de rendimiento de la planta

Representa la relación de la energía generada y la radiación solar incidente considerando todas las pérdidas, ayudando a identificar si existen problemas y evidenciando las mejoras de eficiencia posibles en el sistema **(A-16)**.

$$PR_f = PR_m * PR_{BOS} \quad (\text{A-16})$$

### 1.5.4. Producción modulo

Representa la cantidad de energía eléctrica que se espera genere el módulo bajo las condiciones de radiación solar evaluadas **(A-17)**.

$$Y_m = PR_m * Y_r \quad (\text{A-17})$$

### 1.5.5. Producción final

Da como resultado la cantidad de energía eléctrica que se espera que la planta fotovoltaica genere bajo las condiciones de radiación solar dadas, teniendo en cuenta tanto el rendimiento del módulo como las pérdidas del sistema **(A-18)**.

$$Y_f = PR_f * Y_r \quad (\text{A-18})$$

### 1.5.6. Potencia

$$P_f = Y_f * P_{Nom} \quad (\text{A-19})$$

Los resultados de los cálculos (A-14)(A-15)(A-16)(A-17)(A-18) (A-19) se muestran en la **Tabla A-4:**

**Tabla A-4:** cálculo de la potencia que se espera del panel

MES	DÍAS	TA (°C)	G (kWh/m <sup>2</sup> )	E (KWH)	PR0 (%)	PRM (%)	YM (H)	PRF (%)	YF (H)	POTENCIA (KWH/DÍA)
ENERO	31	12.55	178.3	139.6	0.78	0.83	147.14	0.76	136.10	1.32
FEBRERO	28	13.14	148.2	116	0.78	0.83	122.55	0.76	113.36	1.21
MARZO	31	13.58	130.5	102.1	0.78	0.83	108.06	0.77	99.96	0.97
ABRIL	30	14.01	108.8	84.7	0.78	0.83	89.80	0.76	83.07	0.83
MAYO	31	13.92	101.8	78.5	0.77	0.82	83.20	0.76	76.96	0.74
JUNIO	30	13.30	96.8	74.2	0.77	0.81	78.44	0.75	72.56	0.73
JULIO	31	12.87	103.2	78.7	0.76	0.80	83.06	0.74	76.83	0.74
AGOSTO	31	12.85	111.9	85.6	0.76	0.81	90.33	0.75	83.56	0.81
SEPTIEMBRE	30	12.88	118.2	90.8	0.77	0.81	95.83	0.75	88.64	0.89
OCTUBRE	31	13.32	136.3	106.6	0.78	0.83	112.71	0.76	104.25	1.01
NOVIEMBRE	30	13.48	144.5	113.8	0.79	0.83	120.40	0.77	111.37	1.11
DICIEMBRE	31	12.85	170.8	134	0.78	0.83	141.41	0.77	130.80	1.27

Nombre de la fuente: Elaboración propia

El número seleccionado es de un panel, con esto la potencia instalada es de 1.2 kW, cubriendo la demanda en los meses con mayor probabilidad de presentarse el evento crítico que son diciembre y enero, se garantiza la disponibilidad para carga de baterías.

### 1.5.7. Batería

Si se usan baterías de 24 V - 100 Ah y se tiene en cuenta que las baterías solo se pueden descargar hasta el 20%, se requieren las siguientes baterías:

$$\frac{1.2 \frac{kWh}{día} * 1000}{\frac{24V}{100 Ah * 0,8}} = 0.625 \text{ Baterías} \approx 1 \text{ Baterías}$$

## 1.6. Selección de la pantalla térmica

Las pantallas térmicas están compuestas por tiras de aluminio, por su capacidad de reflejar la radiación, combinadas con polímeros plásticos transparentes, considerando su alta resistencia a la oxidación térmica y a temperaturas hasta de 130°C, paralelas entre sí (Bonachela & Medrano, 2022). En el mercado existe una gran variedad de pantallas térmicas en función de la cantidad de tiras aluminizadas y transparentes y el patrón de distribución entre estas, ofreciendo variedad en sombra y ahorro energético (Cervantes, 2015).

Las pantallas utilizadas con el enfoque de ahorro de energía se denominan pantallas cerradas pues no permiten la circulación del aire a través de está, reduce el volumen de control del invernadero, sus cintas de aluminio reflejan la radiación infrarroja de onda larga, limitando las pérdidas de calor por radiación, convección y conducción, buscando conservar la temperatura, por lo que se prefiere el poliéster sobre el polietileno al considerar las pérdidas de calor y la transmitancia, polietileno 80% poliéster 45% (Bonachela & Medrano, 2022). Cuantas más cintas de aluminio disponga la pantalla, mayor ahorro energético se tendrá en el invernadero (HortiCultivos, 2014).

Su implementación debe buscar un correcto aislamiento, siendo importante el solape entre pantallas y el uso de bolsillos laterales, su uso se suele dar en acompañamiento de un método de calefacción y para conservar durante el periodo nocturno, el calor recibido durante el día por la radiación solar y emitida durante la noche por el suelo, el cultivo y demás elementos al interior del invernadero, a la vez que ejerce un efecto de amortiguamiento sobre la humedad, reducen la condensación de agua en la cubierta del invernadero (Cervantes, 2015; Granados et al., 2017) y no se genera condensación en la pantalla, al presentar temperaturas mayores que la cubierta exterior del invernadero (Bonachela & Medrano, 2022).

Adicionalmente, permiten controlar varias de las condiciones en el interior de nuestro invernadero como la luminosidad, la temperatura y la humedad y sus resultados de

implementación abarcan mayores producciones y calidad de los productos, aumento de precocidad y ahorro en combustible. Por ejemplo, al instalar pantallas térmicas fijas en los laterales del invernadero, con lo cual la eficiencia del sistema es máxima, el aire frío se queda en la parte superior del invernadero y reducen las pérdidas de calor, con ahorros energéticos o de combustible de la calefacción del 50% (Cervantes, 2015).

