



***Innovaciones para la horticultura en ambientes protegidos de zonas tropicales: opción intensificación sostenible de la agricultura familiar en el contexto del cambio climático, en América Latina y el Caribe. ATN-RF-16343-RG***

**Producto 2: Modelo de prototipos de estructura para sistema de horticultura de ambiente protegido por país**

**Autores**

Edwin Andrés Villagran (AGROSAVIA), Andrea Onelia Rodríguez (AGROSAVIA), Rommel Igor León (AGROSAVIA), Jorge Eliecer Jaramillo (AGROSAVIA), Roberto Ramírez Matarrita (INTA), José Isaac Mejía (IDIAP), Glenny López (IDIAP) y Leddy Roperó (AGROSAVIA)



2021



Códigos JEL: Q16

FONTAGRO (Fondo Regional de Tecnología Agropecuaria) es un mecanismo único de cooperación técnica entre países de América Latina, el Caribe y España, que promueve la competitividad y la seguridad alimentaria. Las opiniones expresadas en esta publicación son de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista del Banco Interamericano de Desarrollo (BID), del Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), FONTAGRO, de sus Directores Ejecutivos ni de los países que representan.

El presente documento ha sido preparado por el equipo ejecutor, los investigadores Edwin Andrés Villagran, Andrea Onelia Rodríguez, Jorge Eliecer Jaramillo y Rommel Igor León de AGROSAVIA.

Copyright © 2021 Banco Interamericano de Desarrollo. Esta obra se encuentra sujeta a una licencia Creative Commons IGO 3.0 Reconocimiento-NoComercial- SinObrasDerivadas (CC-IGO 3.0 BY-NC-ND) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/igo/legalcode>) y puede ser reproducida para cualquier uso no comercial otorgando el reconocimiento respectivo al BID. No se permiten obras derivadas. Cualquier disputa relacionada con el uso de las obras del BID que no pueda resolverse amistosamente se someterá a arbitraje de conformidad con las reglas de la CNUDMI (UNCITRAL). El uso del nombre del BID para cualquier fin distinto al reconocimiento respectivo y el uso del logotipo del BID no están autorizados por esta licencia CC-IGO y requieren de un acuerdo de licencia adicional. Note que el enlace URL incluye términos y condiciones adicionales de esta licencia.

Esta publicación puede solicitarse a:

FONTAGRO

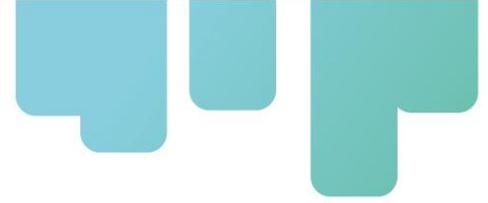
Correo electrónico: [fontagro@fontagro.org](mailto:fontagro@fontagro.org) [www.fontagro.org](http://www.fontagro.org)





## Contenido

Resumen .....	4
Introducción .....	6
Objetivos .....	8
Metodología .....	8
Resultados y discusión .....	30
Conclusiones .....	103
Referencias .....	105
Instituciones participantes.....	112



## Resumen

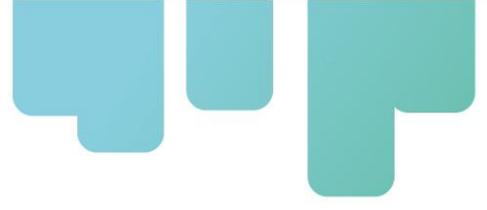
La agricultura protegida (AP) es un sistema de producción agrícola en el que suelen emplearse estructuras de cubierta que tienen diferentes niveles tecnológicos y permiten proteger de forma física los cultivos frente a condiciones climáticas adversas tales como precipitaciones y radiación solar excesiva. Adicionalmente, a través de estas se busca obtener algún grado de gestión sobre las condiciones de microclima, con el propósito de obtener mayor productividad, mejorar la calidad del producto y ampliar las áreas de producción a regiones donde las condiciones climáticas dificultan la producción agrícola a campo abierto (Castilla, 2002).

En el proyecto *Innovaciones para la horticultura en ambientes protegidos de zonas tropicales: opción intensificación sostenible de la agricultura familiar en el contexto del cambio climático en ALC*, financiado por el Fondo Regional de Tecnología Agropecuaria (Fontagro), se implementó la dinámica computacional de fluidos (CFD) mediante un modelo de simulación numérica que permita diseñar modelos geométricos de estructuras de agricultura protegida ventiladas naturalmente y que se adapten a las condiciones climáticas características de cuatro regiones de baja latitud. Para ello, se realizó la caracterización de las principales variables agroclimáticas de una región de baja latitud en Colombia, Panamá, Costa Rica y República Dominicana, y se establecieron parámetros de diseño para estructuras de agricultura protegida ventiladas naturalmente.

El modelo de simulación numérica CFD permitió definir el diseño de al menos una estructura de agricultura protegida adaptada a las condiciones climáticas locales de cada sitio específico en las cuatro regiones de estudio, así como algunos de los parámetros técnicos necesarios para la construcción real de los prototipos de estructuras de agricultura protegida en cada región de estudio.

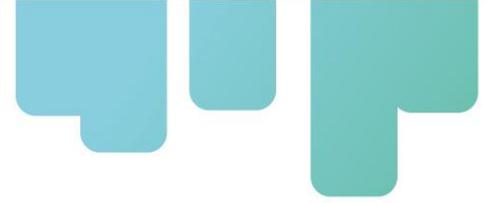
Esta metodología se compone de dos fases principales: una primera fase de caracterización de las principales variables (temperatura, humedad del aire, radiación solar, precipitación, dirección y velocidad del viento) en cada región de estudio, y una segunda fase que contempla el uso de la información climática como insumo de entrada e inicio para alimentar un modelo de simulación numérica CFD mediante el cual se establezca el diseño de la estructura óptimo para cada sitio experimental en Costa Rica, República Dominicana, Panamá y Colombia.

Se concluyó, mediante el análisis numérico, que las estructuras de agricultura protegida que mejor comportamiento ofrecían en cada región eran los invernaderos ventilados de forma natural y las estructuras de casa malla. En el caso de esta última, es recomendable seleccionar la malla que mejor flujo de aire permita hacia el interior de la estructura, puesto que sus propiedades aerodinámicas afectan la velocidad del movimiento de los flujos de



aire y, por ende, la distribución espacial de la temperatura.

**Palabras clave:** horticultura protegida, AP, simulación numérica, dinámica computacional de fluidos (CFD), invernaderos, casa malla, modelación estructuras, caracterización climática.



## Introducción

En la actualidad, una de las temáticas más abordadas a nivel mundial en cuanto a la disponibilidad de alimentos está relacionada con la seguridad alimentaria de las naciones y el comercio mundial de alimentos (McGuire, 2015). Hoy es cada vez más difícil garantizar y proporcionar productos alimenticios de alta calidad organoléptica y nutricional debido, principalmente, a dos factores: el aumento continuo de la población mundial (altamente concentrada en las ciudades) y los efectos adversos de factores bióticos y abióticos generados por el fenómeno del cambio climático, que hacen que los sistemas agrícolas sean más vulnerables y se vean mayormente afectados (Noble et al., 2014; Wilson, 2013). Por ello, es recomendable que los países en desarrollo se enfoquen en aumentar las capacidades de formación técnica, tecnológica y de infraestructura del sector agrícola, para que estas se conviertan en herramientas que permitan combatir los desafíos presentes y futuros. En las regiones tropicales, el uso de estructuras de agricultura protegida de tipo pasivo representa una de las alternativas más utilizadas en la generación de una producción agrícola intensiva; a través de su implementación, se busca obtener los beneficios normalmente otorgados por este sistema de producción, así como alimentos de alta calidad con un concepto de producción sostenible.

La agricultura protegida (AP) es un sistema de producción agrícola que usa estructuras de protección que pueden presentar un nivel tecnológico bajo, moderado o muy elevado. El uso de estas estructuras permite proteger a los cultivos de factores bióticos y abióticos que limitan la producción agrícola. Así mismo, permiten obtener mayores rendimientos por unidad de área y productos cosechados con mayor inocuidad, así como ampliar las áreas de producción hacia regiones donde las condiciones climáticas dificultan la producción agrícola a campo abierto (Castilla, 2002).

Desde hace cuatro décadas, la producción hortícola u ornamental bajo cubierta ha tenido un crecimiento exponencial. Actualmente, se considera que existen por lo menos 5.800.000 hectáreas (ha) en este sistema productivo, y se implementa en unos 150 países a nivel mundial (Baeza et al., 2020).

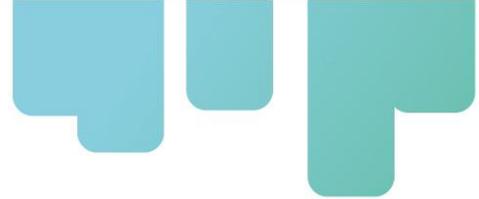
Una de las discusiones más relevantes a nivel académico y productivo en el sector agrícola, en las últimas décadas, está referida al diseño de las estructuras de agricultura protegida. Al respecto, se han planteado diversas metodologías con relación al uso de herramientas de modelado y simulación, las cuales permiten obtener estructuras de agricultura protegida que se adapten exitosamente a las condiciones climáticas, sociales y económicas específicas de cada territorio (Vanthoor et al., 2011).

El objetivo de este trabajo de investigación es aplicar una metodología de simulación numérica que permita diseñar al menos una tipología de estructuras de agricultura



protegida, y que esta pueda ser adaptada a las condiciones climáticas locales de cada sitio experimental. Esta metodología se compone de dos fases principales: una primera etapa de caracterización de las principales variables (temperatura y humedad del aire, radiación solar, precipitación, dirección y velocidad del viento) en cada región de estudio, y una segunda fase en la cual se contempla el uso de la información climática como insumo de entrada e inicio para alimentar un modelo de simulación numérica (CFD) mediante el cual se establezca un diseño de estructura óptimo para cada sitio experimental en Costa Rica, República Dominicana, Panamá y Colombia.

Este trabajo de investigación forma parte del proyecto *Innovaciones para la horticultura en ambientes protegidos de zonas tropicales: opción intensificación sostenible de la agricultura familiar en el contexto del cambio climático en ALC*, financiado por el Fondo Regional de Tecnología Agropecuaria (Fontagro).



## Objetivos

### Objetivo general

Implementar un modelo de simulación numérica que permita diseñar estructuras de agricultura protegida ventiladas de forma natural y que se adapten a las condiciones climáticas características de cuatro regiones de baja latitud.

### Objetivos específicos

- Caracterizar las principales variables agroclimáticas de una región de baja altitud, en Colombia, Panamá, Costa Rica y República Dominicana.
- Establecer parámetros de diseño para estructuras de agricultura protegida ventiladas de forma natural.
- Implementar un modelo de simulación numérica CFD a partir del cual sea posible diseñar por lo menos una estructura de agricultura protegida que se adapte a las condiciones climáticas locales de cada sitio específico en las cuatro regiones de estudio.
- Definir los parámetros técnicos necesarios para la construcción física de prototipos de estructuras de agricultura protegida en cada región de estudio.

## Metodología

### 1.1. Caracterización agroclimática de las zonas piloto

El análisis de la información agroclimática, realizados con la finalidad de su caracterización, se consideran como un insumo necesario para realizar las simulaciones numéricas a través de las cuales sea posible diseñar las estructuras en cada región de estudio. En este caso de simulación de estructuras dentro del proyecto, se consideró analizar los datos históricos de al menos cinco años de datos registrados en una estación climática cercana a la zona de influencia de los sitios experimentales.

#### Revisión y preparación de los datos

En esta etapa se incluyen la definición de las variables climáticas, la elección de las estaciones meteorológicas de la zona de influencia, así como la gestión para la obtención de la información y su consolidado. Para realizar la caracterización de la región de estudio, se determinan algunas variables mínimas necesarias, óptimas e ideales, las cuales se muestran en la tabla 1.

**Tabla 1.** Variables necesarias en la caracterización

Ideales	Óptimas	Mínimas
---------	---------	---------

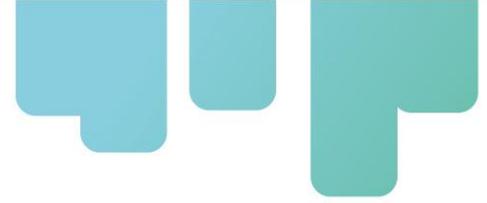


<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Temperatura máxima, mínima y media</li><li>▪ Precipitación</li><li>▪ Humedad relativa</li><li>▪ Brillo solar</li><li>▪ Evapotranspiración</li><li>▪ Velocidad y dirección del viento</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Temperatura máxima, mínima y media</li><li>▪ Velocidad del viento</li><li>▪ Brillo solar</li><li>▪ Precipitación</li><li>▪ Humedad relativa</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Temperatura máxima</li><li>▪ Velocidad del viento</li><li>▪ Radiación o brillo solar</li></ul>
--	---	--

Fuente: Elaboración propia

De igual manera, se realizó una estandarización de un formato para facilitar la gestión y el tratamiento de los datos, de acuerdo con la escala de tiempo, de la siguiente manera:

- Formato de datos a escala horaria: En las columnas debe tener fecha, año, mes, día, hora, código de la estación y su ubicación con la latitud (°), longitud (°) y altitud (m s n. m.), y el dato de la variable en la unidad establecida. En las filas tendrá la serie de tiempo. Como ejemplo, se muestran los registros de la estación con código 23070020 para la variable de precipitación (**Tabla 2**):

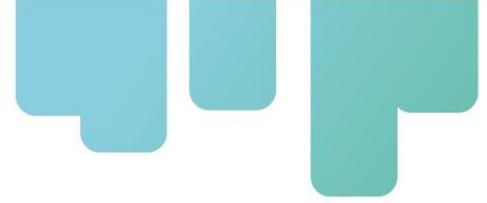


**Tabla 2.** Ejemplo de formato a escala horario

Fecha	Hora	Año	Día	Mes	Código	Latitud (°)	Longitud (°)	Altitud (m)	Precipitación (mm)
1/09/2017	00:00:00	2017	9	1	23070020	-74,8484	5,8555	24	0
1/09/2017	00:10:00	2017	9	1	23070020	-74,8484	5,8555	24	0
1/09/2017	00:20:00	2017	9	1	23070020	-74,8484	5,8555	24	0
1/09/2017	00:30:00	2017	9	1	23070020	-7,8484	5,8555	24	0
1/09/2017	00:40:00	2017	9	1	23070020	-74,8484	5,8555	24	0
1/09/2017	00:50:00	2017	9	1	23070020	-74,8484	5,8555	24	0
1/09/2017	01:00:00	2017	9	1	23070020	-74,8484	5,8555	24	0
1/09/2017	01:10:00	2017	9	1	23070020	-74,8484	5,8555	24	0
1/09/2017	01:20:00	2017	9	1	23070020	-74,8484	5,8555	24	0
1/09/2017	01:30:00	2017	9	1	23070020	-74,8484	5,8555	24	0
1/09/2017	01:40:00	2017	9	1	23070020	-74,8484	5,8555	24	0
1/09/2017	01:50:00	2017	9	1	23070020	-74,8484	5,8555	24	0
1/09/2017	02:00:00	2017	9	1	23070020	-74,8484	5,8555	24	3
1/09/2017	02:10:00	2017	9	1	23070020	-74,8484	5,8555	24	5
1/09/2017	02:20:00	2017	9	1	23070020	-74,8484	5,8555	24	1,1
1/09/2017	02:30:00	2017	9	1	23070020	-74,8484	5,8555	24	0
1/09/2017	02:40:00	2017	9	1	23070020	-74,8484	5,8555	24	0
1/09/2017	02:50:00	2017	9	1	23070020	-74,8484	5,8555	24	0
1/09/2017	03:00:00	2017	9	1	23070020	-74,8484	5,8555	24	0
1/09/2017	03:10:00	2017	9	1	23070020	-74,8484	5,8555	24	0
1/09/2017	03:20:00	2017	9	1	23070020	-74,8484	5,8555	24	0

Fuente: Elaboración propia

- Formato de datos a escala diaria: En las columnas debe estar la fecha, el año, mes, día, código de la estación y su ubicación con la latitud (°), longitud (°) y altitud (m s. n. m.), así como el dato de la variable. En las filas tendrá la serie de tiempo. Como ejemplo, de datos a escala diaria se muestra la Tabla 3.



**Tabla 3.** Ejemplo de formato a escala diaria.

Fecha	Año	Día	Mes	Código	Latitud (°)	Longitud (°)	Altitud (m)	Precipitación (mm)
1/01/1980	1980	1	1	23070020	-74,8484	5,8555	24	9,1
2/01/1980	1980	1	2	23070020	-74,8484	5,8555	24	5,6
3/01/1980	1980	1	3	23070020	-74,8484	5,8555	24	6,2
4/01/1980	1980	1	4	23070020	-74,8484	5,8555	24	0,7
5/01/1980	1980	1	5	23070020	-74,8484	5,8555	24	1,2
6/01/1980	1980	1	6	23070020	-74,8484	5,8555	24	0
7/01/1980	1980	1	7	23070020	-74,8484	5,8555	24	0
8/01/1980	1980	1	8	23070020	-74,8484	5,8555	24	0
9/01/1980	1980	1	9	23070020	-74,8484	5,8555	24	0
10/01/1980	1980	1	10	23070020	-74,8484	5,8555	24	0
11/01/1980	1980	1	11	23070020	-74,8484	5,8555	24	0
12/01/1980	1980	1	12	23070020	-74,8484	5,8555	24	0
13/01/1980	1980	1	13	23070020	-74,8484	5,8555	24	0
14/01/1980	1980	1	14	23070020	-74,8484	5,8555	24	0
15/01/1980	1980	1	15	23070020	-74,8484	5,8555	24	0

Fuente: Elaboración propia

### Control de calidad de datos

Los registros de las variables climáticas frecuentemente contienen errores, los cuales se producen por diversas causas como, por ejemplo, equivocaciones en la toma de datos y la digitación, por problemas en la transmisión y/o el archivado, así como por fallas de los sensores, cambios de los instrumentos u otros aspectos. Por ello, después de la obtención y preparación de la información, es importante realizar una verificación de la calidad de los datos. En el desarrollo de este proceso es importante conocer las condiciones climáticas locales para definir si un dato es erróneo o no.