### 1.6.1. Alternativas de pantallas

A continuación, se presentan 3 alternativas de pantallas entre las evaluadas durante la selección de esta:

- 1) OBSCURA 10075 FB A+BW ofrece un ahorro de energía del 75% a la vez que permite controlar la duración del día con un 99,9% de oscurecimiento y su capa inferior es blanca en busca de intensificar la iluminación suplementaria (**Figura A-11**).
- 2) SOLARWOVEN ULTRA interfiere levemente en la luminosidad que reciben los cultivos debido a su patrón 100% transparente y reforzado que ofrece un ahorro hasta del 50% con un sombrío máximo del 29% (**Figura A-12**).
- 3) ALUMITEX 65% provee una presentación recubierta por aluminio en ambas caras con un porcentaje de sombrío del 65%, conservando un enfoque en el ahorro energético elevado y limitando parcialmente la luminosidad (**Figura A-13**).

**Figura A-11:** Características de la pantalla OBSCURA 10075 FB A+BW

## OBSCURA 10075 FB A+BW

### Información del Producto

Aplicación	Interior
Sistema	Colgante, Corredero
Característica	Control de la emisión de luz / oscurecimiento, Ahorro de energía
Retardante de llama	No
Firebreak	Con la intención de limitar la propagación del fuego de una pantalla a otra.
Material	Poliéster 36%, Poliolefina 33%, Aluminio 31%
Garantía	Garantía de cinco (5) años bajo todos tipos de cubiertas de invernaderos. Consulte la garantía limitada de Svensson para consultar todos los términos, condiciones y exclusiones por escrito.

Propiedades	Valor	Unidad	Métodos de prueba
Nivel de sombra bajo luz difusa PAR**	99.9	%	Método Svensson
Nivel de sombra bajo luz directa PAR**	99.9	%	Método Svensson
Ahorro de energía	75	%	Método Svensson
Ancho de bandas	4	mm	
Peso	193	g/m <sup>2</sup>	

\* Ancho 50 mm

\*\* PAR = 400 - 700 nm, exactitud +/- 1%

\*\*\* UV-luz = 300 - 400 nm

La imagen de este producto es solo para fines ilustrativos y puede variar en apariencia y diseño del producto entregado. Aunque la información en esta hoja de datos ha sido compuesta con cuidado, Svensson no acepta ninguna responsabilidad con respecto a su precisión.

Svensson y sus distribuidores autorizados pueden obtener más información sobre el producto y su instalación. Los productos y el nombre de Svensson están protegidos por patentes y otros derechos de propiedad intelectual.

Los productos marcados con FR son ignífugos. Ningún otro producto entregado por Svensson es ignífugo.

AB Ludvig Svensson es una empresa certificada ISO 14001/90001.

Nombre de la fuente: Ficha técnica (Svensson, 2022)

**Figura A-12:** Características de la pantalla SOLARWOVEN ULTRA

## SOLARWOVEN ULTRA

### Información del Producto

Aplicación	Exterior, Interior
Sistema	Enrollable
Característica	Ahorro de energía, Protección del tiempo
Retardante de llama	No
Material	Polioléfina 100%
Patrón	Full plastic
Garantía	Resistente a los rayos UV de acuerdo con la norma ISO 4892-3 ciclo 3 (basada en la prueba QUV mín. 7400 horas (ciclos de 5 horas de exposición a la luz UV-A 340 nm 0,83 W/m <sup>2</sup> a 50°C y 1 hora de neblina de agua), lo que técnicamente corresponde a una radiación UV de 800 kLy.

Propiedades	Valor	Unidad	Métodos de prueba
Nivel de sombra bajo luz difusa PAR**	29	%	Protocolo NEN 2675:2018
	22	%	Método Svensson
Nivel de sombra bajo luz directa PAR**	18	%	Protocolo NEN 2675:2018
	15	%	Método Svensson
Transmisión de luz UV ***	10	%	Método Svensson
Ahorro de energía	50	%	Método Svensson
Peso	200	g/m <sup>2</sup>	
Grosor	0.3	mm	
Estirabilidad (largo / ancho) *	25/20	%	Según ISO 13934-1
Fuerza de tracción (largo/ancho) *	900/794	N / 5cm	Según ISO 13934-1

\* Ancho 50 mm

\*\* PAR = 400 - 700 nm, exactitud +/- 1%

\*\*\* UV-luz = 300 - 400 nm

La imagen de este producto es solo para fines ilustrativos y puede variar en apariencia y diseño del producto entregado. Aunque la información en esta hoja de datos ha sido compuesta con cuidado, Svensson no acepta ninguna responsabilidad con respecto a su precisión.

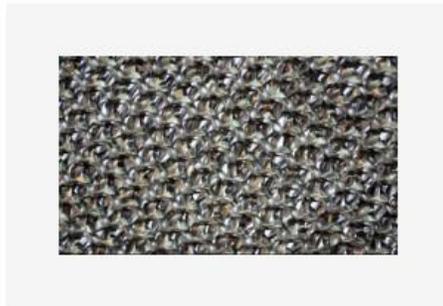
Svensson y sus distribuidores autorizados pueden obtener más información sobre el producto y su instalación. Los productos y el nombre de Svensson están protegidos por patentes y otros derechos de propiedad intelectual.

Los productos marcados con FR son ignífugos. Ningún otro producto entregado por Svensson es ignífugo.

AB Ludvig Svensson es una empresa certificada ISO 14001/90001.

Nombre de la fuente: Ficha técnica (Svensson, 2022)

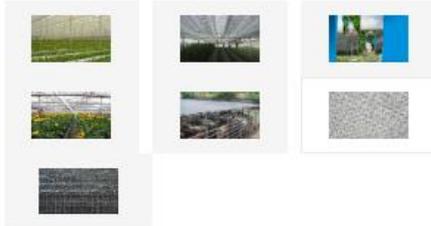
**Figura A-13:** Características de la pantalla ALUMINEX 65%



## Alumitex®

Alumitex

Es una malla tejida en polietileno de alta densidad recubierta en aluminio por ambas caras, que se presenta en diferentes densidades de tejido, ofreciendo variedad en porcentajes de sombrío 33% - 50% - 65% - 75%.



DESCRIPCIÓN	INFORMACIÓN
	<p><b>Presentación:</b> 50% cubrimiento, 65% cubrimiento, 75% cubrimiento.</p> <p><b>Empaque:</b> Rollos</p> <p><b>Dimensión:</b> 4.00 x 100 m, 6.00 x 100 m, 8.00 x 100 m, 10.00 x 100 m, 12.00 x 100 m</p>

Nombre de la fuente: Ficha técnica (Tescol - Tejidos de Colombia S.A., 2023)

### 1.6.2. Análisis de las alternativas propuestas

Teniendo en cuenta lo anteriormente descrito, la luminosidad se ve directamente influenciada por la selección de la pantalla y su determinación dependerá principalmente del cultivo y sus requerimientos lumínicos. Considerando las recomendaciones de operación del sistema se prevé una alteración en el fotoperiodo, el cual se relaciona con el florecimiento, por lo que los cultivos se dividen en 3 categorías: (I) plantas de días cortos, su desarrollo se acelera y la entrada a floración se anticipa cuando la duración del día es más corta que la noche, (II) plantas de día largos, requieren una duración del día superior

a la de la noche para acelerar su desarrollo y anticipar su floración y (III) plantas indiferentes, que no manifiestan requerimientos fotoperiódicos, siendo capaces de florecer en cualquier duración del día, aunque dentro de estas se reconocen las plantas intermedias que son capaces de florecer con duraciones del día entre 11 y 13 horas (Martínez, 2017), en la **Tabla A-5** se presentan los niveles óptimos de iluminación para algunos cultivos:

**Tabla A-5:** Niveles óptimos de iluminación para algunos cultivos de la sábana de Bogotá

<b>Cultivo</b>	<b>Intensidad de luz (Lux)</b>	<b>Duración</b>
Tomate	10.000 - 40.000	Día intermedio
Lechuga	12.000 - 30.000	Día largo
Clavel	15.000 - 45.000	Día intermedio
Rosa	100.000	Día intermedio
Crisantemo	75.000 - 95.000	Día corto

Nombre de la fuente: Elaboración propia

### **1.6.3. Pantalla térmica seleccionada**

De la tabla anterior se puede concluir que si en el invernadero se espera producir lechuga es conveniente optar por la alternativa 2, pues el sistema de ahorro energético no causará interferencias en su desarrollo y floración, divergiendo de los demás cultivos referenciados, donde la alternativa 1 ofrece un mayor porcentaje de ahorro energético y el oscurecimiento aportado no genera efectos negativos en el desarrollo de los mismos, sin embargo, la alternativa 3 no afecta directamente el fotoperiodo, debido a que permite el paso de la luminosidad en un 35% y se espera que su disposición aluminizada en la cara interior permita un reflejo inmediato de las ondas de radiación largas emitidas en el interior del invernadero.

## **1.7. Actividades de mantenimiento**

### **1.7.1. Paneles solares**

#### **Inspección visual**

Es necesario realizar periódicamente una inspección visual para detectar cualquier desperfecto que pueda existir en la instalación: paneles rotos o dañados, cables rotos o acumulación de suciedad y polvo.

#### **Limpieza**

Es imprescindible limpiar periódicamente las placas solares, especialmente en zonas polvorientas y arenosas. Esto debe hacerse con un cepillo suave, evitando el uso de cualquier tipo de producto químico.

#### **Orientación e inclinación**

La orientación e inclinación de las placas solares debe comprobarse periódicamente para asegurarse de que siguen apuntando hacia el sol. Si los paneles no están bien orientados, puede disminuir la producción de la instalación.

#### **Conexiones eléctricas**

Las conexiones eléctricas del panel solar deben revisarse periódicamente para garantizar que son seguras y que no existe riesgo de descarga eléctrica.

#### **Temperatura**

La temperatura de las placas solares debe comprobarse periódicamente para asegurarse de que se encuentra dentro del rango de temperatura de funcionamiento recomendado. Si la temperatura es demasiado alta, puede reducir la eficiencia del conjunto de los paneles. El mantenimiento regular de las placas solares es clave para garantizar un rendimiento óptimo, asegurándose así que puedes beneficiarte de la máxima producción de los módulos fotovoltaicos. Se debe tener en cuenta que cuanto mayor sea la instalación fotovoltaica, más atención habrá que prestarle al mantenimiento de las placas solares y los componentes del sistema.

### **1.7.2. Electrobomba**

#### **Mantenimiento diario**

1. Comprobar que la velocidad de la bomba de agua se corresponde con la salida.
2. Examinar las bridas por si existen fugas, fisuras, desgastes o partes oxidadas que puedan hacer peligrar el funcionamiento. Los mantenimientos deben ser realizados preferiblemente por personal especializado en estas actividades.

#### **Mantenimiento mensual**

1. Examinar y reparar sellos.
2. Lubricación de cojinetes según las especificaciones propias del equipo.
3. Comprobar la elevación de la bomba de agua respecto a su base.
4. Cambiar los acoplamientos del motor para lograr una salida adecuada.
5. Comprobar que los puntos de montaje son seguros.
6. Inspeccionar el sello mecánico y embalaje.
7. Comprobar los acoplamientos.
8. Limpiar los filtros.
9. Eliminar la acumulación de polvo y suciedad de los motores.