De esta manera, antes de realizar la caracterización, se plantea un análisis de las series históricas en el que puedan considerarse controles mínimos (Sorza, 2016).

#### Control 1. Revisión de rangos

En este paso se revisa que el dato climático se encuentre en el rango físico de la variable meteorológica. La determinación de los valores límites dependerá de la región de estudio. Como un ejemplo de ello, se puede tener en cuenta:

- *Temperatura media:* Datos entre -10 y 50°C.

- 
- *Precipitación*: Se consideran como error los valores menores a 0 mm.
  - *Humedad relativa*: Entre 0 % y 100 %.

En la metodología se plantea que los rangos sean definidos a partir de los estudios climáticos previos de la región y el conocimiento experto. De igual manera, si se quiere rechazar un dato, se sugiere que este sea evaluado con los mismos estudios previos.

### **Control 2.** Consistencia interna

La coherencia se verifica a través de la comparación de diferentes variables que tienen relaciones físicas. En este caso, se identifican y descartan los registros en los que la temperatura mínima sea mayor a la temperatura máxima en la misma fecha.

### **Control 3.** Días consecutivos con igual valor

Este paso tiene como propósito revisar los periodos en los cuales hay un determinado número de valores consecutivos iguales. La definición del número de registros sucesivos dependerá de la flexibilidad que quiera dar el usuario a la confiabilidad de los datos y del conocimiento que se tenga del comportamiento de las variables.

### **Control 4.** Saltos entre observaciones consecutivas

Identificar si la variación de un dato con respecto a otro (por ejemplo, dos días consecutivos) es muy grande. La definición de los rangos de variación dependerá del área de estudio.

El último control se plantea de acuerdo con lo expuesto en (Dorado & León, 2011):

### **Control 5.** Datos atípicos

Busca revisar si los datos atípicos corresponden a un evento extremo o a un error. Para ello, se utilizan las desviaciones estándar a  $4\delta$  y a  $3\delta$ , y se evalúa si los datos por encima y por debajo de estos rangos responden o no a la influencia de un fenómeno de variabilidad como, por ejemplo, El Niño y La Niña. De acuerdo con esto, se decide si eliminar o no el dato de la serie.

Luego de pasar por los diferentes controles, las series de precipitación se aceptan con máximo el 20 % de datos faltantes y el resto de las variables con no más del 30 % de faltantes.

Después de implementados los controles de calidad y en los casos que sea necesario, se sugiere llenar los datos faltantes, para lo cual están los métodos referenciados a continuación.

### **Interpolación lineal**

Para estimar este valor, se toma la media del dato que antecede y sucede al dato faltante para estimar su valor. Se puede expresar de la siguiente manera:



$$d_n = (d_{n-1} + d_{n+1})/2$$

Donde  $d_n$  es el dato faltante;  $d_{n-1}$  el dato del día anterior, y  $d_{n+1}$  el dato del día posterior. Este método es utilizado para datos de temperatura y humedad relativa, usualmente a escala diaria, y para los cuales se tengan los datos inmediatamente anterior y posterior al faltante.

### **Método de regresión lineal**

Consiste en la determinación de un valor faltante entre dos estaciones. Se extrae a partir del método de los mínimos cuadrados de una recta de regresión lineal de tipo:

$$y = mx + b$$

Donde  $y$  es el valor estimado y  $x$  el valor de la estación completa.

Para implementar este método, se debe tener en cuenta que las estaciones tengan una proximidad geográfica y un número de años comunes entre sí.

#### **Análisis y caracterización**

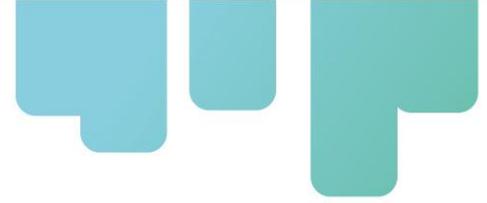
El análisis de las variables agroclimáticas locales se realiza a través de diferentes procesos estadísticos, los cuales permitan establecer su comportamiento. Por lo tanto, en esta etapa se realiza el análisis espacial y temporal de los datos climáticos, después del proceso de control de calidad. Entre los resultados más importantes para la fase de modelación y diseño se consideran:

- Temperatura máxima absoluta: La máxima temperatura en el mes.
- Velocidad absoluta: La máxima velocidad del viento en el mes.
- Velocidad del viento y dirección predominante mensual.
- Comportamiento mensual de la precipitación y las temperaturas (máxima, mínima y media).
- Comportamiento mensual de la radiación o del brillo solar.
- Análisis temporal, de acuerdo con la escala que se tenga, de las demás variables.

### **Diseño de estructuras de agricultura protegida mediante el uso de simulaciones numéricas CFD**

El diseño de estructuras de agricultura protegida (E-AP) debe ser un proceso integral y minucioso en el que se analicen las condiciones climáticas locales y una de serie de elementos en conjunto ligados a la estructura misma, tales como material de cobertura, orientación, geometría y tamaño de la estructura, área de las superficies de ventilación, presencia o no de pantallas porosas a prueba de insectos o pantallas de sombrío (Choab et al., 2019; McCartney & Lefsrud, 2018; Villagran et al., 2019).

A nivel mundial, existen una cantidad considerable de modelos de E-AP que han sido concebidas de acuerdo con unas condiciones climáticas, sociales, culturales y económicas



propias de cada territorio (Righini et al., 2020; Vanthoor et al., 2011). Por lo tanto, la selección del modelo adecuado para cada región es una tarea bastante compleja, la cual requiere de un análisis serio por parte de los tomadores de decisiones, los agricultores y hasta los mismos constructores de E-AP.

La elección un modelo de E-AP inapropiado puede causar que las plantas se vean expuestas a condiciones de temperatura y humedad inadecuadas, y que sean sometidas a algún tipo de estrés. Estas condiciones ocasionarán una reducción de la producción de los cultivos, la aparición de enfermedades y hasta la muerte de las plantas, factores que sin duda generan una afectación económica sobre los productores y una insostenibilidad del sistema productivo (Choab et al., 2019; Chu & Lan, 2019; Jung et al., 2020).

El criterio de diseño para E-AP de tipo pasivo en regiones cálidas y húmedas debe enfocarse en maximizar la eficiencia de la ventilación natural y evitar el uso de ventilación mecánica para labores de enfriamiento y deshumidificación. En caso contrario, se generarían costos adicionales para adquirir equipamiento y costos ambientales asociados al requerimiento energético del funcionamiento de dichos equipos (Chu et al., 2017; Pakari & Ghani, 2019; Valera-Martínez et al., 2016).

La ventilación natural se puede cuantificar y evaluar a partir de diferentes metodologías como las explicadas por Akrami et al. (2020). Respecto a la finalidad del diseño, es útil contar con una herramienta ágil y precisa que permita evaluar los flujos de aire generados en el interior de una E-AP y su eficiencia de enfriamiento en las condiciones climáticas locales específicas del sitio de estudio (Chu & Lan, 2019; Villagran & Bojacá, 2019a).

Una de las herramientas más utilizadas actualmente, como soporte a procesos metodológicos de diseños de E-AP, debido a que permite integrar todos los aspectos relacionados con la ventilación natural de invernaderos y su relación con la generación de microclimas, es la dinámica de fluidos computacional (CFD).

Esta metodología ha sido utilizada con éxito y permite estudiar los flujos de aire y su distribución espacial en el interior de invernaderos mediante el uso de modelos de simulación 2D y 3D en estado estacionario o la distribución espacio-temporal a través de simulaciones transitorias (Baeza et al., 2009; Benni et al., 2016; Flores-Velázquez et al., 2011; He et al., 2017; Li et al., 2019; Ould Khaoua et al., 2006; Tong & Christopher, 2018; Villagran et al., 2019).

La simulación CFD se divide en tres etapas principales: i) preproceso; ii) solución, y iii) post-proceso (Figura 1). Cada una de estas etapas debe realizarse siguiendo los procedimientos establecidos como buenas prácticas de simulación numérica CFD, los cuales pueden ser consultados en Tominaga et al. (2008). Para el caso específico de esta investigación se usó el software comercial de Dinámica de fluidos computacional Ansys Fluent V 19.1, para las 3

fases contempladas de preproceso, solución y pos-proceso.

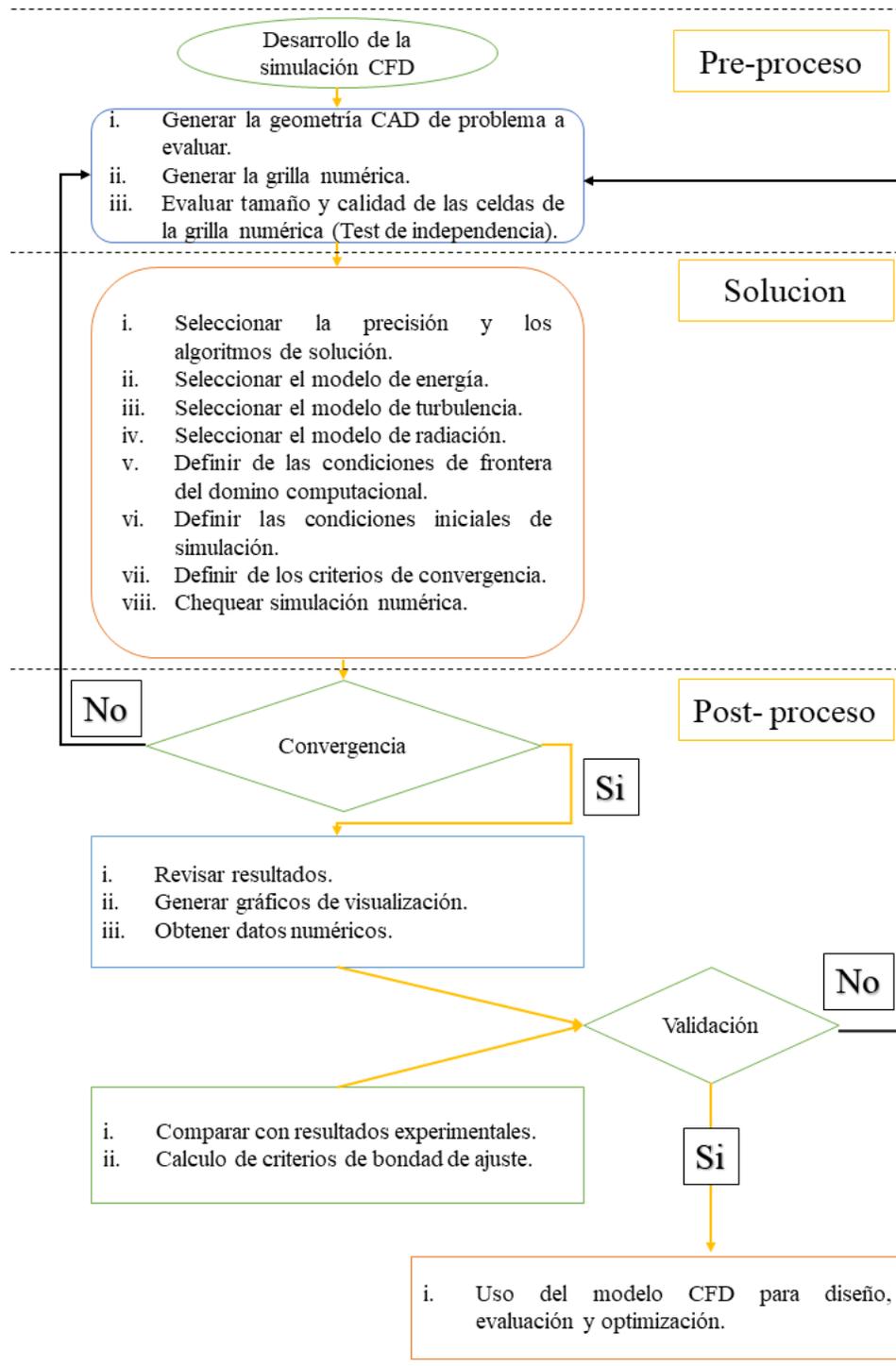
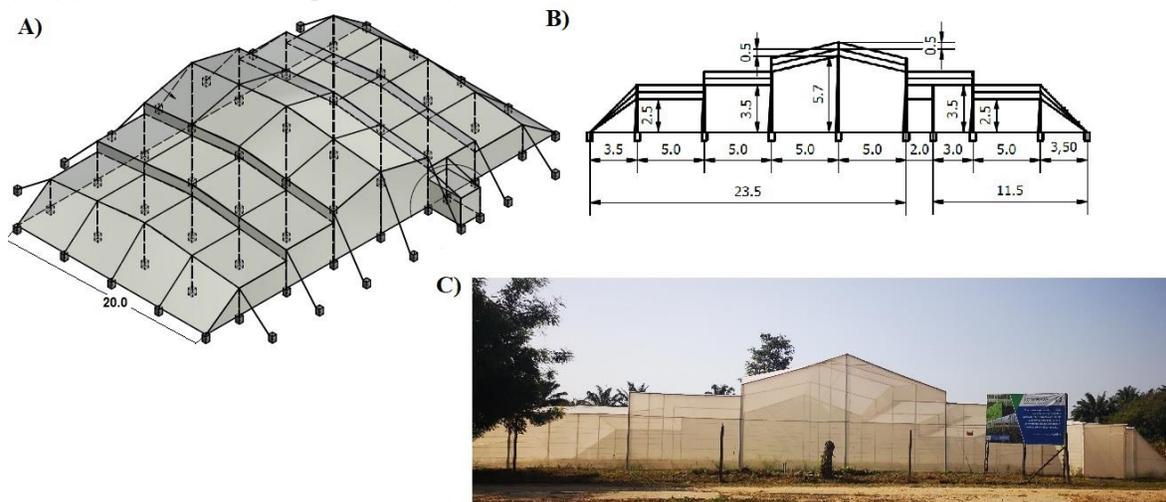


Figura 1. Etapas de la simulación CFD.

Fuente: Elaboración propia

## Preproceso

En esta primera etapa de la simulación, se debe definir el tipo de problema de ingeniería que se quiere evaluar y la forma en que se abordará desde la simulación numérica CFD. Por lo tanto, se debe buscar que el modelo numérico pueda representar de manera confiable el comportamiento real del flujo estudiado, y que este, a su vez, se ajuste a la disponibilidad de recursos informáticos (Van Dooren & Sapounas, 2013). Esta etapa incluye la generación virtual de la geometría en estudio y su dominio computacional, la cual se realiza mediante software de diseño asistido por computador (CAD). Este software puede ser de uso comercial o de código abierto, y su elección depende estrictamente del usuario (Figura 2). Así mismo, el usuario debe definir el número de dimensiones del estudio numérico (2D - 3D). En este aspecto ha resultado característico y confiable que, cuando se trata del diseño de E-AP, y con la finalidad de encontrar resultados en un corto tiempo, se apliquen modelos bidimensionales (2D). Por el contrario, cuando se requieren evaluaciones espacio temporales de microclima de las E-AP, es recomendable el uso de un modelo tridimensional (3D) (Baeza, 2007; Villagran, 2016).



**Figura 2.** Modelo CAD. *a.* Modelo tridimensional (3D); *b.* Modelo bidimensional (2D); *c.* Prototipo real.

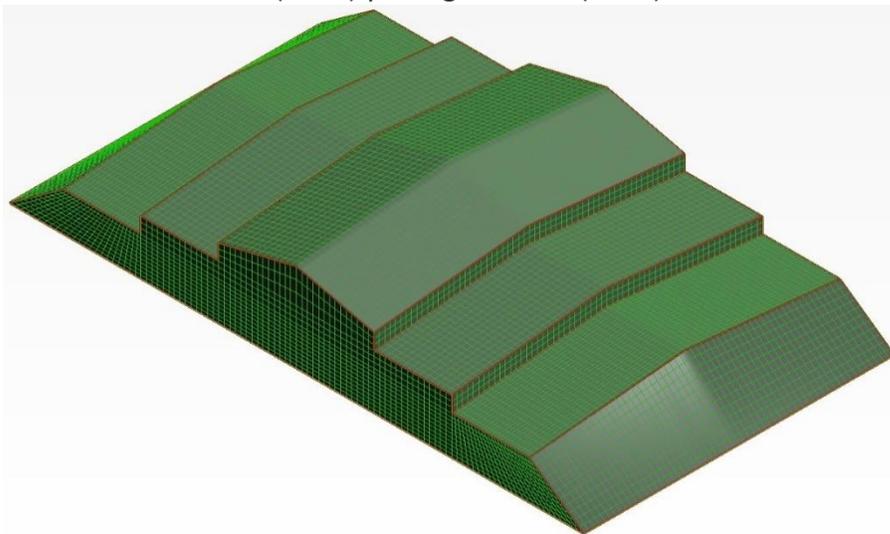
Fuente: Elaboración propia

El paso posterior consiste en dividir el modelo CAD y su dominio computacional en una grilla numérica. Esta grilla debe construirse con un tamaño y calidad adecuados para cada uno de sus elementos (Figura 3). Este proceso debe permitir obtener soluciones independientes al tamaño de la grilla y una precisión aceptable (Franke et al., 2010; Villagran et al., 2012). La definición del tamaño de los elementos de la grilla numérica se debe establecer a través de una prueba de independencia de grilla. En esta prueba de sensibilidad, se evalúa la variación del valor de la velocidad del aire y la temperatura en el interior de las E-AP, el cual está relacionado con el número de elementos de la grilla. Generalmente, se inicia con un grilla numérica de pocos elementos y se va aumentando el tamaño de estos hasta lograr que la



variación en magnitud del valor numérico de variables temperatura y velocidad del aire en el interior sea baja, tal como se realiza en los trabajos desarrollados por

Román-Roldán et al. (2019) y Villagran et al. (2019).