## **Mantenimiento anual**

El mantenimiento básico puedes realizarlo personalmente, pero una vez al año es recomendable que lo revise un profesional experto en equipos de bombeo hidráulicos. De esta forma se podrá realizar un diagnóstico completo a la bomba de agua para realizar ajustes, restaurar piezas o reparar problemas que hayan podido surgir en ese tiempo.

### **1.7.3. Sistema de tubería en el suelo**

#### **Fuga de agua**

Si encontrarnos manchas de agua o humedad en el uso esto es indicador de que es necesario realizar un mantenimiento en el suelo radiante. Se recomienda revisar periódicamente y aplicar productos que eviten las fugas de agua en la tubería.

#### **Distribución del calor irregular**

Una de las principales ventajas de este sistema de calefacción es el reparto homogéneo del calor. Esto se debe a que el circuito de tuberías recorre todo el suelo del invernadero. Sin embargo, cuando una habitación o algún punto en concreto se calienta más que el resto, indica un fallo en el mantenimiento del suelo radiante. Por lo tanto, se debe revisar la tubería y corregir posibles fallas.

#### **Pérdidas en la transmisión de calor**

Como sucede en el punto anterior, cuando aparecen problemas en la cantidad de calor que se transmite, se debe realizar un proceso de limpieza de la tubería del suelo radiante.

#### **Deterioro en alguna de las partes**

Con el paso del tiempo, y si no se realiza una limpieza adecuada del suelo radiante, tuberías y válvulas se pueden ir deteriorándose. Por lo tanto, se recomienda hacer una limpieza con una frecuencia mensual.

## Bibliografía

- ABNT. (2022). NBR 15220: Desempenho térmico de edificações Parte 2 - Componentes e elementos construtivos das edificações - Resistência e transmitância térmica. *Associação Brasileira de Normas Técnicas*, 1–58.
- Agropinos. (2019). *Agroclear* (p. 1).
- Ahamed, M. S., Guo, H., & Tanino, K. (2018). Development of a thermal model for simulation of supplemental heating requirements in Chinese-style solar greenhouses. *Computers and Electronics in Agriculture*, *150*, 235–244.
- Ansys. (2015). *ANSYS ICEM CFD 16.2 Tutorial Manual*. 15317(November), 1–1294. <papers://d0b7ba82-564e-41a5-892d-096be28ddf10/Paper/p1477>
- Attar, I., Naili, N., Khalifa, N., Hazami, M., & Farhat, A. (2013). Parametric and numerical study of a solar system for heating a greenhouse equipped with a buried exchanger. *Energy Conversion and Management*, *70*, 163–173. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.02.017>
- Badia, M. (2022). *Espesor pared tubería Acero Inoxidable según ASME B36.19M :: DNbrida*. <http://www.dnbrida.com/espesor-tuberia-acero-inoxidable-sch-asme-b36.19m.php>
- Baeza, E., Ignacio Montero, J., Pérez-Parra, J., J. Bailey, B., Hernández, J. C., & Carlos Gázquez, J. (2014). *Avances en el estudio de la ventilación natural*.
- Baeza, E. J., & Kacira, M. (2017). Greenhouse technology for cultivation in arid and semi-arid regions. *Acta Horticulturae*, *1170*, 17–29. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2017.1170.2>
- Barilla. (2012). *Barilla F22 Flat Plate by Fruitful Media Ltd - Issuu*. <https://issuu.com/fmltd/docs/barilla-f22-flat-plate>
- Baxevanou, C., Bartzanas, T., Fidaros, D., & Kittas, C. (2008). Solar radiation distribution in a tunnel greenhouse. *Acta Horticulturae*, *801 PART 2*(February 2014), 855–862. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2008.801.100>
- Belov, V. V. V., Belov, E. L. L., & Sharonova, T. V. V. (2020). Evaluation of the effectiveness of a helio-greenhouse with soil heating. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *604*(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/604/1/012021>

- Berroug, F., Lakhal, E. K. K., El Omari, M., Faraji, M., & El Qarnia, H. (2011). Thermal performance of a greenhouse with a phase change material north wall. *Energy and Buildings*, 43(11), 3027–3035. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.07.020>
- Blanco, I., Pascuzzi, S., Anifantis, A. S. A. S., & Scarascia-Mugnozza, G. (2014). Study of a pilot photovoltaic-electrolyser-fuel cell power system for a geothermal heat pump heated greenhouse and evaluation of the electrolyser efficiency and operational mode. *Journal of Agricultural Engineering*, 45(3), 111–118. <https://doi.org/10.4081/jae.2014.238>
- Bojacá, C. R., Monsalve, O., Casilimas, H., Villagrán, E. A., Gil, R., Arias, L. A., & Fuentes, L. S. (2012). *Manual de producción de pimentón bajo invernadero* (C. R. Bojacá & O. Monsalve (eds.); 1a ed.). Universidad Jorge Tadeo Lozano.
- Bonachela, S., & Medrano, E. (2022). *Sistemas pasivos de calefacción en invernaderos mediterráneos* (Número March).
- Bournet, P. E., & Boulard, T. (2010). Effect of ventilator configuration on the distributed climate of greenhouses: A review of experimental and CFD studies. *Computers and Electronics in Agriculture*, 74(2), 195–217. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2010.08.007>
- Businger, J. A. (1963). The glasshouse (greenhouse) climate. *Physics of Plant Environment*, WR Van Wijk, Ed. (North Holland Publishing Co., Amsterdam, 1963).
- Cardona, J. P., Leal, J. J., & Ustariz, J. E. (2020). Mathematical modeling of white and black box in engineering education. *Formacion Universitaria*, 13(6), 105–118. <https://doi.org/10.4067/S0718-50062020000600105>
- Carrillo, I. T. (2023). *Predicción de variables de estaciones meteorológicas para hallar el flujo del aire en la Universidad Industrial de Santander*. Universidad Industrial de Santander.
- Carrión, P., Montalván, N., Paz, N., & Morante, F. (2020). Volcanic geomorphology: A review of worldwide research. *Geosciences (Switzerland)*. <https://doi.org/10.3390/geosciences10090347>
- Cengel, Y. A. (2007). Transferencia de calor y masa - Un enfoque práctico. *Biotechnology Letters*, 18(12), 1419–1422. <https://doi.org/10.1007/BF00129346>
- Cervantes, M. Á. (2015, junio 9). *FITOSOFIA: PANTALLAS TÉRMICAS*. <https://fitosofia.blogspot.com/2015/06/pantallas-termicascoc.html>
- Chahidi, L. O., Fossa, M., Priarone, A., & Mechaqrane, A. (2021). Energy saving strategies in sustainable greenhouse cultivation in the mediterranean climate – A case study. *Applied Energy*, 282(PA), 116156. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116156>
- Chen, C., Ling, H., Zhai, Z. (John) Z. J., Li, Y., Yang, F., Han, F., & Wei, S. (2018). Thermal performance of an active-passive ventilation wall with phase change material in solar greenhouses. *Applied Energy*, 216(February), 602–612. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.02.130>

- Chinlli, C. M. (2021). *Modelización de Series Temporales modelos clásicos y SARIMA*.
- Chu, C.-R. R., Lan, T.-W. W., Tasi, R.-K. K., Wu, T.-R. R., & Yang, C.-K. K. (2017). Wind-driven natural ventilation of greenhouses with vegetation. *Biosystems Engineering*, *164*, 221–234. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.10.008>
- Comisión Europea. (2022). *JRC Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) - European Commission*. [https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/fr/#api\\_5.2](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/fr/#api_5.2)
- Condustrial. (2020). *2ACM150*.
- Díaz, D. C., Bojacá, C. R., & Schrevels, E. (2018). Modeling the suitability of the traditional plastic greenhouse for tomato production across Colombian regions. *Acta Horticulturae*, *1205*, 857–864. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2018.1205.109>
- Duarte, A. R., Osorio, R., & Mahecha, D. C. (2022). Simulación climática de un invernadero para rosas. *Revista Politécnica*, *18(36)*, 107–114. <https://doi.org/10.33571/rpolitec.v18n36a8>
- El Kolaly, W., Ma, W., Li, M., & Darwesh, M. (2020). The investigation of energy production and mushroom yield in greenhouse production based on mono photovoltaic cells effect. *Renewable Energy*, *159*, 506–518. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.05.144>
- Espinal-Montes, V., López-Cruz, I. L., Rojano-Aguilar, A., Romantchik-Kriuchova, E., & Ramírez-Arias, A. (2015). Determination of night-time thermal gradients in a greenhouse using computational thermal dynamics. *Agrociencia*, *49(3)*, 233–247.
- FAO, O. de las N. U. para la A. (2002). *Agricultura mundial: hacia los años 2015/2030*. <https://www.fao.org/3/y3557s/y3557s06.htm>
- Firfiris, V. K. K., Fragos, V. P. P., Kotsopoulos, T. A. A., & Nikita-Martzopoulou, C. (2020). Energy and environmental analysis of an innovative greenhouse structure towards frost prevention and heating needs conservation. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, *40*(March). <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100750>
- Flores, J., & Montero, J. I. (2008). Computational fluid dynamics (CFD) study of large scale screenhouses. *Acta Horticulturae*, *797*, 117–122. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2008.797.14>
- Flores, J., Rojano, F., Aguilar, C. E., Villagran, E., & Villarreal, F. (2022). Greenhouse Thermal Effectiveness to Produce Tomatoes Assessed by a Temperature-Based Index. *Agronomy*, *12(5)*, 1–14. <https://doi.org/10.3390/agronomy12051158>
- Flores, J., Villarreal, F., Rojano, A., & Schdmith, U. (2019). CFD to analyze energy exchange by convection in a closed greenhouse with a pipe heating system. *Acta Universitaria*, *29*, 1–16. <https://doi.org/10.15174/au.2019.2112>
- Fuentes, M. K. (1987). *A simplified thermal model for Flat-Plate photovoltaic arrays*. <https://www.osti.gov/biblio/6802914>
- Gary, C., Jones, J. W., & Tchamitchian, M. (1998). Crop modelling in horticulture: state of the art. *Scientia Horticulturae*, *74(1–2)*, 3–20.