**Figura 3.** Grilla numérica de un modelo tridimensional (3D).

Fuente: Elaboración propia

### **Solución**

En esta etapa de la simulación, se debe tener claridad y total entendimiento físico del problema de flujo de aire estudiado, así como definir las interacciones de transferencia de calor y de masa que darán como resultado la generación de un microclima en el interior de las E-AP (Boulard, 2011; Villagran & Bojacá, 2019b). El movimiento de un fluido y su interacción con los fenómenos de transporte vía convección libre en el interior de una E-AP pueden ser descritos mediante las ecuaciones de Navier-Stokes. Este conjunto de ecuaciones diferenciales parciales no lineales se discretiza a ecuaciones algebraicas que tienen solución numérica.

La naturaleza turbulenta del flujo de aire se diseña a través de modelos de turbulencia promediados por Reynolds (RANS). Entre este grupo de modelos, el más usado es el  $k-\epsilon$ , debido a la precisión de los resultados y al ahorro en costo computacional para este tipo de estudios (Flores-Velázquez et al., 2011; Mesmoudi et al., 2017). Por otro lado, los efectos de la flotabilidad del aire generados por los cambios de densidad, los cuales son a su vez producidos por el aumento de temperatura en el interior de las E-AP, se simulan a través de la aproximación de Boussinesq (Baeza et al., 2009).

Así mismo, el cambio del contenido de vapor de agua se puede simular mediante el modelo de transporte de especies; el efecto de la radiación solar mediante el modelo de ordenadas discretas, el cual permite simular la radiación solar en medios semitransparentes, y, por último, la presencia de cultivos y pantallas porosas a prueba de insectos, la cual se simula



como un medio poroso a través de la ley de Darcy (Flores-Velazquez et al., 2017; K. He et al., 2015; Reynafarje et al., 2020). Las ecuaciones de los modelos utilizados en la simulación numérica se resumen en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Modelos utilizados en la simulación numérica CFD

Modelo	Ecuación
Navier-Stokes	
Momento	$\frac{\partial(u_\phi)}{\partial x} + \frac{\partial(v_\phi)}{\partial y} + \frac{\partial(w_\phi)}{\partial z} = \Gamma \nabla^2 \phi + S_\phi$
Masa	
Energía	
Turbulencia	$\frac{\partial}{\partial x}(\rho k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M$
$k-\epsilon$	$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + \rho C_1 S_\epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{v \epsilon}} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} C_{3\epsilon} G_b k$
Aproximación Boussinesq	$(\rho - \rho_0)g = -\rho_0 \beta (T - T_0)g$
Transporte de especies	$\nabla(\rho Y_i) = -\nabla J_i + R_i + E_i$
Medio poroso	$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\mu}{K} u + \rho \frac{Y}{\sqrt{K}} u u $
Radiación Ordenadas discretas	$\nabla \cdot \left( I_\lambda \left( \begin{smallmatrix} \Rightarrow \\ r \end{smallmatrix}, \begin{smallmatrix} \Rightarrow \\ s \end{smallmatrix} \right) \begin{smallmatrix} \Rightarrow \\ s \end{smallmatrix} \right) + (a_\lambda + \sigma_s) I_\lambda \left( \begin{smallmatrix} \Rightarrow \\ r \end{smallmatrix}, \begin{smallmatrix} \Rightarrow \\ s \end{smallmatrix} \right) = a_\lambda n^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I_\lambda \left( \begin{smallmatrix} \Rightarrow \\ r \end{smallmatrix}, \begin{smallmatrix} \Rightarrow \\ s \end{smallmatrix} \right) \Phi \left( \begin{smallmatrix} \Rightarrow \\ s \end{smallmatrix}, \begin{smallmatrix} \Rightarrow \\ s \end{smallmatrix} \right) d\Omega'$

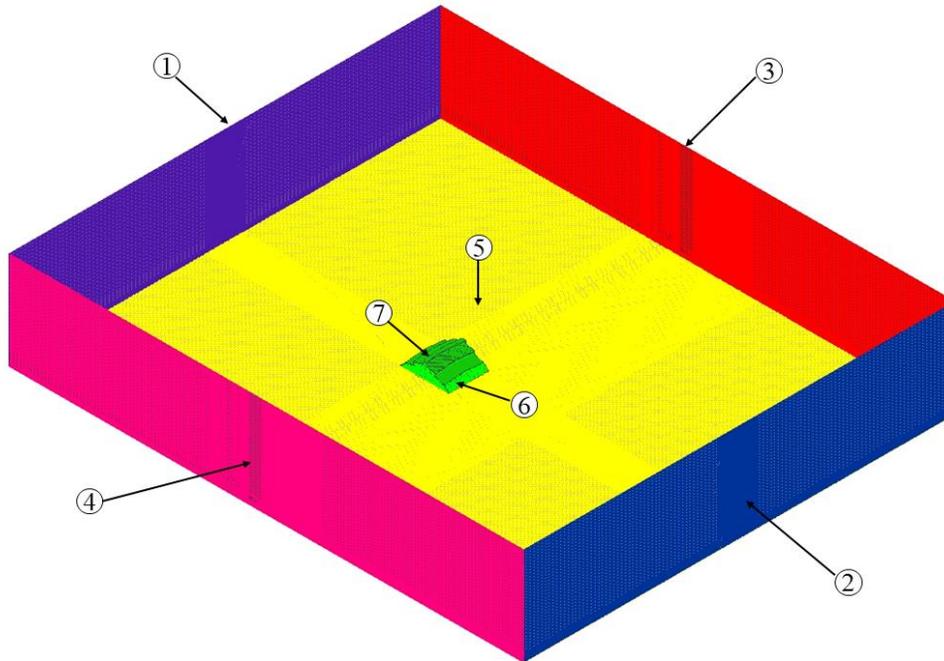
Fuente: Elaboración propia

Las simulaciones se realizan en estado estacionario a través de un método semi-implícito de solución para las ecuaciones vinculadas de presión y velocidad, a partir del algoritmo simple y de los criterios de convergencia para cada variable de estudio, como mínimo en  $10^{-3}$  y preferiblemente en  $10^{-6}$  (Baxevanou et al., 2018; Senhaji et al., 2019).

El siguiente paso es establecer las condiciones de frontera para el dominio computacional. Las principales condiciones de borde usadas son: perfil logarítmico de velocidad para el costado por donde ingresa el aire; límite de salida de presión por el costado opuesto a la entrada de aire; condición de simetría para el techo del dominio computacional y para los costados paralelos al movimiento de flujo (Figura 4). Se establece un límite de pared con tratamiento mejorado para el suelo y las paredes de la estructura, y un límite de medio poroso para las áreas de cultivo y zonas de cubierta o ventilación con mallas porosas a prueba de insectos.

Por último, deben establecerse las propiedades físicas y ópticas del material de cubierta y el suelo de la estructura, así como las propiedades físicas del aire, tales como densidad,

viscosidad, conductividad térmica y coeficiente de expansión térmica en función de la temperatura y altitud sobre el nivel del mar de la región de estudio.



**Figura 4.** Condiciones de frontera del dominio computacional: 1) entrada de aire; 2) salida de aire; 3-4) límite de simetría; 5) límite de pared mejorada (suelo); 6) límite de medio poroso, y 7) límite de pared mejorada (polietileno).

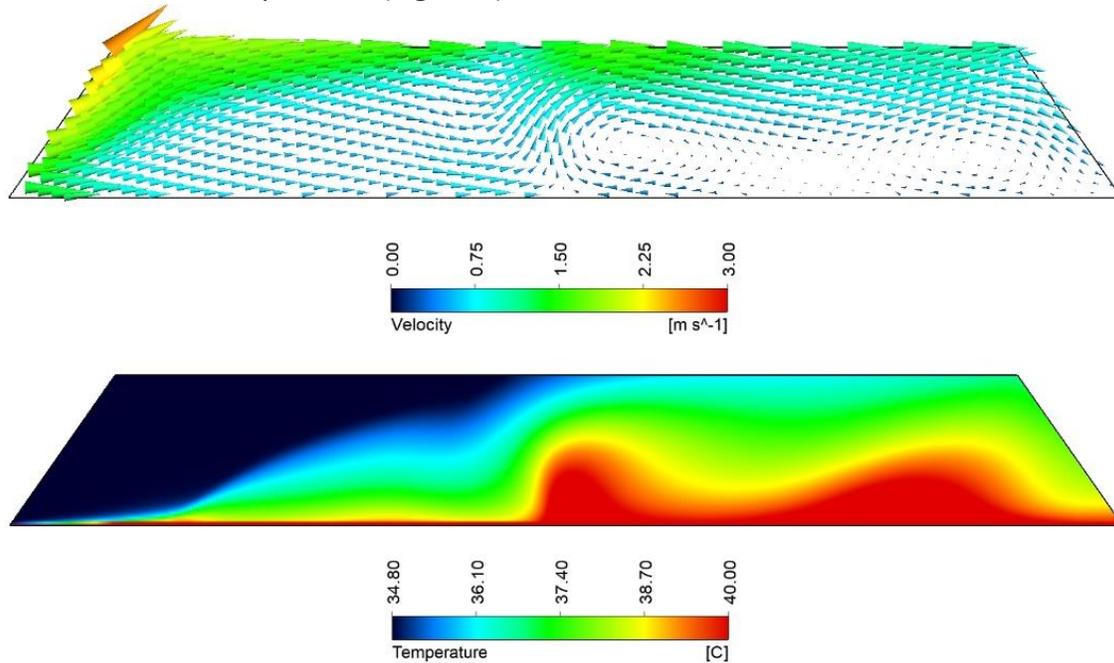
Fuente: Elaboración propia

### Posproceso

La robustez de la solución generada numéricamente por el modelo CFD debe ser aprovechada a través del análisis cuantitativo y cualitativo de los datos obtenidos para cada problema analizado. En esta fase, se debe contar con un modelo numérico validado experimentalmente, o realizar este proceso de validación, ya sea con pruebas experimentales o a través de la comparación con trabajos publicados en el ámbito académico. Una vez verificada la validez de la solución numérica, se procede a extraer y organizar los sets de datos necesarios para realizar los análisis del comportamiento de los flujos de aire y la distribución espacial de las variables de interés de estudio en el interior de las E-AP.

El análisis de los resultados cualitativos y cuantitativos permitirá definir cuál es el tipo y modelo de E-AP más adecuado para las condiciones específicas de la región de estudio. La finalidad de este proceso es obtener un diseño de estructura que permita obtener las máximas tasas de ventilación posibles y las condiciones de microclima lo más uniformes

posibles en el interior de la estructura seleccionada. Este proceso se realiza mediante el análisis de los campos de distribución espacial de los patrones de flujo de aire y la distribución de la temperatura (Figura 5).



**Figura 5.** Campos de flujo del aire y distribución de la temperatura en el interior de una casa de malla de techo plano.

Fuente: Elaboración propia

Una vez finalizada la verificación cualitativa de la solución numérica, se realiza el cálculo de las tasas de ventilación, así como de la velocidad y la temperatura media del flujo de aire en el interior de la estructura seleccionada. Este proceso se realiza extrayendo datos de valores puntuales en una sección transversal a 1,5 m de altura sobre el nivel del suelo, que es la región donde se establecen los cultivos, y se calculan tanto su valor medio como su desviación estándar.

$$\text{Media } (X) = \frac{\sum_{j=1}^i X_j}{N}$$

Donde  $X_j$  es la variable medida y  $N$  es el número total de datos.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_1^N (x_i - \bar{X})^2}{N}}$$

Donde  $x$  es la variable medida;  $x_i$  es la observación en punto  $i$ ;  $\bar{X}$  es el valor medio de la variable  $x$ , y  $N$  es el número de observaciones.

En el caso de las tasas de ventilación o de los índices de renovación, es necesario integrar



los caudales máxicos que salen a través de las áreas de ventilación dispuestas en la estructura seleccionada.

$$G = L \int_0^H u_y dy$$

Donde  $G$  es la tasa de flujo de aire ( $m^3s^{-1}$ );  $u_y$  es el componente de velocidad a través del área de ventilación ( $m/s$ );  $L$  y  $H$  son el ancho y el largo del área de ventilación, respectivamente ( $m$ ).

### **Criterios de diseño de estructuras de agricultura protegida**

Dentro de la agricultura protegida (AP) es posible encontrar una diversidad de estructuras que se diferencian en su nivel tecnológico y en su arquitectura. En los países tropicales es común encontrar invernaderos de tipo pasivo, casas de malla, casas sombra, túneles altos, macro túneles, micro túneles, cubiertas y semitechos. En el caso de las regiones cálidas, se propuso diseñar una estructura de casa malla y un invernadero ventilado naturalmente. Por lo tanto, para estos dos tipos de estructuras se deben considerar una serie de parámetros de diseño que influyen directamente sobre su comportamiento micro climático, y, por ende, sobre el crecimiento y desarrollo de los cultivos a establecer.

### **Criterios de diseño para invernaderos ventilados naturalmente**

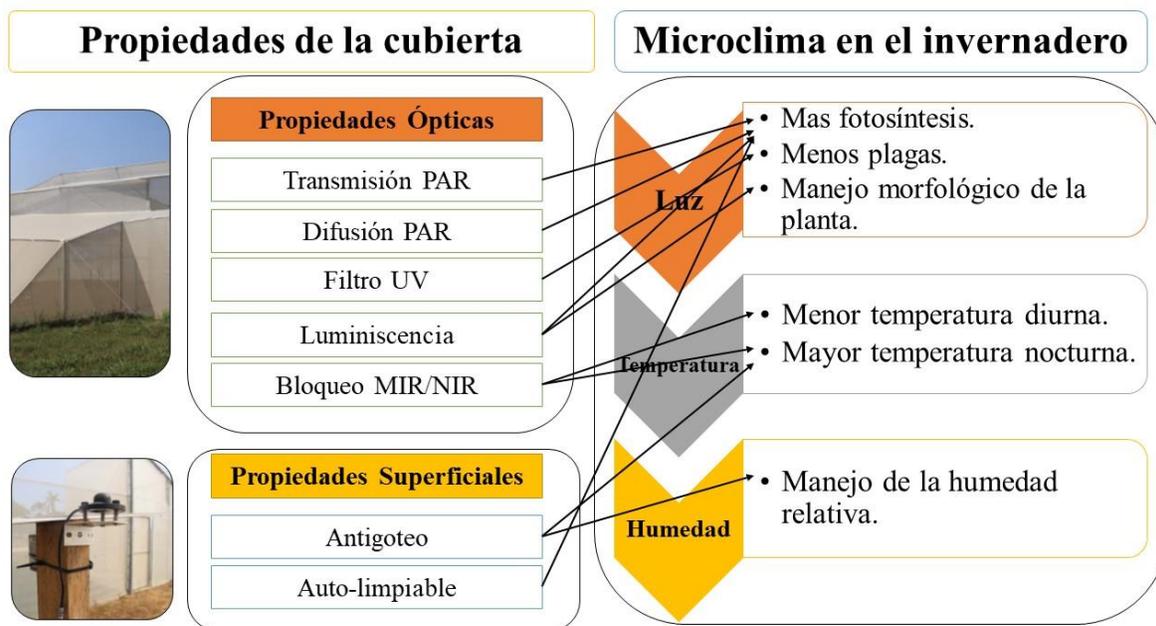
Un invernadero pasivo o ventilado de forma natural es aquel prototipo que depende totalmente del fenómeno de ventilación natural para la gestión del microclima. A través de los flujos de aire generados por efecto eólico (convección forzada), efecto térmico (convección libre) o una combinación de los dos, es posible regular los cambios de temperatura y humedad relativa del ambiente interior del invernadero, así como renovar los niveles de  $CO_2$  a valores cercanos al nivel atmosférico (Montero et al., 2008).

El material de cubierta dominante en los invernaderos pasivos a nivel tropical es el polietileno. Este tipo de material ha sido desarrollado desde la década de los setenta, y es en la actualidad el material que, a nivel comercial, mejor balance representa entre el costo y sus propiedades físicas y ópticas (Cajamar, 2012). Estas láminas de plástico flexible permiten construir estructuras de diferente forma y tamaño, y, a su vez, si se compara con otros tipos de cubierta como el policarbonato o el vidrio, son menos exigentes en términos de robustez estructural.

La selección del tipo de material de cubierta del invernadero es una de las decisiones que tiene influencia en el comportamiento microclimático de la estructura construida. El tipo de material influye sobre la cantidad y la calidad de la luz transmitida al ambiente interior, y, a su vez, tiene relación directa con el comportamiento de variables como temperatura y humedad (Castilla & Hernández, 2005).



El desarrollo industrial del polietileno como material de cubierta ha permitido obtener nuevos materiales. Más allá de ser una simple película plástica, tiene aditivos y algunos compuestos químicos que modifican y gestionan sus propiedades ópticas y físicas, y optimizan el microclima en el interior del invernadero, por lo que mejora su comportamiento térmico e higrométrico (Figura 6).

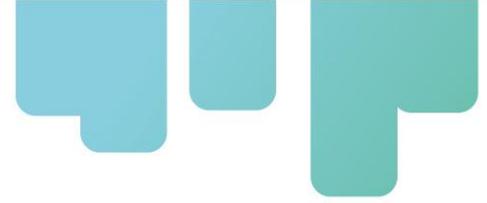


**Figura 6.** Propiedades ópticas del polietileno y su relación con las variables del microclima en el invernadero. Elaboración propia, adaptada de Cajamar (2012).

En climas cálidos con niveles elevados de radiación solar y baja nubosidad, es recomendable usar películas plásticas de moderada transmisión de radiación y de alta difusión. Estas películas plásticas difusoras permiten una distribución homogénea del haz de luz en el volumen interior de los invernaderos, y, a su vez, limitan la quemadura del follaje de las plantas. Así mismo, para este tipo de condiciones climáticas se recomienda el uso de plásticos con bloqueo NIR (antitérmicos), películas plásticas que permiten reducir la magnitud del gradiente térmico entre el ambiente interior y exterior del invernadero.