- 
- Gholamalizadeh, E., & Kim, M. H. (2014). Three-dimensional CFD analysis for simulating the greenhouse effect in solar chimney power plants using a two-band radiation model. *Renewable Energy*, 63, 498–506. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.10.011>
- González, O., & Torres, C. (2012). Actualización nota técnica heladas 2012. *IDEAM, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales*, 11.
- Gorjian, S., Calise, F., Kant, K., Ahamed, M. S., Copertaro, B., Najafi, G., Zhang, X., Aghaei, M., & Shamshiri, R. R. (2021). A review on opportunities for implementation of solar energy technologies in agricultural greenhouses. *Journal of Cleaner Production*, 285. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124807>
- Gorjian, S., Ebadi, H., Najafi, G., Singh Chandel, S., & Yildizhan, H. (2021). Recent advances in net-zero energy greenhouses and adapted thermal energy storage systems. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 43. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100940>
- Gourdo, L., Fatnassi, H., Bouharroud, R., Ezzaeri, K., Bazgaou, A., Wifaya, A., Demrati, H., Bekkaoui, A., Aharoune, A., Poncet, C., Poncet, C., & Bouriden, L. (2019). Heating canarian greenhouse with a passive solar water–sleeve system: Effect on microclimate and tomato crop yield. *Solar Energy*, 188(May), 1349–1359. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.07.004>
- Granados, M. R., Hernandez, J., Bonachela, S., Lopez Hernandez, J. C., & Magán, J. J. (2017). *Modificación del clima en invernaderos pasivos con pantallas fijas y móvil. February*.
- Guerra, K., de Zayas, M. R., & González, M. V. (2013). Análisis bibliométrico de las publicaciones relacionadas con proyectos de innovación y su gestión en Scopus, en el período 2001-2011. *Revista Cubana de Información en Ciencias de la Salud*, 24(3), 281–294.
- Ha, T., Lee, I.-B., Hwang, H.-S., Hong, S.-W., Seo, I.-H., & Bitog, J. P. (2011). Development of an assessment model for greenhouse using geothermal heat pump system. *American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting 2011, ASABE 2011*, 3, 2105–2114.
- Haldorai, S., Gurusamy, S., & Pradhapraj, M. (2019). A review on thermal energy storage systems in solar air heaters. *International Journal of Energy Research*, 43(12), 6061–6077. <https://doi.org/10.1002/er.4379>
- Hassanien, R. H. E. R. H. E., Li, M., & Dong Lin, W. (2016). Advanced applications of solar energy in agricultural greenhouses. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 989–1001. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.095>
- Herrera, G., Montalván, N., Carrión, P., & Bravo, Lady. (2021). Worldwide research on socio-hydrology: A bibliometric analysis. *Water (Switzerland)*. <https://doi.org/10.3390/w13091283>
- Hongkang, W., Li, L., Yong, W., Fanjia, M., Haihua, W., & Sigrimis, N. A. (2018). Recurrent neural network model for prediction of microclimate in solar greenhouse.

- IFAC-PapersOnLine*, 51(17), 790–795.
- HortiCultivos. (2014, agosto 22). *Pantallas térmicas para el control del clima | Revista HortiCultivos*. <https://www.horticultivos.com/agricultura-prottegida/invernaderos/pantallas-termicas-para-el-control-del-clima-3/>
- Hosseini, F., Motevali, A., Nabavi, A., Hashemi, S. J., & Chau, K. wing. (2019). Energy-Life cycle assessment on applying solar technologies for greenhouse strawberry production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 116(May), 109411. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109411>
- Katzin, D., van Henten, E. J., & van Mourik, S. (2022). Process-based greenhouse climate models: Genealogy, current status, and future directions. *Agricultural Systems*, 198, 103388.
- Kitta, E., Katsoulas, N., & Savvas, D. (2012). Shading effects on greenhouse microclimate and crop transpiration in a cucumber crop grown under mediterranean conditions. *Applied Engineering in Agriculture*, 28(1), 129–140.
- Lam, C. K. G., & Bremhorst, K. (1981). A Modified Form of the k- $\epsilon$  Model for Predicting Wall Turbulence. *Journal of Fluids Engineering*, 103(3), 456–460. <https://doi.org/10.1115/1.3240815>
- Lee, C.-G., Cho, L.-H., Kim, S.-J., Park, S.-Y., & Kim, D.-H. (2021). Comparative analysis of combined heating systems involving the use of renewable energy for greenhouse heating. *Energies*, 14(20). <https://doi.org/10.3390/en14206603>
- Liu, Y., & Yang, Y. (2017). Use of nano- $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> to improve binary eutectic hydrated salt as phase change material. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 160(August 2016), 18–25. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.09.050>
- López, J. H., Fitz, E., & Rosales, J. E. (2018). Evaluation of heat-pipe solar collectors for heating a single-span greenhouse. *ASABE 2018 Annual International Meeting*. <https://doi.org/10.13031/aim.201800295>
- Ma, J. J. (2019). Direct wind heating greenhouse underground heating system. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 300(4). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/300/4/042056>
- Martínez, S. (2017). *Climatología y Fenología Agrícola*. 1–51.
- Misra, R., Bansal, V., Agrawal, G. Das, Mathur, J., & Aseri, T. K. (2013). CFD analysis based parametric study of derating factor for Earth Air Tunnel Heat Exchanger. *Applied Energy*, 103, 266–277. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.09.041>
- Mistriotis, A., Bot, G. P. A., Picuno, P., & Scarascia-Mugnozza, G. (1997). Analysis of the efficiency of greenhouse ventilation using computational fluid dynamics. *Agricultural and Forest Meteorology*, 85(3), 217–228. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(96\)02400-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0168-1923(96)02400-8)
- Montero, J. I., Muñoz, P., Sánchez-Guerrero, M. C., Medrano, E., Piscia, D., & Lorenzo, P. (2013). Shading screens for the improvement of the night-time climate of unheated greenhouses. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 11(1), 32–46.

- <https://doi.org/10.5424/sjar/2013111-411-11>
- Müller, E. (2006). *Manual de diseño para viviendas con climatización pasiva*. 63.
- Nations United. (2020). *¿Qué es el cambio climático? | Naciones Unidas*.  
<https://www.un.org/es/climatechange/what-is-climate-change>
- Nimmermark, S. A., & Maslak, K. (2015). Measured energy use in a greenhouse with tomatoes compared to predicted use by a mechanistic model including transpiration. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 2015, 65–70.
- Ntinis, G. K. G. K., Dannehl, D., Schuch, I., Rocks, T., & Schmidt, U. (2020). Sustainable greenhouse production with minimised carbon footprint by energy export. *Biosystems Engineering*, 189, 164–178.  
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.11.012>
- Ntinis, G. K. G. K., Neumair, M., Tsadilas, C. D. C. D., & Meyer, J. (2017). Carbon footprint and cumulative energy demand of greenhouse and open-field tomato cultivation systems under Southern and Central European climatic conditions. *Journal of Cleaner Production*, 142, 3617–3626.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.106>
- Ortiz, G. A., Chamorro, A. N., Acuña, J. F., Lopez, I. L., & Villagran, E. (2023). *Calibration and implementation of a dynamic energy balance model to estimate the temperature in a plastic covered Colombian greenhouse*.
- Ortiz, G. A., Pichimata, M. A., & Villagran, E. (2021). Research on the microclimate of protected agriculture structures using numerical simulation tools: A technical and bibliometric analysis as a contribution to the sustainability of under-cover cropping in tropical and subtropical countries. *Sustainability (Switzerland)*, 13(18).  
<https://doi.org/10.3390/su131810433>
- Paksoy, H. Ö., & Beyhan, B. (2015). Thermal energy storage (TES) systems for greenhouse technology. En *Advances in Thermal Energy Storage Systems: Methods and Applications*. Woodhead Publishing Limited.  
<https://doi.org/10.1533/9781782420965.4.533>
- PAVCO. (2020). *Manual Tecnico Tubosistemas Presion PVC*. 2, 22.
- Pérez, C., Ramírez, J. A., López, I. L., Arteaga, R., & Cervantes, R. (2021). 3D computational fluid dynamics modeling of temperature and humidity in a humidified greenhouse. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 13(1), 17–31.  
<https://doi.org/10.5154/r.inagbi.2020.10.060>
- Piscia, D., Montero, J. I., Baeza, E. J., & Bailey, B. J. (2012). A CFD greenhouse night-time condensation model. *Biosystems Engineering*, 111(2), 141–154.  
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.11.006>
- Qiu, Z., Song, M., Wang, J., Zhang, X., Liu, H., Meng, T., & Song, Y. (2014). Experiment effect of application to new assembly type solar double effect greenhouse. *Nongye Gongcheng Xuebao/Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 30(19), 232–239. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-6819.2014.19.028>

- Rasheed, A., Na, W. H. W. H., Lee, J. W. J. W., Kim, H. T. H. T., & Lee, H. W. H. W. (2021). Development and validation of air-to-water heat pump model for greenhouse heating. *Energies*, *14*(15), 1–22. <https://doi.org/10.3390/en14154714>
- Reyes-Rosas, A., Molina-Aiz, F. D., Valera, D. L., López, A., & Khamkure, S. (2017). Development of a single energy balance model for prediction of temperatures inside a naturally ventilated greenhouse with polypropylene soil mulch. *Computers and Electronics in Agriculture*. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.08.020>
- Riggio, G. (2017). Indicadores bibliométricos de la actividad científica de la República Dominicana. (Tesis doctoral) Programa Oficial de Doctorado en Documentación. Universidad Carlos III de Madrid, España. <https://doi.org/DOI:10.13140/RG.2.2.14126.41287>
- Ritter Energie. (2020). *Evacuated tube collectors*.
- Rojano, A., Salazar, R., Flores, J., Lopez, I., Schmidt, U., & Medina, A. (2013). *Experimental and Computational Modeling of Venlo Type Greenhouse*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:117250891>
- Salazar, R., López, I. L., & Cruz, A. C. S. (2018). Dynamic energy balance model in a greenhouse with tomato cultivation: Simulation, calibration and evaluation. *Revista Chapingo, Serie Horticultura*, *25*(1), 45–60. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2018.07.014>
- Salinas, D. A., Romero, F., Numa, S., Villagrán, E., Donado, P., & Galindo, J. R. (2022). Insights into Circular Horticulture: Knowledge Diffusion, Resource Circulation, One Health Approach, and Greenhouse Technologies. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *19*(19). <https://doi.org/10.3390/ijerph191912053>
- Seo, Y., & Seo, U.-J. U. J. (2021). Ground source heat pump (GSHP) systems for horticulture greenhouses adjacent to highway interchanges: A case study in South Korea. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *135*(August 2020), 110194. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110194>
- Sepúlveda, S. (2014). Radiación Solar: Factor Clave Para El Diseño De Sistemas Fotovoltaicos. *Revista Mundo FESC*, *8*, 60–65. <file:///C:/Users/HP/User/Downloads/Dialnet-RadiacionSolar-5109240.pdf>
- Sethi, V. P. P., & Sharma, S. K. K. (2008). Survey and evaluation of heating technologies for worldwide agricultural greenhouse applications. *Solar Energy*, *82*(9), 832–859. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.02.010>
- Svensson. (2022). *Especificaciones de la pantalla Oscura 10070 R FR W*.
- Swinbank, W. C. (1963). Long-wave radiation from clear skies. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, *89*(381), 339–348. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/qj.49708938105>
- Taki, M., Ajabshirchi, Y., Ranjbar, S. F. S. F., Rohani, A., & Matloobi, M. (2016). Modeling and experimental validation of heat transfer and energy consumption in an innovative greenhouse structure. *Information Processing in Agriculture*, *3*(3), 157–

174. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2016.06.002>

Tesicol - Tejidos de Colombia S.A. (2023). *Alumitex® | Tesicol - Tejidos de Colombia S.A.*  
<https://www.tesicol.com.co/productos/alumitex/alumitex>

Valera, D., Molina, F., & Álvarez, A. (2008). Ahorro y Eficiencia Energética en Invernaderos. En *Eficiencia y ahorro energetico*.  
[https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos\\_10995\\_Agr07\\_AyEE\\_en\\_invernaderos\\_A2008\\_9e4c63f5.pdf](https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10995_Agr07_AyEE_en_invernaderos_A2008_9e4c63f5.pdf)

Van, N. J., & Waltman, L. (2013). {VOSviewer} manual. *Leiden: Univeriteit Leiden, March*, 1–29.  
[http://www.vosviewer.com/documentation/Manual\\_VOSviewer\\_1.6.1.pdf](http://www.vosviewer.com/documentation/Manual_VOSviewer_1.6.1.pdf)

Van, N. J., & Waltman, L. (2021). Manual de VOSviewer. *Univeriteit Leiden, July*.  
[http://www.vosviewer.com/documentation/Manual\\_VOSviewer\\_1.6.1.pdf](http://www.vosviewer.com/documentation/Manual_VOSviewer_1.6.1.pdf)

Vesbo. (2023). *Tuberías Oxy-Pex para calefacción por piso radiante*. 100.