Por último, en el caso del cultivo de hortalizas también se recomienda el uso de películas plásticas con filtro UV, para proteger los frutos de quemaduras por efecto de la radiación

solar. Estos filmes también permiten el control de insectos, plagas y enfermedades, por lo que son denominados filmes antiplagas, antibotritis, antibemisia (Cajamar, 2012). Si, por el contrario, las condiciones limitantes para la producción agrícola son la elevada humedad en el ambiente, se recomienda usar filmes antigoteo. Estas películas plásticas contienen aditivos que en su cara interna permiten imitar el proceso de condensación y sus efectos

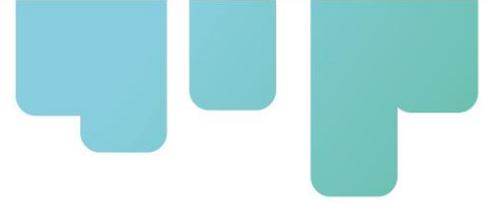


negativos sobre las plantas.

En nuestro contexto, como región tropical en la que las horas de luz no tienen una fuerte variación a través de los meses del año, la ubicación del invernadero debe estar más asociada a la dirección dominante de los vientos; esto garantiza que el flujo del aire que ingresa sea optimizado a través de las áreas de ventilación laterales y de techo dispuestas en el invernadero. Así mismo, la estructura debe construirse garantizando los parámetros definidos en diversas investigaciones de ventilación natural de invernaderos, los cuales se encuentran considerados en la Tabla 5.

**Tabla 5.** Parámetros de diseño para invernaderos ventilados naturalmente

<b>Parámetro</b>	<b>Descripción</b>	<b>Referencia</b>
Eje longitudinal del invernadero (largo)	El largo (L) del invernadero debe estar orientado de forma perpendicular a la dirección del viento incidente dominante de la región de estudio	Baeza et al. (2014).
Eje transversal del invernadero (ancho)	El ancho (A) del invernadero debería ser, de manera ideal, $A < 40$ m.	Baeza et al. (2014).
Altura del invernadero	Las estructuras con mayor altura tienen un mejor comportamiento térmico debido también a su mayor inercia térmica. Son preferibles estructuras altas que por cada $1 \text{ m}^2$ de superficie suelo cubierto ( $S_{sc}$ ) tengan por lo menos $3 \text{ m}^3$ de aire encerrado en volumen ( $V_a$ ), o lo que es equivalente a: $V_a/S_{sc} > 3$ .	Villagran (2016).
Pendiente longitudinal del invernadero	La pendiente longitudinal ( $S_L$ ), desde el centro del invernadero hasta sus costados, en estructuras con canal de desagüe plástica, debe ser equivalente a $S_L > 5 \%$ .	Villagran (2016).
Superficie de ventilación	La superficie de ventilación ( $S_v$ ) en relación con la superficie de suelo cubierta ( $S_{sc}$ ) debe ser equivalente a $S_v/S_{sc} > 30 \%$ .	Baeza et al. (2014).
Disposición de las áreas de ventilación	En los invernaderos con áreas de ventilación en los costados y fachadas, en combinación con áreas de ventilación en la zona de cubierta, se presenta un mejor comportamiento de los patrones de	Ould Khaoua et al. (2006).

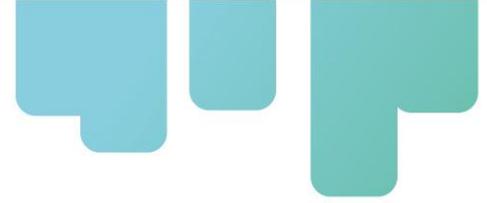


	flujo del aire y, por ende, del fenómeno de ventilación natural.	
Índices de renovación	Los índices de renovación horarios ( $I_r$ ) en un invernadero pasivo deben ser equivalentes a $I_r > 40$ volúmenes/hora.	Montero et al. (2008).
Presencia de pantallas porosas a prueba de insectos	La protección de las áreas de ventilación con mallas anti-insecto debe evaluarse en función de la reducción de los índices de renovación y del efecto negativo sobre las condiciones de microclima en el interior del invernadero.	López-Martínez et al. (2020).
Geometría de la estructura y forma de la cubierta	Para este aspecto debe buscarse una geometría lo más aerodinámica posible, que optimice los flujos de aire y maximice los índices de renovación horarios.	Villagran et al. (2019).
Homogeneidad térmica	Se puede considerar que un invernadero tiene un comportamiento espacial homogéneo cuando la temperatura en el interior de la estructura no varía en un valor superior a 2 °C entre las áreas de mayor y menor temperatura.	Zorzeto et al. (2014) y Villagran & Bojacá (2020).
Uso de pantallas de sombrío	Estas pantallas permiten reducir o limitar el paso de radiación hacia el área de cultivo en horas de alta insolación. Su instalación puede ser interna o externa, y, así mismo, móvil o fija.	Mahmood et al. (2018).

Fuente: Elaboración propia

### **Criterios de diseño para estructuras de casa malla**

El uso de estructuras de casa malla para la producción hortícola y frutícola a nivel mundial es cada vez más generalizado, razón por la cual las áreas de cultivo con este enfoque de producción presentan un constante aumento año tras año (Tanny et al., 2018). Este tipo de estructuras son una tecnología intermedia entre la producción a campo abierto y la producción bajo invernadero. En países tropicales con condiciones de clima cálido y húmedo, su implementación es una alternativa de intensificación sostenible para la



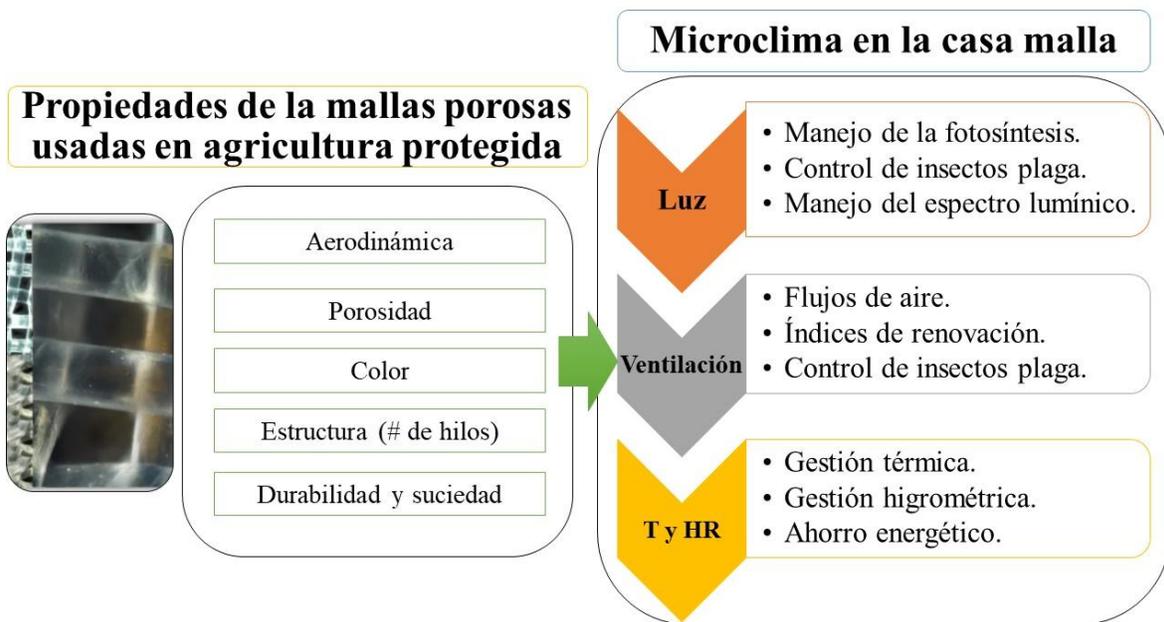
producción agrícola (Tanny, 2013; Vidogbéna et al., 2015).

Las casas de malla son generalmente estructuras más simples y de un menor costo que los invernaderos. Estas se construyen sobre pilares de metal o madera, y sobre una cubierta de soporte fabricada en cables de acero. En las paredes laterales se instalan pantallas porosas a prueba de insectos y en la cubierta, dependiendo del objetivo, se instalan pantallas de sombrío o con protección contra insectos (Mahmood et al., 2018; Villagran et al., 2020).

La implementación de estructuras de casa malla en función del tipo de material y pantalla utilizada permiten garantizar la producción de alimentos de alta calidad, limitar la vulnerabilidad de los sistemas de producción hortofrutícola a los efectos negativos causados por condiciones climáticas supra óptimas de radiación, temperatura, viento y precipitación (Mupambi et al., 2018). También es posible reducir el uso de pesticidas, ya que la pantallas porosas generan una restricción física para el ingreso de plagas al área de cultivo (Teitel et al., 2015).

Otros beneficios del uso de casas de malla están orientados a obtener una reducción del consumo de agua por ciclo de cultivo y a generar una modificación de los valores de evapotranspiración de las plantas (Haijun et al., 2015). Es posible también controlar los ciclos de crecimiento de cultivo mediante la modificación del espectro de radiación y obtener de forma transversal beneficios en la etapa de postcosecha en productos como tomate, cilantro y pimiento dulce, para así alargar su vida útil y mejorar sus propiedades organolépticas de sabor, color y textura (Ilić et al., 2015; Ilić & Fallik, 2017).

Las pantallas porosas a pruebas de insectos o de sombra que sirven como material de cubierta en las casas de malla poseen una serie de propiedades físicas, mecánicas y radiométricas, dentro de las cuales cabe mencionar el grado de porosidad, el tipo de textura y material, el color y el porcentaje de sombra generado (Figura 7). Todos estos parámetros influyen sobre los niveles de radiación solar y los flujos de aire de la ventilación natural. Por lo tanto, el microclima generado en el interior de la estructura está en función de dichos parámetros.



**Figura 7.** Propiedades de las mallas porosas y sus efectos sobre el microclima.  
Fuente: Elaboración propia

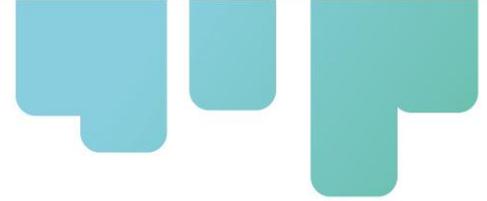
La gestión del microclima en el interior de las estructuras de casa malla, al igual que en los invernaderos de tipo pasivo, se realiza mediante los flujos de aire generados por la ventilación natural. Este método no demanda un consumo energético de fuentes de combustible no renovables, razón por la cual estas estructuras tienen un alto interés para los agricultores (Mahmood et al., 2018; Teitel et al., 2018a).

Para diseñar la casa malla, se deben tener en cuenta los parámetros mencionados en la



Tabla 6. Entre los principales factores se encuentran: el tipo de pantalla porosa a utilizar y sus propiedades aerodinámicas, así como la arquitectura y la configuración geométrica de la estructura, parámetros que tienen una alta influencia sobre los patrones de flujo de aire y, por

ende, sobre el microclima generado. Cabe destacar que en muchas regiones en las que se utilizan casa de malla, los diseños de las estructuras se realizan bajo criterios semi-empíricos establecidos por parte de los productores o de los constructores de este tipo de estructuras. Por lo tanto, en la gran mayoría de ocasiones las estructuras construidas no son las óptimas para las condiciones climáticas específicas de dicha región ni para las necesidades microclimáticas de los cultivos a establecer.



**Tabla 6.** Parámetros de diseño contemplados para estructura de casa malla

<b>Parámetro</b>	<b>Descripción</b>	<b>Referencia</b>
Geometría de la casa malla	Se debe buscar una forma geométrica que permita obtener flujos de aire adecuados, principalmente en la zona de cultivo.	Villagran et al. (2020).
Altura de la casa malla	Las alturas medias de las casas de malla son de 4 m, aunque es posible aumentar su altura hasta los 6 m. En términos del microclima obtenido, el beneficio de construir una estructura con una mayor altura debe ser evaluado experimentalmente <i>in situ</i> .	Teitel et al. (2017).
Tipo de malla porosa	La selección de la pantalla porosa se debe realizar en función del insecto plaga a controlar. Así mismo, se debe tener en cuenta la afectación sobre los flujos de aire que genera el nivel de porosidad y los parámetros aerodinámicos de la malla anti-insecto.	Cabrera et al. (2006).
Flujos de aire	Los flujos de aire deben ser uniformes en el interior de la estructura y, en lo posible, turbulentos y de velocidad moderada sobre la región de cultivo.	Villagran et al. (2020).
Homogeneidad térmica	Se puede considerar que una casa malla tiene un comportamiento espacial homogéneo cuando la temperatura en el interior de la estructura no varía en un valor superior a 2 °C, entre las áreas de mayor y menor temperatura.	Zorzeto et al. (2014).

Fuente: Elaboración propia

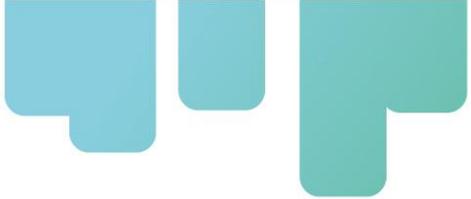


### **Generación de planos CAD**

Una vez culminada la etapa de simulación numérica y todos los análisis correspondientes, se procede a generar los planos CAD en 3D. Estos planos deben contener la información suficiente que permita a los constructores o productores construir la estructura a escala real. Como requerimientos mínimos deben contener: las dimensiones generales de la estructura y los materiales sugeridos, tanto para la cubierta como para la cimentación y estructura.

Es recomendable realizar una adecuada selección del terreno para la construcción de cada una de las estructuras, donde: (i) no existan problemas asociados a inundaciones o fallas geológicas; (ii) haya vías de comunicación, tanto para el ingreso de insumos y materiales como para la salida de los productos cosechados; (iii) exista disponibilidad de agua para riego y una fuente de energía eléctrica.

Por último, se debe mencionar que los productores que no cuenten con los recursos económicos necesarios para establecer las estructuras de acuerdo con las recomendaciones pueden construirla de forma autónoma, respetando las dimensiones, la forma geométrica y los materiales de cubierta establecidos en esta investigación.



## Resultados y discusión

Para diseñar las estructuras adaptadas a las condiciones específicas de la región de estudio en cada uno de los cuatro países, se contemplaron las variables climáticas analizadas en cada una de las caracterizaciones. Los materiales de cubierta fueron seleccionados de acuerdo con la disponibilidad existente a nivel comercial en cada uno de los países.

Los resultados que se mostrarán a continuación contienen los patrones de flujo de aire y la distribución espacial de la temperatura obtenidos mediante simulación CFD con un modelo bidimensional previamente validado. Se incluyen también los planos CAD 3D de cada una de las estructuras finales definidas para Colombia, Panamá, Costa Rica y República Dominicana.

Se debe destacar que, para definir cada una de estas estructuras, se realizó un estudio que contempló por lo menos 8 tipos diferentes, los cuales variaban en forma y tamaño. La estructura final construida fue la que mejores comportamientos ofreció.

Resultados para Colombia

### **Caracterización climática**

#### **Descripción de la zona piloto**

La zona piloto de este proyecto en Colombia está localizada en el centro de investigación Caribia, de AGROSAVIA, en el municipio Zona Bananera, del departamento del Magdalena, región Caribe. El lugar se encuentra ubicado geográficamente en las coordenadas 10,764 °N y 74,147 °W, con una elevación de 23,9 m s. n. m (Figura 8).



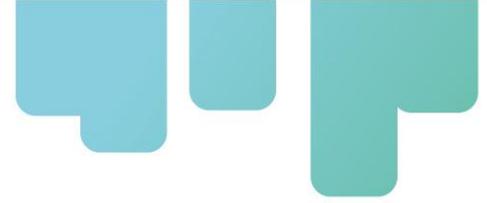
**Figura 8.** Ubicación de la zona piloto en Colombia. C. I. Caribia, departamento del Magdalena, región Caribe colombiana.

Fuente: Elaboración propia

La región Caribe se encuentra ubicada en la parte norte del país y está integrada por los departamentos de La Guajira, Magdalena, Atlántico, Cesar, Córdoba, Sucre y Bolívar, en su parte continental, y, San Andrés y Providencia en su parte insular. Esta región está conformada por tierras bajas y planas, principalmente; no obstante, parte del territorio está enmarcado por las estribaciones de las tres cordilleras, específicamente en Córdoba, Bolívar y Cesar. Así mismo, en la región se encuentra la Sierra Nevada de Santa Marta, que se distingue por ser una de las mayores fuentes hídricas para los departamentos de Magdalena, Cesar y La Guajira (Meisel-Roca et al., 2006).

De acuerdo con (Hann, 1991), aparte de la Sierra Nevada de Santa Marta, el Caribe colombiano se puede considerar como una región definida por condiciones de piso térmico basal de trópico, con una tendencia a la aridez, aunque ciertas áreas presentan variaciones. El clima, en general, tiende a tener características áridas, con épocas de sequía y lluvia bien diferenciadas. Según Gutiérrez (1991), de acuerdo con la clasificación climática de Köppen, en esta región predomina el clima de tipo tropical lluvioso de sabana con invierno seco.

El departamento del Magdalena, de nuevo sin considerar la Sierra Nevada de Santa Marta, registra una temperatura media promedio multianual entre los 26 °C y los 30 °C, y una variación de la precipitación media multianual entre los 500 mm y los 2000 mm. Los menores promedios mensuales de lluvias se presentan durante los meses de diciembre a marzo. En esta temporada seca disminuye la formación de nubes, dando lugar a cielos despejados y altas temperaturas. La temporada de lluvias se presenta entre abril y



noviembre, durante el verano del hemisferio norte, cuando el movimiento ascendente del aire aumenta y favorece la formación de nubes y lluvias.

### **Análisis de la información climática de la zona piloto**

El análisis climático local se realizó con base en la información de una estación ubicada en el C. I. Caribia, el cual cuenta con series horarias de los últimos seis años (2012 - 2017), de las variables de precipitación, temperaturas máximas, mínimas y medias, humedad relativa, radiación solar, velocidad y dirección del viento de la región estudiada.