Villagrán, E., & Bojacá, C. (2019a). CFD simulation of the increase of the roof ventilation area in a traditional Colombian greenhouse: Effect on air flow patterns and thermal behavior. *International Journal of Heat and Technology*, 37(3), 881–892.  
<https://doi.org/10.18280/ijht.370326>

Villagrán, E., & Bojacá, C. (2019b). Study of natural ventilation in a Gothic multi-tunnel greenhouse designed to produce rose (*Rosa spp.*) in the high-Andean tropic. *Ornamental Horticulture*, 25(2), 133–143. <https://doi.org/10.14295/oh.v25i2.2013>

Villagran, E., & Bojacá, C. R. (2019). Microclimate i simulation in a greenhouse used for roses production under conditions of intertropical climate | Simulación del microclima en un invernadero usado para la producción de rosas bajo condiciones de clima intertropical. *Chilean Journal of Agricultural and Animal Sciences*, 35(2), 137–150.  
<https://doi.org/10.4067/S0719-38902019005000308>

Villagran, E., & Bojacá, C. R. (2020). Study using a CFD approach of the efficiency of a roof ventilation closure system in a multi-tunnel greenhouse for nighttime microclimate optimization. *Revista Ceres*, 67(5), 345–356.  
<https://doi.org/10.1590/0034-737x202067050002>

Villagrán, E., & Bojacá, C. R. (2019c). Numerical evaluation of passive strategies for nocturnal climate optimization in a greenhouse designed for rose production (*Rosa spp.*). *Ornamental Horticulture*, 25(4), 351–364. <https://doi.org/10.1590/2447-536X.v25i4.2087>

Villagran, E., Bojacá, C. R., & Rojas Bahamon, N. A. (2018). Determinación del comportamiento térmico de un invernadero espacial colombiano mediante dinámica de fluidos computacional. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 21(2). <https://doi.org/10.31910/rudca.v21.n2.2018.1070>

Villagrán, E., Flores, J., Akrami, M., & Bojacá, C. (2021). Influence of the height in a Colombian multi-tunnel greenhouse on natural ventilation and thermal behavior: Modeling approach. *Sustainability (Switzerland)*, 13(24).

<https://doi.org/10.3390/su132413631>

- Villagrán, E., Flores, J., Akrami, M., & Bojacá, C. (2022). Microclimatic Evaluation of Five Types of Colombian Greenhouses Using Geostatistical Techniques. *Sensors*, 22(10). <https://doi.org/10.3390/s22103925>
- Villagrán, E., Flores, J., Bojacá, C., & Akrami, M. (2021). Evaluation of the Microclimate in a Traditional Colombian Greenhouse Used for Cut Flower Production. *Agronomy*, 11(7), 1330.
- Villagran, E., Jaramillo, J. E., & León-Pacheco, R. I. (2020). Natural ventilation in greenhouse with anti-insect screens evaluated with a computational fluid model. *Agronomy Mesoamerican*, 31(3), 709–728. <https://doi.org/10.15517/AM.V31I3.40782>
- Villagran, E., Ramirez-Matarrita, R., Rodriguez, A., León-Pacheco, R. I., Jaramillo, J. E., Ramirez, R., Rodriguez, A., Pacheco, R. L., Jaramillo, J. E., Ramirez-Matarrita, R., Rodriguez, A., & León-Pacheco, R. I. (2020). Simulation of the thermal and aerodynamic behavior of an established screenhouse under warm tropical climate conditions: A numerical approach. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 15(4), 487–499. <https://doi.org/10.18280/ijstdp.150409>
- Villagrán, E., & Rodriguez, A. (2021). Analysis of the thermal behavior of a new structure of protected agriculture established in a region of tropical climate conditions. *Fluids*, 6(6), 223. <https://doi.org/10.3390/fluids6060223>
- Waller, R., Kacira, M., Magadley, E., Teitel, M., & Yehia, I. (2022). Evaluating the Performance of Flexible, Semi-Transparent Large-Area Organic Photovoltaic Arrays Deployed on a Greenhouse. *AgriEngineering*, 4(4), 969–992. <https://doi.org/10.3390/agriengineering4040062>
- Yu, O.-Y. Y., Ferrell, J., Kim, H.-Y. Y., & Houser, J. (2018). NEXUS: Integrated sustainable energy for enhancing farm productivity. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 188(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/188/1/012012>
- Zhang, D., Zhu, D., Wang, J., Wei, H., Zong, X., Tan, Y., & Liu, Q. (2014). Design and experiment of semi-automatic double-heat source forcing cultivation of temperature control for sweet cherry. *Nongye Gongcheng Xuebao/Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 30(17), 228–234. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-6819.2014.17.029>
- Zhang, L., Xu, P., Mao, J., Tang, X. X., Li, Z., & Shi, J. (2015). A low cost seasonal solar soil heat storage system for greenhouse heating: Design and pilot study. *Applied Energy*, 156, 213–222. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.07.036>
- Zhang, X., Lv, J., Dawuda, M. M., Xie, J., Yu, J., Gan, Y., Zhang, J., Tang, Z., & Li, J. (2019). Innovative passive heat-storage walls improve thermal performance and energy efficiency in Chinese solar greenhouses for non-arable lands. *Solar Energy*, 190, 561–575. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.08.056>
- Zhang, X., Wang, H., Zou, Z., & Wang, S. (2016). CFD and weighted entropy based simulation and optimisation of Chinese Solar Greenhouse temperature distribution. *Biosystems Engineering*, 142, 12–26. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.11.006>