### **Precipitación y temperaturas (máxima, mínima y media)**

El promedio multianual de la precipitación es de 664 mm y tiene un comportamiento bimodal con picos en mayo y octubre, con promedios de aproximadamente 100 mm y 140 mm, respectivamente. Las menores precipitaciones se presentan en el periodo diciembre-marzo, con un valor no mayor a 20 mm en el mes (Figura 9). En esta zona, las mayores precipitaciones se dan entre las 3:00 p.m. y las 4:00 p.m., por lo que se infiere que la mayor parte de las lluvias tienen un origen de tipo convectivo, es decir, que la acumulación de humedad en la atmósfera y la formación de nubes se desarrollan por el calor generado durante las mañanas y parte de la tarde, cuando se registran los mayores valores de radiación.

Las temperaturas promedio multianual máxima, media y mínima están alrededor de los 34 °C, 29 °C y 23 °C, respectivamente. Las mayores temperaturas se dan durante los meses de abril y mayo, y las menores hacia noviembre y enero. La temperatura media registra valores entre 29,7 °C y 29,4 °C en abril-mayo, y empiezan a disminuir gradualmente hasta los 27,5 °C, en febrero (Figura 9).

En relación con el ciclo diurno de la temperatura, los valores más bajos se presentan antes de la salida del sol, cerca de las 6:00 a. m., y empieza a incrementar durante el día, alrededor de la 1: 00 p.m., cuando se dan los valores máximos. Los valores más altos que se han registrado en la zona, de acuerdo con la temperatura máxima absoluta, son de 37,5 °C, durante los meses de abril y julio.

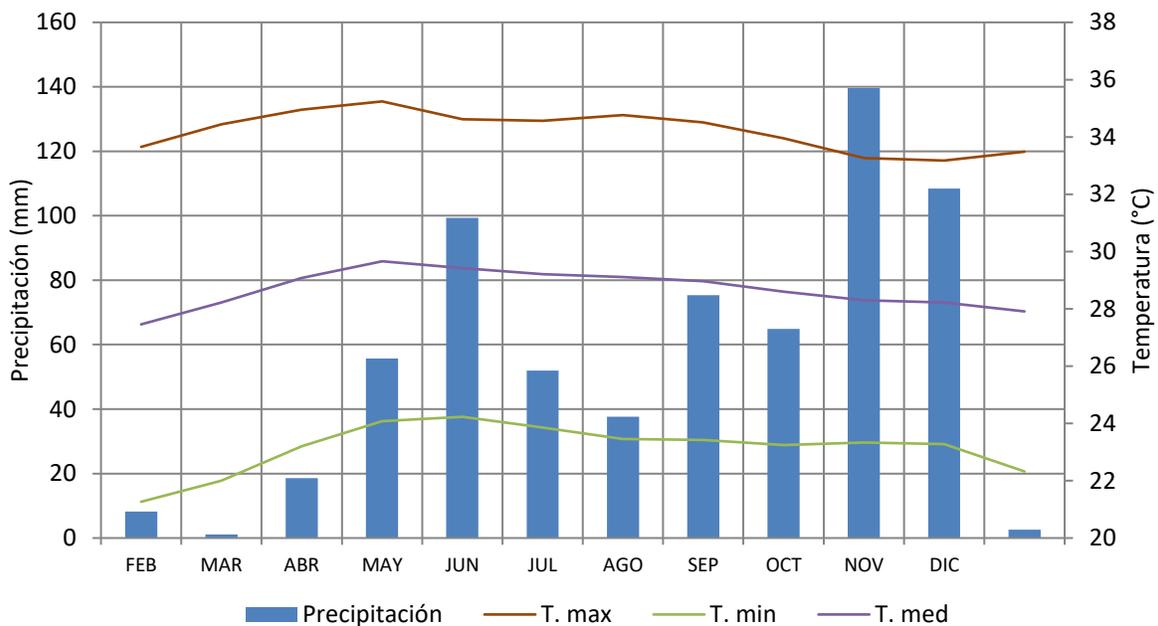
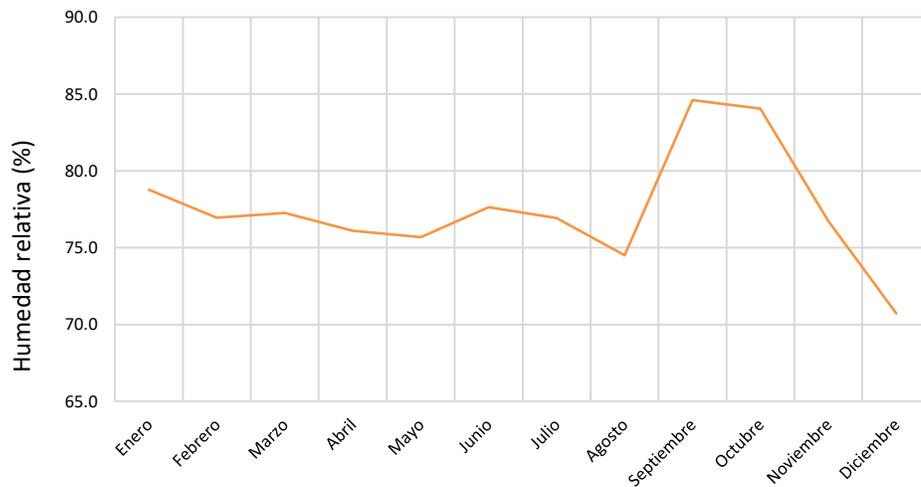


Figura 9. Precipitación. Temperaturas máxima, media y mínima, promedio mensual multianual, estimados a partir de los registros de la estación C. I. Caribia, Colombia. Fuente: Elaboración propia.

### Humedad relativa y radiación solar

El promedio multianual de la humedad relativa en la zona piloto es del 77 %, con valores mensuales entre el 71 % y el 85 %. Estos valores son mayores durante septiembre-octubre y menores en diciembre (Figura 10). A escala horaria, se observa que durante la noche y la madrugada (entre 7:00 p. m. y 6:00 a. m.) se registran los datos de humedad más altos, entre el 78 % y el 86 %, en promedio, y durante el día los valores empiezan a disminuir, hasta llegar a cerca del 60 % alrededor del mediodía, entre las 12:00 m y las 2:00 p. m. En el caso de la radiación solar, los valores máximos se presentan entre las 11:00 a.m. y la 1:00 p.m., y alcanzan su valor más alto de 850 w/m<sup>2</sup>, en promedio. De igual manera, se establece el ciclo diario de la temperatura, que se da como repuesta al ciclo de radiación en la superficie, y tiene su mayor valor a las 2:00 p. m., después de la máxima radiación que se da al mediodía.

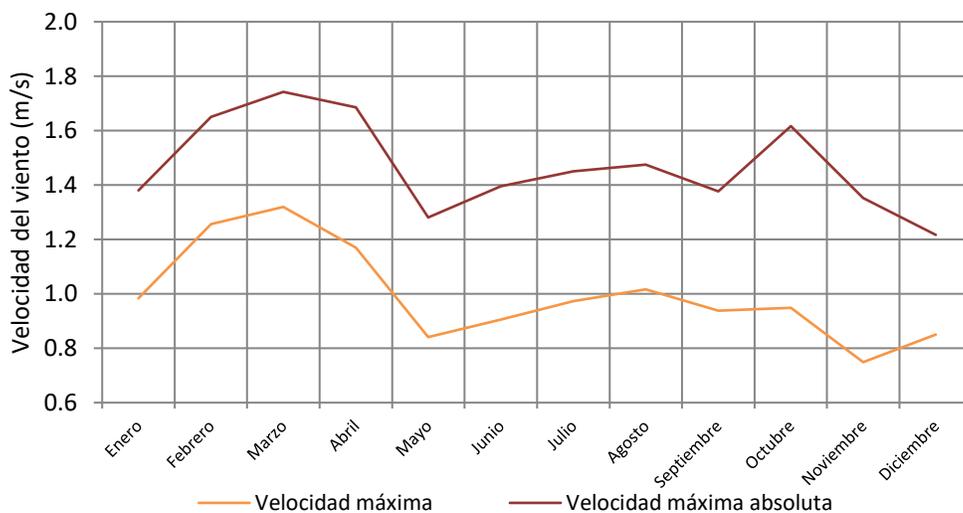


**Figura 10.** Humedad relativa: promedio mensual multianual. Estimada a partir de los registros de la estación C. I. Caribia, Colombia.

Fuente: Elaboración propia

### Velocidad del viento

El viento con mayor velocidad se presenta durante el periodo de febrero-abril, y coincide en parte con la temporada de menores lluvias en la zona, con valores máximos promedio de 1,3 m/s. Los registros más bajos del viento se observan hacia el mes de noviembre, cuando se registra un promedio máximo de 0,7 m/s. En la época de mayor viento, la velocidad absoluta toma valores de hasta 1,7 m/s en marzo (Figura 11). A escala horaria, los mayores registros se presentan entre la 1:00 p. m. y las 4:00 p.m., y alcanzan valores hasta de 5 m/s aproximadamente a las 3:00 p. m.



**Figura 11.** Comportamiento de la velocidad del viento a escala mensual, estimada a partir de los registros de la estación C. I. Caribia, Colombia.



Fuente: Elaboración propia

Durante el primer periodo del año, hasta mayo, que incluye los meses de mayor velocidad del viento, la dirección predominante es oeste (WSW), y, a partir de junio y hasta diciembre, predomina el noroeste (NW).

### **Diseño geométrico de las estructuras**

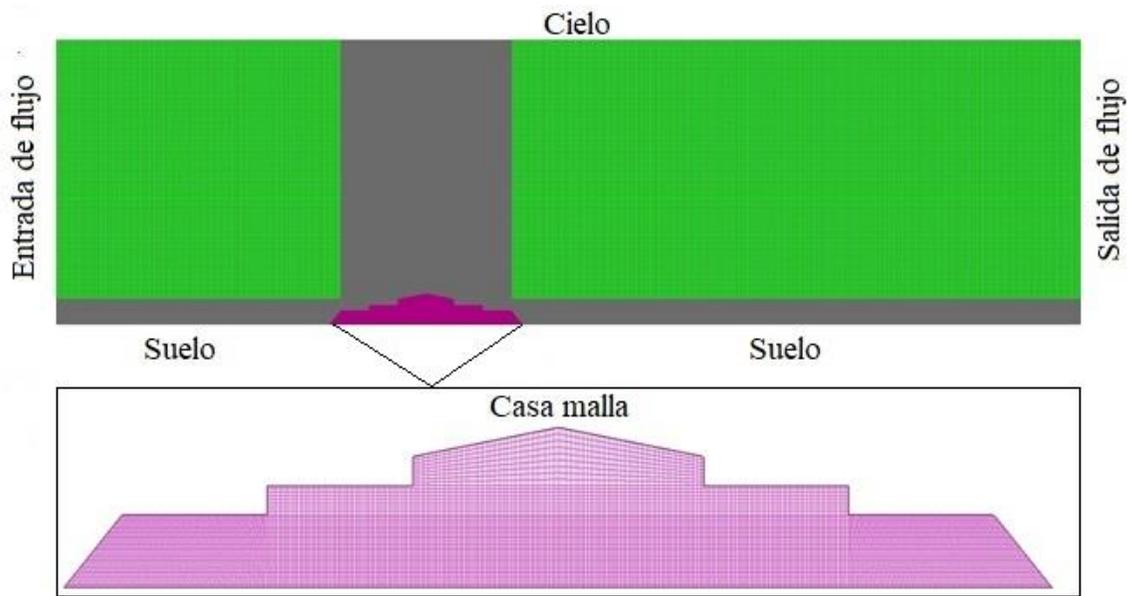
Para el caso del Caribe colombiano, fueron diseñadas dos tipos de estructuras: una casa de malla y un invernadero de tipo pasivo. Estas dos estructuras serán construidas de acuerdo con los parámetros de diseño dados en este documento. Una vez las estructuras se encuentren establecidas a escala real, tendrán que ser validadas a través de modelos de simulación CFD 3D y mediante pruebas experimentales en la siguiente fase de la presente investigación.

### **Diseño geométrico de la casa malla**

#### **Preproceso**

En esta etapa se definió el modelo geométrico de la estructura de casa malla de 740 m<sup>2</sup> y el tipo de malla anti-insecto que se debía utilizar, que era una malla comercial de 40 MESH con un número de hilos de 16,1 x 10,1 por cm<sup>-2</sup>, una porosidad ( $\epsilon$ ) de 0,33 y un nivel de sombreado del 30 %.

En un paso posterior, se definió y construyó la geometría de la sección transversal de la estructura de casa malla y su dominio computacional. Este dominio computacional fue dividido en una grilla numérica estructurada de elementos cuadrados (Figura 12. Dominio computacional y mallado numérico del modelo geométrico de casa malla diseñada para Colombia.).



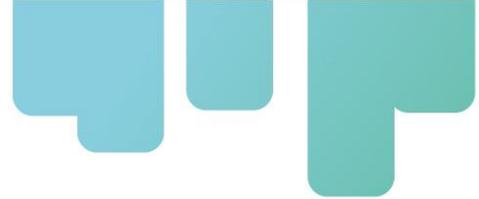
**Figura 12.** Dominio computacional y mallado numérico del modelo geométrico de casa malla diseñada para Colombia.

Fuente: Elaboración propia

La cantidad de elementos fue definida mediante una prueba de independencia de grilla, a través de la cual se evaluó la estabilidad del comportamiento de la variable temperatura. En este caso, la grilla numérica seleccionada fue la número 5, de entre 8 evaluadas (Tabla 7). Esta grilla numérica contiene un total de 625.198 elementos, un tamaño que garantiza una solución y no presenta sesgo alguno asociado al número de elementos del mallado.

**Tabla 7.** Variación de la temperatura en el interior de la casa malla en función del número de elementos de la grilla numérica

Malla	Número de elementos	Temperatura media (°C)
1	53.102	38,6
2	156.871	38,1
3	378.752	37,4
4	549.167	36,5
5	625.198	35,2
6	976.458	35,1
7	1.391.285	35,2
8	1.765.412	35,2



Fuente: Elaboración propia

La calidad de la grilla numérica se determinó mediante el factor de asimetría. Se identificó que la grilla numérica contenía un 95,8 % de los volúmenes dentro del rango de asimetría de 0-0,25, factor que se define como de alta calidad (Baeza et al., 2017).

Una vez definida la independencia y calidad del mallado numérico, el modelo fue usado para desarrollar las simulaciones numéricas de cuatro escenarios específicos, los cuales tienen como variables de cambio la velocidad del viento exterior, unas condiciones de temperatura máxima promedio y el valor medio de la humedad relativa registradas en la región de estudio (Tabla 8).

**Tabla 8.** Condiciones de simulación iniciales para el diseño de la casa malla en Colombia

Escenario	Temperatura del aire (°C)	Humedad relativa del aire (%)	Velocidad del viento (m/s)	Dirección del viento	Radiación solar (Wm <sup>-2</sup> )
S1	34,8	60	0,5	E	851
S2	34,8	60	1	E	851
S3	34,8	60	2	E	851
S4	34,8	60	3	E	851

Fuente: Elaboración propia

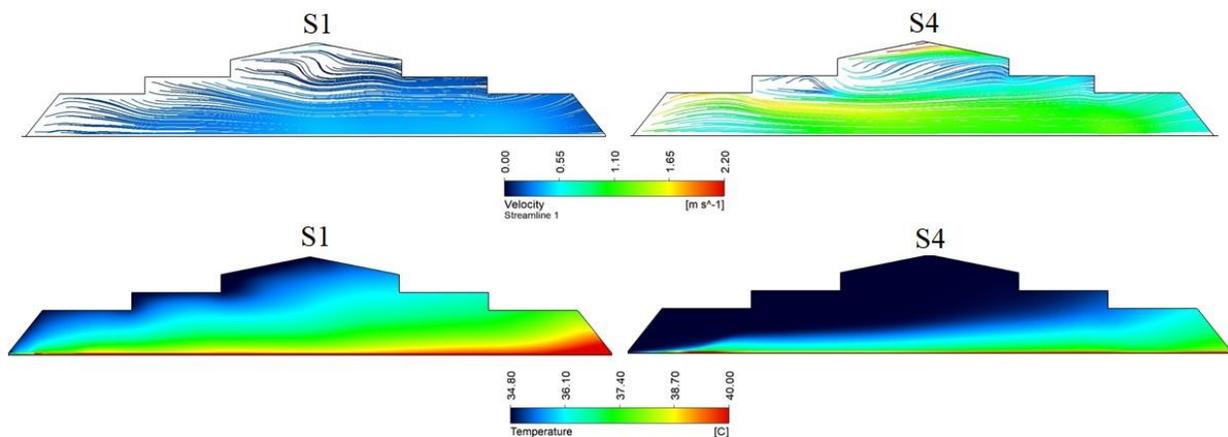
### Solución

Las simulaciones numéricas contemplaron los modelos incluidos en la Tabla 4. En tal caso, la convergencia se obtuvo una vez se completaron un total de 2.873, 2.765, 2.791 y 2.806 iteraciones para cada una de las variables contempladas en los escenarios S1, S2, S3 y S4.

### Posproceso

El comportamiento cualitativo de los patrones de flujo y la distribución espacial de la temperatura para los cuatro escenarios evaluados se muestra en la Figura 13. En esta se observa que los flujos de aire en el interior están directamente relacionados con la velocidad de viento exterior; por ello, hay mayores flujos de aire sobre la zona en la cual se desarrollan los cultivos en el escenario simulado S4. Esto difiere de lo reportado en el trabajo de Teitel & Wenger (2012), en un estudio realizado sobre una casa malla de techo plano.

El escenario S4, el cual tiene flujos de mayor velocidad, presentó un mejor comportamiento térmico, con temperaturas más bajas y una distribución más uniforme en la región donde se establecen los cultivos (Figura 13).



**Figura 13.** Patrones de distribución de flujo de aire y distribución espacial de la temperatura obtenidos mediante simulación para S1 y S4.

Fuente: Elaboración propia

Para desarrollar el análisis del comportamiento cuantitativo se evaluaron los datos de velocidad media en el ancho de la sección transversal estudiada, a una altura de 1,5 m sobre el nivel de suelo (Tabla 9. Valores de velocidad media en el modelo geométrico de casa-malla obtenido para Colombia ). Las velocidades medias del aire obtenidas para los flujos de aire mostraron que, en términos generales, presentan una reducción de la velocidad en comparación con la velocidad del flujo de aire externo, que es un patrón característico en estructuras de casa malla (Al-Mulla et al., 2008). Las velocidades medias oscilaron entre  $0,31 \pm 0,09$  m/s y  $1,19 \pm 0,31$  m/s para los escenarios S1 y S4, respectivamente. Estos valores debían permitir regular las condiciones térmicas e higrométricas en el interior de la estructura.

**Tabla 9.** Valores de velocidad media en el modelo geométrico de casa-malla obtenido para Colombia

Escenario	Velocidad media (m/s)
S1	$0,31 \pm 0,09$
S2	$0,42 \pm 0,09$
S3	$0,72 \pm 0,15$
S4	$1,19 \pm 0,31$

Fuente: Elaboración propia

Para realizar el análisis del comportamiento térmico se calculó la temperatura media en el interior de la casa malla y el gradiente térmico, entre los ambientes interior y exterior de la estructura ( $\Delta T$ ), sobre el mismo perfil en el que se analizaron las velocidades del aire (Tabla 10. Valores de temperatura media y  $\Delta T$  para el modelo geométrico de casa-malla



obtenido para Colombia). Los valores de temperatura media oscilaron entre  $36,9 \pm 1,05$  °C y  $35,4 \pm 0,64$  °C para S1 y S4, respectivamente. Estos valores presentaron una baja desviación estándar, por lo que no es posible inferir que, dentro de la estructura, en la zona en la que se desarrollan los cultivos, exista una alta homogeneidad del comportamiento de esta variable. Cabe resaltar que los valores de  $\Delta_T$  son inferiores o muy cercanos al valor planteado antes del diseño de 2 °C.

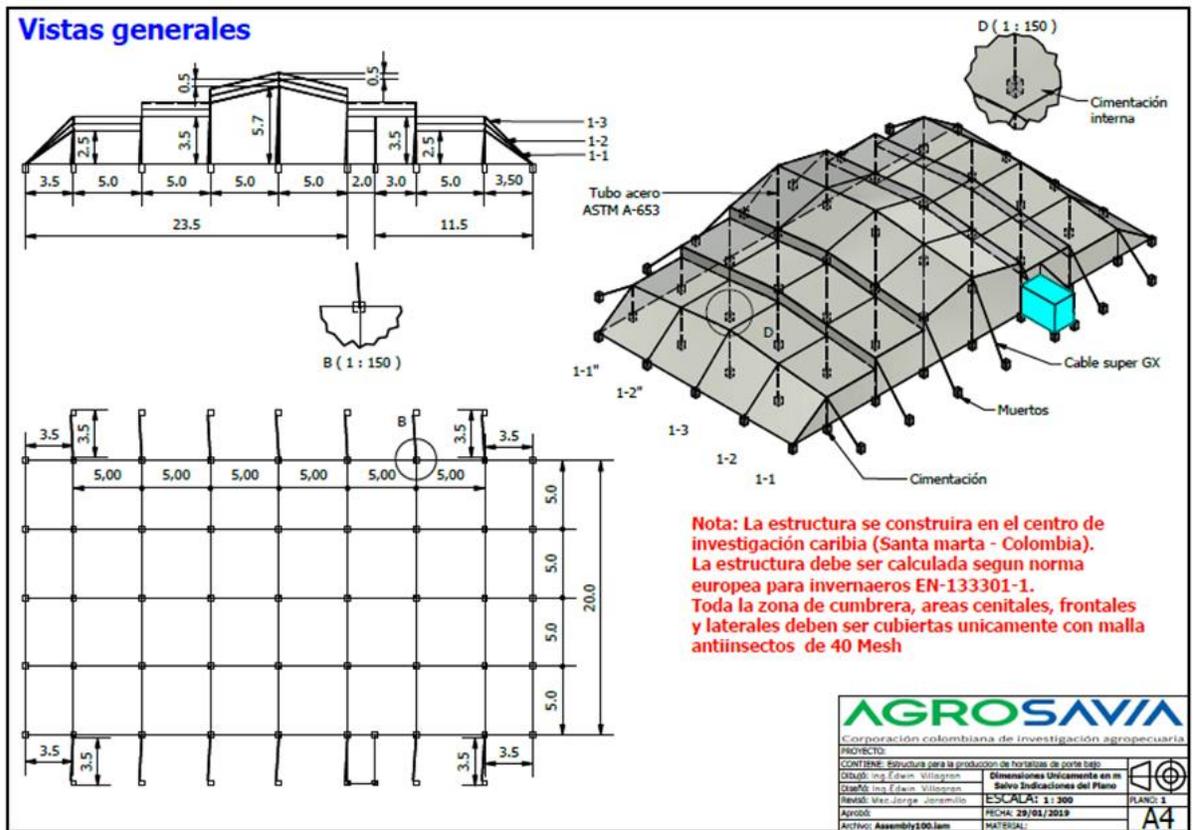
**Tabla 10.** Valores de temperatura media y  $\Delta_T$  para el modelo geométrico de casa-malla obtenido para Colombia

Escenario	Temperatura media (°C)	$\Delta_T$ (°C)
S1	$36,9 \pm 1,05$	2,11
S2	$36,7 \pm 0,91$	1,92
S3	$36,0 \pm 0,71$	1,19
S4	$35,4 \pm 0,64$	0,68

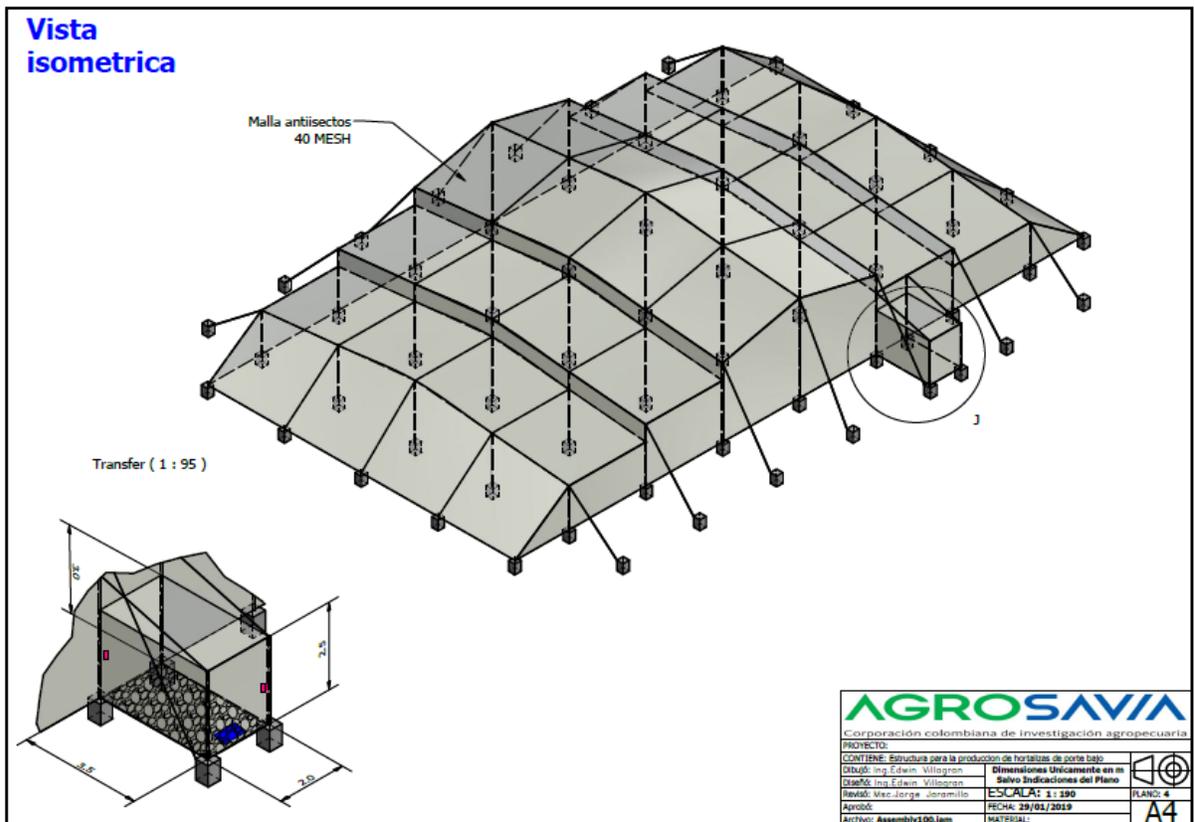
Fuente: Elaboración propia

### Planos CAD

El modelo geométrico obtenido se presenta en las Figura 14. Vistas generales del modelo geométrico de casa malla obtenido para Colombia y Figura 15. Vista isométrica del modelo geométrico de casa malla para Colombia.. En estas pueden encontrarse los planos en vistas generales (frontal, planta e isométrica). Las dimensiones generales de la estructura son de 34 m de ancho por 20 m de largo. En este caso, es necesario contar con un terreno que tenga un área mínima de 918 m<sup>2</sup>, correspondientes a una dimensión transversal de 34 m, y una dimensión longitudinal de 27 m, con el fin de poder construir la estructura y cimentar los anclajes perimetrales.



**Figura 14.** Vistas generales del modelo geométrico de casa malla obtenido para Colombia  
Fuente: Elaboración propia



**Figura 15.** Vista isométrica del modelo geométrico de casa malla para Colombia.

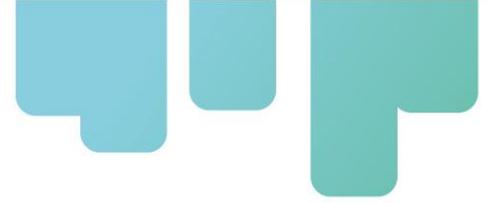
Fuente: Elaboración propia

En Colombia no existen normas para la construcción de estructuras de agricultura protegida; sin embargo, a nivel comercial, algunos constructores calculan los requerimientos estructurales mediante la norma europea “UNE-EN 13031-1. Invernaderos. Proyecto y construcción”.

En términos generales, las estructuras deben tener una cimentación en concreto reforzado, estructurada con varilla normalizada y una resistencia de 3000 psi. Es recomendable verificar

la capacidad portante del suelo. La estructura de la casa malla debe construirse en perfiles de acero certificado ASTM A 653. Este material es laminado en caliente y cubierto con zinc.

Los amarres transversales y longitudinales deben ser construidos en cable súper GX. La cubierta y las áreas de ventilación deben ser protegidas con una malla de protección anti-insecto de 40 MESH con un número de hilos de 16,1 x 10,1 por cm<sup>2</sup>, y una porosidad (ε) de 0,33, con un porcentaje de sombra de 30 %. Esta malla debe limitar el ingreso de insectos al área de cultivo.



Para finalizar, comparamos la estructura diseñada versus los parámetros de diseño establecidos en la tabla 6. Esta comparación se resume en la Tabla 11.

**Tabla 11.** Parámetros de diseño finales de la casa malla en Colombia

<b>Parámetro</b>	<b>Descripción</b>
Geometría de la casa malla	Cumple. Se diferencia de las estructuras de casa malla tradicionales que son de techo plano.
Altura de la casa malla	Cumple. Presenta una altura variable, desde una mínima de 2,5 m hasta un máximo de 6,7 m.
Tipo de malla porosa	Su selección resultó de la búsqueda de un alto grado de protección contra insectos plaga sin limitar el flujo de los patrones de aire.
Flujos de aire	Cumple. Flujos de aire con velocidad moderados y adecuados.
Homogeneidad térmica	Cumple.

Fuente: Elaboración propia

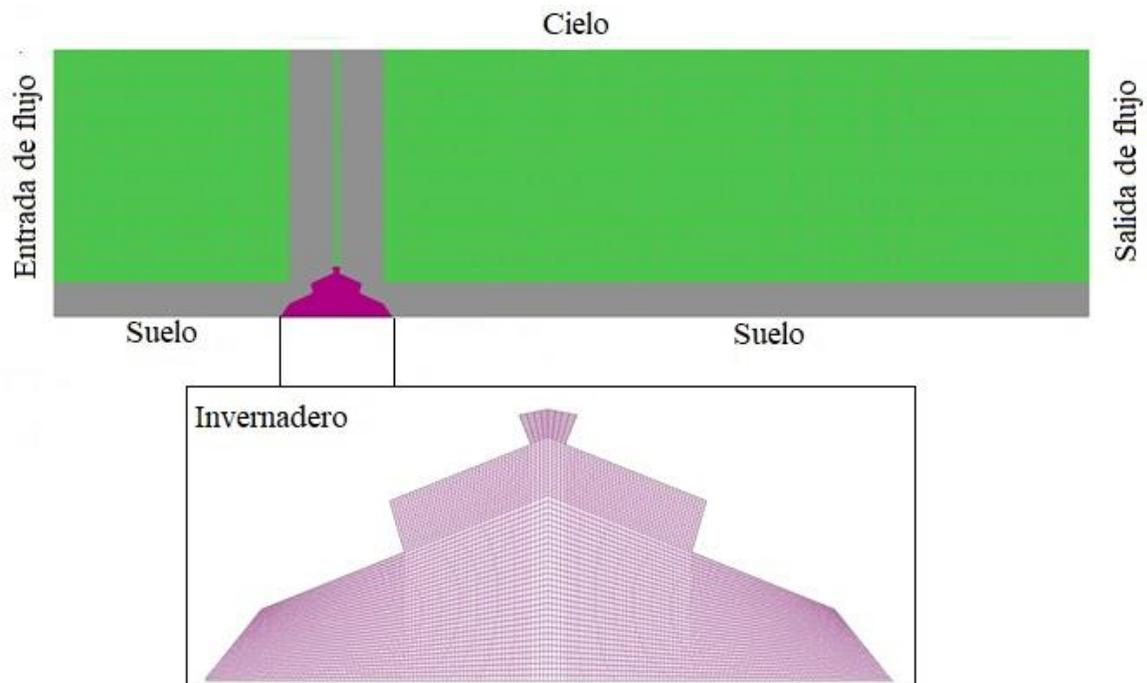
## **Diseño geométrico del invernadero**

### **Preproceso**

En esta etapa, se definió que el área del invernadero que se quería diseñar debía ser de 500 m<sup>2</sup>; la estructura debía contar con áreas de ventilación en cada uno de sus costados y fachadas, y, a su vez, en la región de la cubierta. Estas áreas de ventilación debían ser equipadas con una malla porosa a prueba de insectos, previo estudio de la afectación sobre los patrones de flujo de aire y los índices de renovación horarios.

La cubierta del invernadero contemplada fue un filme de polietileno comercial calibre 7, con un porcentaje de transmisión y difusión de radiación solar del 90 % y el 75 %, respectivamente. Con el fin de limitar el nivel de radiación en el interior del invernadero, en

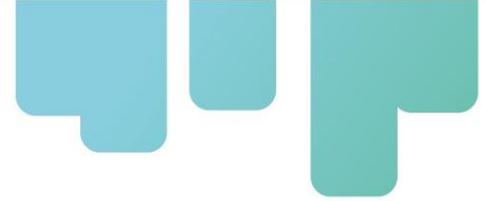
la búsqueda de valores de  $\Delta T$  lo más bajos posibles, se incluyó dentro del diseño el uso de una pantalla térmica con un nivel de sombra efectivo del 30 %. El dominio computacional y la sección transversal del invernadero seleccionado para la región de estudio se presentan en la Figura 16. Dominio computacional y mallado numérico del modelo geométrico del invernadero diseñado para Colombia..



**Figura 16.** Dominio computacional y mallado numérico del modelo geométrico del invernadero diseñado para Colombia.

Fuente: Elaboración propia

La grilla numérica establecida en el proceso de mallado fue de un tipo no estructurado y conformada por elementos rectangulares. En este caso, la grilla numérica seleccionada fue la número 4, de entre 7 evaluadas (Tabla 12). Esta grilla numérica contiene un total de 462.967 elementos, tamaño que garantiza una solución totalmente independiente y no presenta sesgo alguno asociado al tamaño de los elementos del mallado.



**Tabla 12.** Variación de la temperatura en el interior del invernadero en función del número de elementos de la grilla numérica.

Malla	Número de elementos	Temperatura media (°C)
1	45.192	40,3
2	98.731	39,4
3	278.752	38,2
4	462.967	35,5
5	576.391	35,5
6	856.329	35,5
7	1.012.955	35,5

Fuente: Elaboración propia

La calidad de la grilla numérica se determinó mediante el factor de asimetría. Se identificó

que la grilla numérica contenía un 92,8 % de los volúmenes dentro del rango de asimetría de 0 – 0,25, factor que se define como de alta calidad (Baeza et al., 2017).

Una vez definida la independencia y calidad del mallado numérico, el modelo fue usado para desarrollar las simulaciones numéricas bajo los escenarios establecidos en la Tabla 13.

**Tabla 13.** Condiciones de simulación iniciales para el diseño del invernadero en Colombia

Escenario	Temperatura del aire (°C)	Humedad relativa del aire (%)	Velocidad del viento (m/s)	Dirección del viento	Radiación solar (W m <sup>-2</sup> )
S1	34,8	60	0,5	E	851
S2	34,8	60	1	E	851
S3	34,8	60	2	E	851
S4	34,8	60	3	E	851

Fuente: Elaboración propia

### Solución

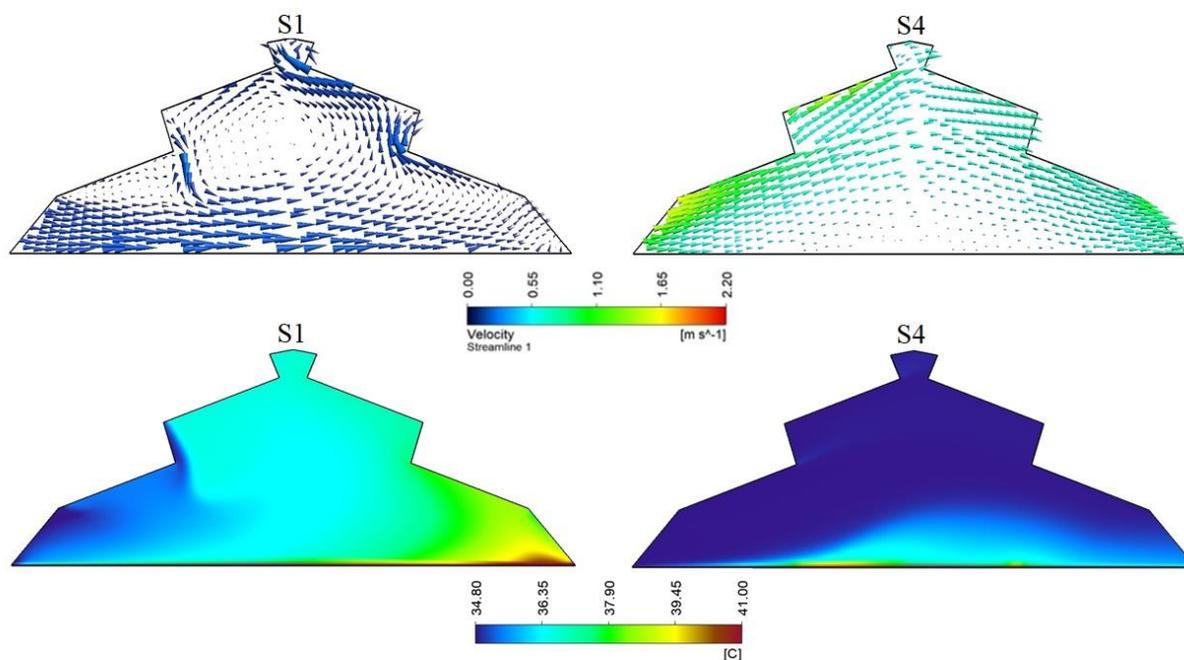
Las simulaciones numéricas contemplaron los modelos ya discutidos, los cuales se resumen en la Tabla 4. En tal caso, la convergencia se obtuvo una vez se completaron un total de 2.341, 2.392, 2.427 y 2.381 iteraciones para cada una de las variables contempladas en los escenarios S1, S2, S3 y S4.



## Posproceso

En la Figura 17, se pueden observar los comportamientos cualitativos para los flujos de aire y la distribución espacial de la temperatura obtenidos para los escenarios S1 y S4. Se puede observar cómo en el escenario de baja velocidad S1 los flujos de aire están dominados por el efecto térmico de la ventilación natural, razón por la cual los flujos de aire buscan salir del invernadero a través de las regiones de ventilación ubicadas en la región de la cubierta de la estructura (López et al., 2011). Por el contrario, en el caso del escenario de alta velocidad S4, los flujos de aire ingresan por las áreas de ventilación dispuestas en el costado de sotavento y salen de la estructura a través del costado de barlovento; esto sucede porque para este escenario domina el efecto eólico de la ventilación natural (Kittas et al., 2005).

En cuanto al comportamiento térmico, se puede observar que, a medida que aumenta la velocidad del viento exterior, se reduce el valor en magnitud de la temperatura, y aumenta a su vez el comportamiento homogéneo sobre la región donde se establecerán los cultivos.



**Figura 17.** Patrones de distribución de flujo de aire y distribución espacial de la temperatura obtenidos mediante simulación para S1 y S4.

Fuente: Elaboración propia

Se calculó la velocidad media de los patrones de flujo de aire en términos cuantitativos. También, se observó que, al igual que en la estructura de casa malla y por efecto de la pantalla porosa a prueba de insectos, la velocidad del aire en el interior es inferior a la presentada en el ambiente exterior (Tabla 14. Valores de velocidad media en el modelo



geométrico de invernadero simulado para Colombia). Sin embargo, estas velocidades están dentro del rango recomendado para estructuras de agricultura protegida (McCartney & Lefsrud, 2018).

**Tabla 14.** Valores de velocidad media en el modelo geométrico de invernadero simulado para Colombia

Escenario	Velocidad media (m/s)
S1	0,22 ± 0,07
S2	0,32 ± 0,12
S3	0,89 ± 0,13
S4	1,36 ± 0,22

Fuente: Elaboración propia

En el caso de los valores de temperatura media en el interior del invernadero y el  $\Delta T$ , se observa que estos parámetros presentan un menor valor a medida que aumentan la velocidad del flujo de aire y por ende la eficiencia de la ventilación natural (Tabla 15. Valores de temperatura media y  $\Delta T$  para el modelo geométrico de invernadero diseñado para Colombia). Estos valores están dentro del rango de diseño propuesto en esta investigación, por lo tanto, se puede considerar que la estructura de invernadero planteada satisface los objetivos propuestos en la fase de prediseño.

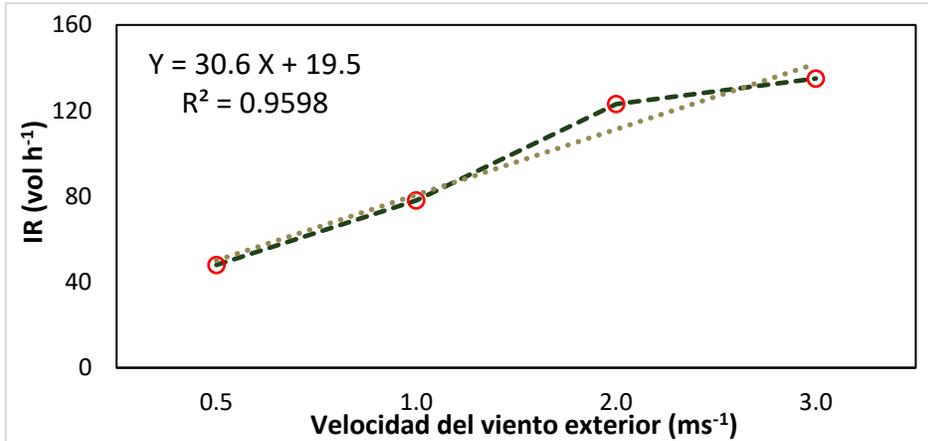
**Tabla 15.** Valores de temperatura media y  $\Delta T$  para el modelo geométrico de invernadero diseñado para Colombia

Escenario	Temperatura media (°C)	$\Delta T$ (°C)
S1	36,6 ± 1,25	1,81
S2	35,8 ± 0,79	1,03
S3	35,5 ± 0,51	0,71
S4	35,2 ± 0,45	0,41

Fuente: Elaboración propia

Los valores de índice de renovación horarios (IR) obtenidos para este prototipo de invernadero pueden considerarse adecuados, ya que, para la velocidad más baja presentada en la región de estudio, simulada mediante el escenario S1, se obtuvo un valor superior al mínimo recomendado de 40 volúmenes hora<sup>-1</sup> (Figura 18. Índices de renovación horarios (IR) calculados para el modelo geométrico del invernadero diseñado para Colombia.). El comportamiento para este parámetro presentó una tendencia que puede ajustarse a un comportamiento lineal, en el que la variable dependiente es la velocidad del

viento exterior y un  $R^2$  de 0,9598, valor que indica una alta correlación.



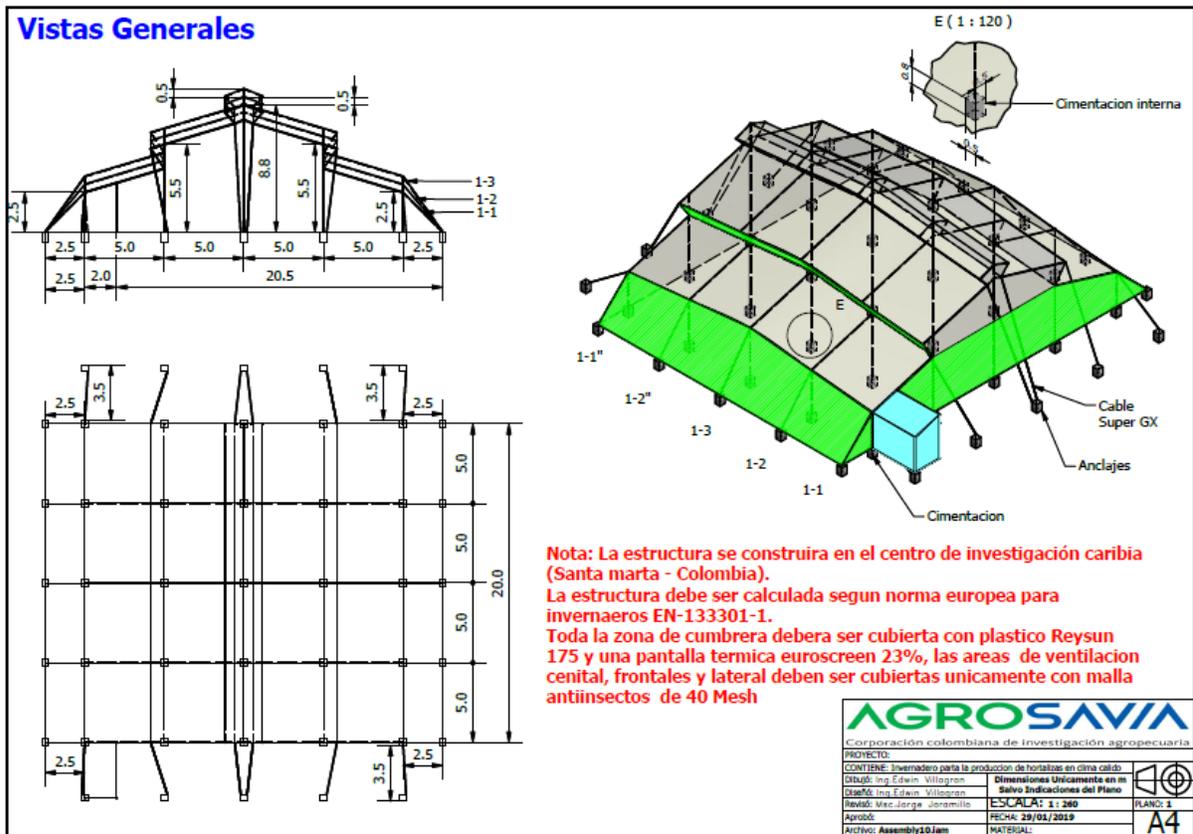
**Figura 18.** Índices de renovación horarios (IR) calculados para el modelo geométrico del invernadero diseñado para Colombia.

Fuente: Elaboración propia

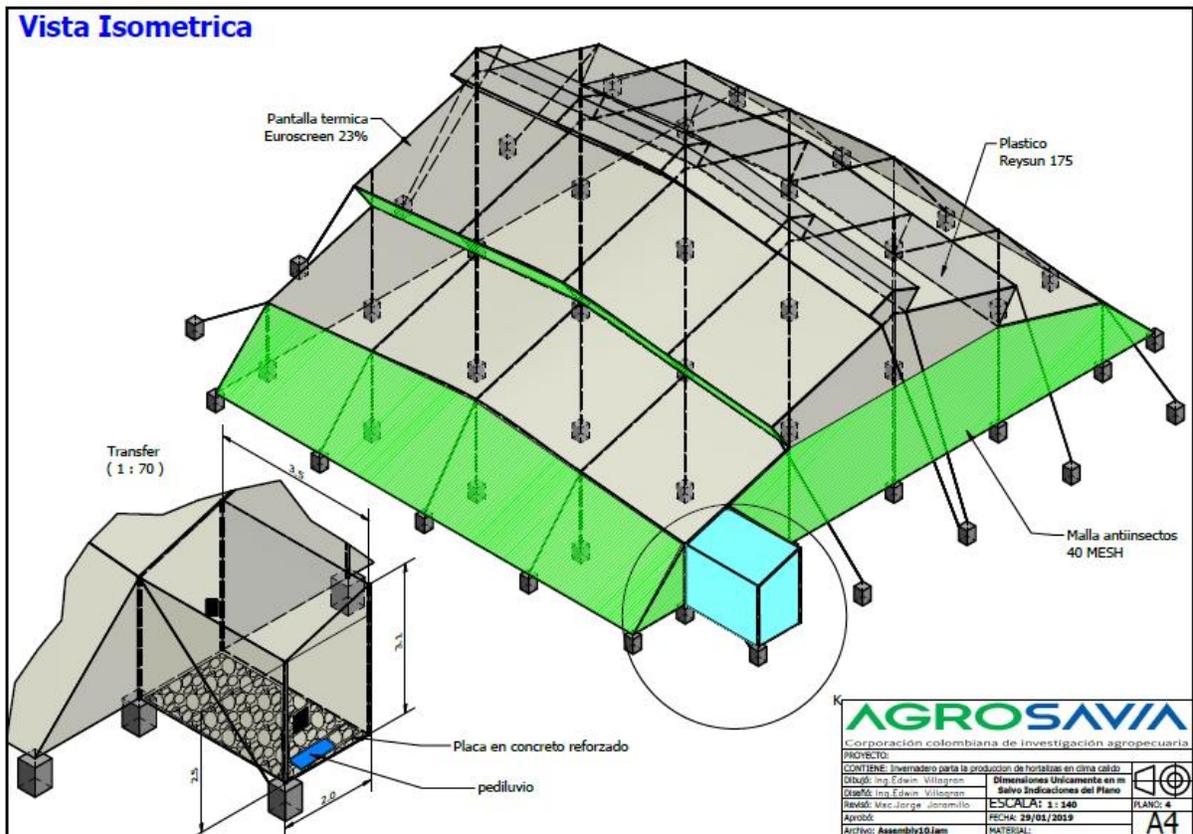
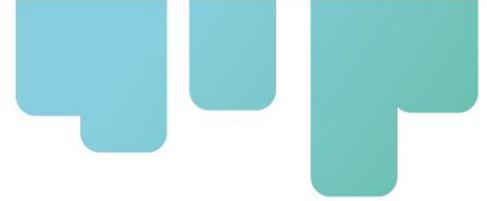
### Planos CAD

El modelo geométrico del invernadero obtenido se presenta en las Figura 19. Vistas generales del modelo geométrico de invernadero para Colombia. y 20. En estas pueden encontrarse, además, los planos en vistas generales (frontal, planta e isométrica). Las dimensiones generales de la estructura son de 25 m de ancho por 20 m de largo. En este caso, es necesario contar con un terreno que tenga un área mínima de  $675 \text{ m}^2$ , correspondientes a una dimensión transversal de 25 m y una dimensión longitudinal de 27 m, con el fin de poder construir la estructura y cimentar los anclajes perimetrales.

Es recomendable calcular la estructura de acuerdo con los requerimientos de la norma europea “UNE-EN 13031-1. Invernaderos. Proyecto y construcción”. Los requerimientos de cimentación, anclajes y materiales recomendados para la estructura serán similares a los planteados para el diseño de la casa malla de Colombia. La cubierta, en este caso, debe ser un filme de polietileno, complementado con una pantalla térmica. Las áreas de ventilación deben ser protegidas con malla porosa a prueba de insectos.



**Figura 19.** Vistas generales del modelo geométrico de invernadero para Colombia.  
 Fuente: Elaboración propia



**Figura 20.** Vistas isométricas del modelo geométrico del invernadero para Colombia.

Fuente: Elaboración propia

Para finalizar, comparamos la estructura diseñada con los parámetros de diseño establecidos en la Tabla 5. Esta comparación se resume en la Tabla 16.

**Tabla 16.** Parámetros de diseño finales del invernadero en Colombia

Parámetro	Descripción
Eje longitudinal del invernadero (largo)	Cumple. El eje longitudinal queda ubicado en sentido perpendicular a la dirección dominante del viento.
Eje transversal del invernadero (ancho)	Cumple. La longitud del eje transversal del invernadero es inferior a 40 m.
Altura del invernadero	Cumple. La altura mínima es de 2,5 m y la máxima de 9,8 m. La relación de volumen de aire encerrado versus superficie cubierta es de 5,2 m <sup>3</sup> m <sup>-2</sup> .
Pendiente longitudinal del invernadero	Cumple. La pendiente longitudinal del invernadero S <sub>L</sub> = 10 %.
Superficie de ventilación	Cumple. Sv/Ssc = 79,6 %.

Disposición de las áreas de ventilación	Cumple. Superficies de ventilación en los costados, fachadas y regiones de la cubierta.
Índices de renovación	Cumplen. Véase Figura 18. Índices de renovación horarios (IR) calculados para el modelo geométrico del invernadero diseñado para Colombia..
Presencia de pantallas porosas a pruebas de insecto.	Cumple. Se equipó el invernadero con malla anti-insecto en todas las áreas de ventilación.
Geometría de la estructura y forma de la cubierta	Cumple. Se estableció un invernadero de cubierta plana de techos asimétricos.
Homogeneidad térmica	Cumple. Los valores de $\Delta_T$ son inferiores a 2 °C.
Uso de pantallas de sombrero	Cumple. Se contempló una pantalla de sombrero que permite gestionar de forma pasiva el nivel de radiación en el interior del invernadero.

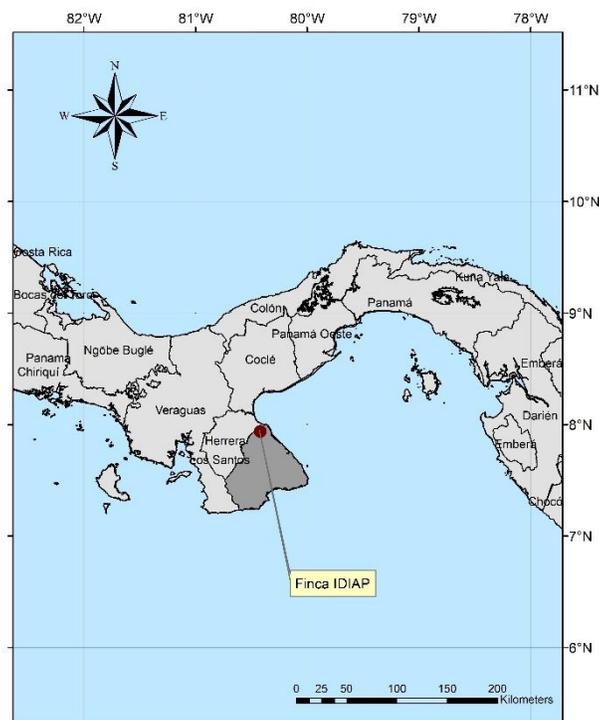
Fuente: Elaboración propia

## Resultados para Panamá

### Caracterización climática

#### Zona piloto

El sitio piloto está ubicado en la finca del Instituto de Investigación Agropecuaria de Panamá (IDIAP), en el corregimiento de La Villa, distrito de La Villa, provincia de Los Santos. El lugar se encuentra a 7,9408° latitud norte y 80,417° longitud oeste, a 16 m s. n. m (Figura 21).



**Figura 21.** Ubicación de la zona piloto en Panamá.

Fuente: Elaboración propia

Según las zonas de vida Holdridge, el sitio experimental se encuentra dentro de la zona correspondiente al bosque seco tropical, con temperatura media anual entre 27 °C y 28 °C, y una precipitación promedio anual entre los 1.100 mm y los 1.650 mm, distribuidos principalmente en siete meses, de mayo a noviembre (Autoridad Nacional del Ambiente, 2010). Los totales pluviométricos anuales llegan a 1.122 mm, en La Villa de Los Santos. Esta franja litoral está asociada, a su vez, al denominado Arco Seco, con importantes déficits de agua estacionales. Según la clasificación climática Köppen, la provincia de Los Santos tiene un clima tropical de sabanas Aw1.

#### **Análisis de la información climática de la zona piloto**

La información climática fue tomada de la estación Los Santos (código 128-001), de la red de estaciones hidrometeorológicas de la Empresa de Transmisión Eléctrica S. A. (Etesa), de Panamá, ubicada a una distancia aproximada de 5 km de la zona de emplazamiento de la estructura. Las variables que se recopilieron fueron: brillo solar, humedad relativa, precipitación, temperatura máxima, temperatura mínima y velocidad del viento, para un periodo de 30 años (1986-2016) a escala diaria.

#### **Precipitación y temperaturas (máxima, mínima y media)**

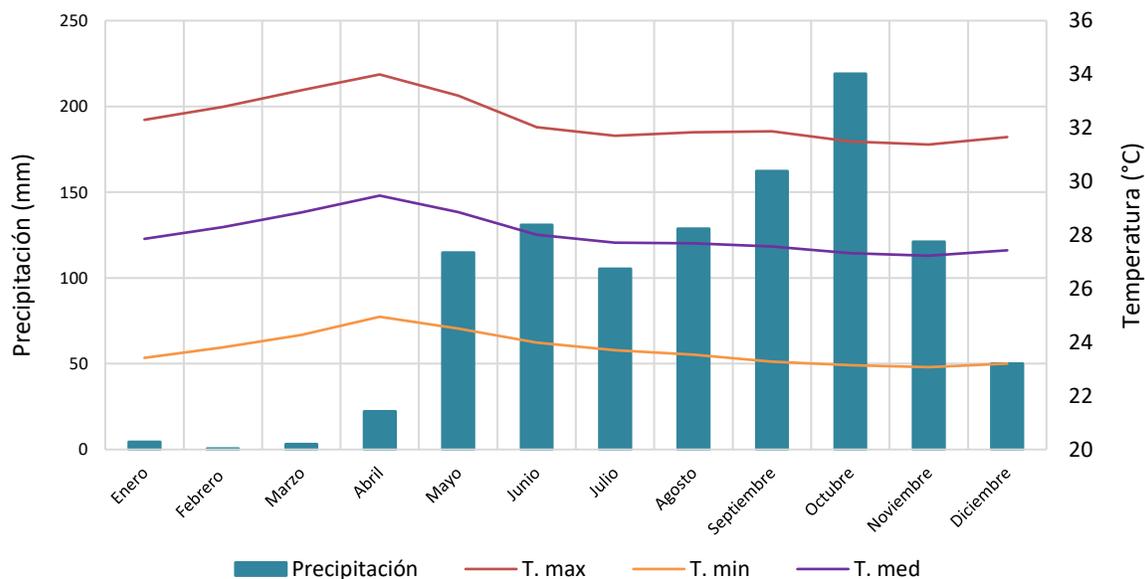
De acuerdo con la información climática recolectada sobre la zona, se observa que el



periodo más cálido es entre enero y abril, con las temperaturas más altas durante este último mes (temperaturas mínimas promedio de 25 °C, medias de 29,5 °C, y máximas de 34 °C). La temporada menos cálida se da entre noviembre y diciembre. En estos meses se registran valores promedio de temperaturas mínimas aproximadas de 23 °C, y máximas de 32 °C. El régimen térmico en esta zona es bastante constante, con una temperatura media anual de 28 °C (Figura 22). Los valores de temperaturas registrados responden a la posición geográfica del istmo, cuyas bajas latitudes lo ubican entre las regiones con clima tropical.

El promedio multianual de la precipitación para la zona piloto es de aproximadamente 1.063 mm. El periodo de mayores precipitaciones se presenta desde mayo hasta diciembre,

pero es el mes de octubre el de mayor lluvia, con un promedio multianual de 219 mm. En el mes de julio se observa una reducción en el régimen de las precipitaciones, es el fenómeno conocido como veranillo de San Juan. Este comportamiento de las lluvias se explica por la orografía de la región y la migración estacional de las masas de aire tropical del Pacífico típicas de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT). Durante la estación seca, a partir del mes de diciembre y hasta abril, las lluvias son escasas, con un valor mínimo de 1 mm en promedio para el mes de febrero (Figura 22). Los periodos de sequía más prolongados se presentan con la aparición del fenómeno de El Niño.



**Figura 22.** Precipitación. Temperaturas máxima, media y mínima. Promedio mensual multianual estimados a partir de los registros de la estación Los Santos, Panamá.

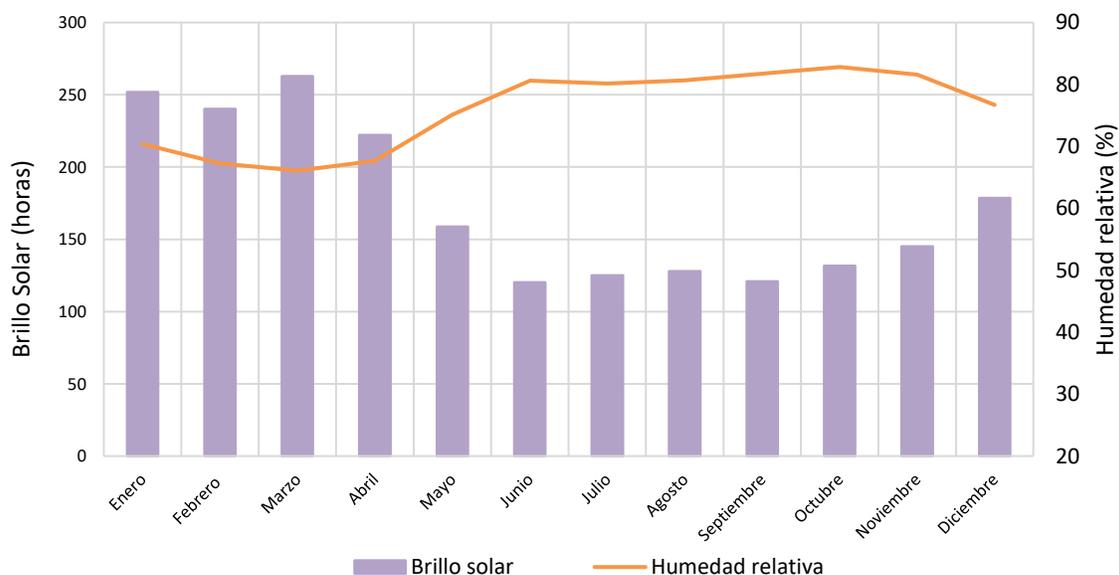
### Humedad relativa y brillo solar

Por su cercanía al mar y al río, La Villa mantiene el área con un alto régimen de humedad, principalmente en los meses de la temporada lluviosa de junio a noviembre. En el mes de



octubre es extremadamente húmedo (83 %). En los meses de la temporada seca, desde enero hasta abril, se registraron valores mínimos de humedad relativa. El mes de marzo es seco, tiene una humedad de 66 % (

Figura 23). En esta zona, el promedio de humedad relativa anual es de 76 %. El mar es una fuente de humedad, así como los terrenos bajos inundados gran parte del año. Los valores de máxima y mínima humedad relativa en la zona de estudio coinciden con los meses de máxima y mínima precipitación.



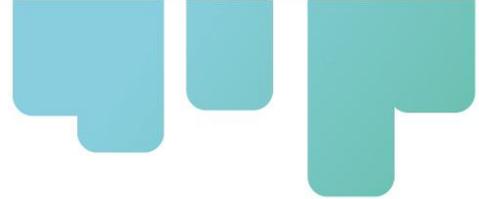
**Figura 23.** Humedad relativa y brillo solar, promedio mensual multianual, estimados a partir de los registros de la estación Los Santos, Panamá.

Fuente: Elaboración propia

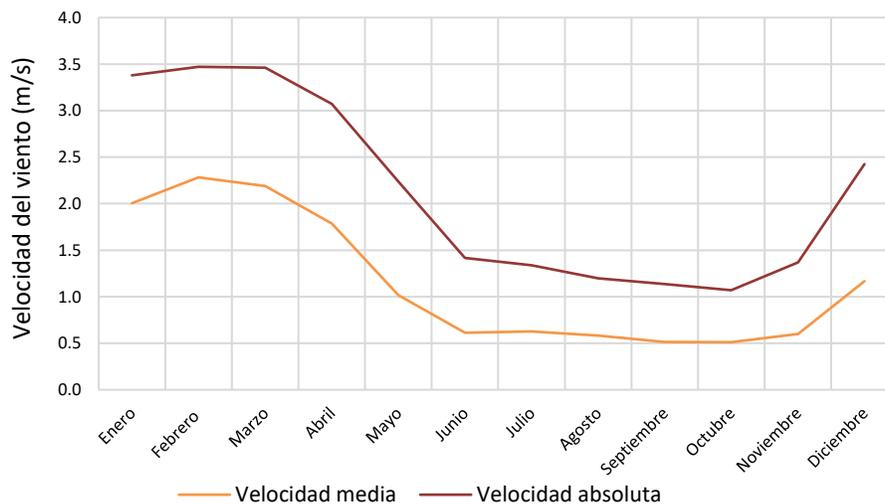
A nivel de la zona costera del Pacífico, existe mayor disponibilidad de horas luz. El promedio multianual de brillo solar es de 2.084 horas/año. Los valores de brillo se mantienen altos durante la temporada seca a partir de enero y hasta abril; en marzo es en promedio de 263 horas/mes. Esto se explica por las condiciones climáticas típicas de la temporada seca. Sin embargo, en los meses lluviosos, la luz solar es menor debido al aumento de la nubosidad en todo el territorio nacional. Debido a esta situación, los valores de brillo solar disminuyen, sobre todo en el mes de junio y septiembre, con un promedio de 120 horas/mes ( Figura 23). De acuerdo con Maps (2016), se considera en la zona un promedio de radiación solar anual de 1980 kWh/m<sup>2</sup>.

### Velocidad del viento

El promedio de velocidad del viento anual es de 1,2 m/s. El periodo de mayores vientos en el año dura cinco meses y corresponde a la temporada seca, que va desde diciembre hasta



abril, con velocidades promedio de 2,0 m/s. El mes en el que hay más viento es febrero, con una velocidad promedio de 2,3 m/s. La época de más calma en el año coincide con la temporada lluviosa, desde mayo hasta noviembre, con un promedio de 0,6 m/s. Los vientos más bajos se dan en septiembre, con una velocidad promedio de 0,5 m/s (Figura 24). En el periodo de mayor actividad del viento (diciembre-abril), la velocidad absoluta puede llegar en promedio hasta 3,4 m/s, en los meses de febrero a marzo.



**Figura 24.** Comportamiento de la velocidad del viento a escala mensual, estimado a partir de los registros de la estación Los Santos, Panamá.

Fuente: Elaboración propia.

La dirección predominante promedio por hora del viento en Los Santos varía durante el año, de enero a abril va hacia el noreste, y a partir de mayo y hasta diciembre hacia el sureste. Estos fluctúan de acuerdo con los vientos oceánicos.

### Diseño geométrico de las estructuras

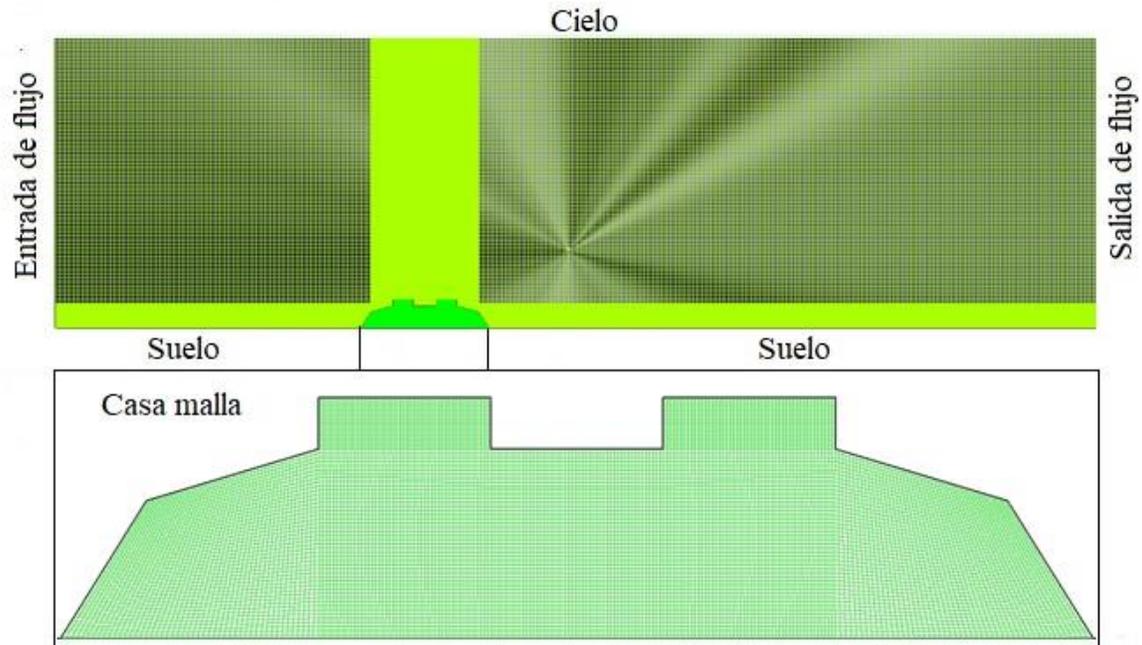
En el caso de Panamá, fueron diseñadas dos estructuras, nuevamente una casa de malla y un invernadero ventilado de forma natural. Estas estructuras necesitarán ser validadas, en el momento de ser construidas, a través de simulación numérica y pruebas experimentales

### Diseño geométrico de la casa malla

#### Preproceso

En esta fase se estableció que el tipo de malla anti-insecto a utilizar era una malla comercial de 40 MESH, con un número de hilos de 16,1 x 10,1 por  $\text{cm}^2$ , una porosidad ( $\epsilon$ ) de 0,33 y un nivel de sombreado del 30 %, para una superficie cubierta de 720  $\text{m}^2$ . También, se definió y construyó la geometría de la sección transversal de la estructura de casa malla y su dominio computacional. Este dominio computacional fue dividido en una grilla numérica estructurada de elementos cuadrados (Figura 25. Dominio computacional y mallado

numérico del modelo geométrico de casa malla diseñada para Panamá.).



**Figura 25.** Dominio computacional y mallado numérico del modelo geométrico de casa malla diseñada para Panamá.

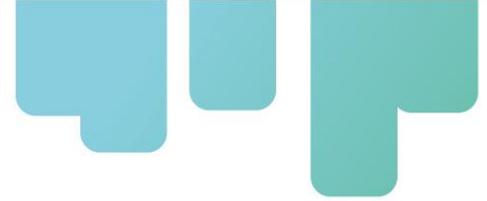
Fuente: Elaboración propia

En este caso, la grilla numérica seleccionada fue la número 6, de entre 9 evaluadas (



Tabla **17**). Esta grilla numérica contiene un total de 575.307 elementos, un tamaño que garantiza una solución que no presenta sesgo alguno asociado al número de elementos del mallado.

El factor de asimetría identificado para realizar la evaluación de la calidad de la grilla numérica correspondía a un 97,6 % de los volúmenes dentro del rango de asimetría de 0-0,25, factor que se define como de alta calidad (Baeza et al., 2017).



**Tabla 17.** Variación de la temperatura en el interior de la casa malla en función del número de elementos de la grilla numérica

Malla	Número de elementos	Temperatura media (°C)
1	33.652	41,2
2	76.972	39,7
3	128.252	38,5
4	289.273	37,2
5	405.203	36,6
6	575.307	36,3
7	941.528	36,3
8	1.232.527	36,3
9	1.456.871	36,3

Fuente: Elaboración propia

Una vez definida la independencia y calidad del mallado numérico, el modelo fue usado para desarrollar las simulaciones numéricas bajo las condiciones iniciales establecidas en la Tabla 18.

**Tabla 18.** Condiciones de simulación iniciales para el diseño de la casa malla en Panamá

Escenario	Temperatura del aire °C	Humedad relativa del aire (%)	Velocidad del viento (m/s)	Dirección del viento	Radiación solar ( $W m^{-2}$ )
S1	35,8	70	0,5	N	976,2
S2	35,8	70	1	N	976,2
S3	35,8	70	1,6	N	976,2
S4	35,8	70	2,2	N	976,2

Fuente: Elaboración propia

### Solución

Las simulaciones numéricas contemplaron los modelos incluidos en la Tabla 4. En tal caso, la convergencia se obtuvo una vez se completaron un total de 2.541, 2.569, 2.521 y 2.601 iteraciones para cada una de las variables contempladas en los escenarios S1, S2, S3 y S4.

### Posproceso

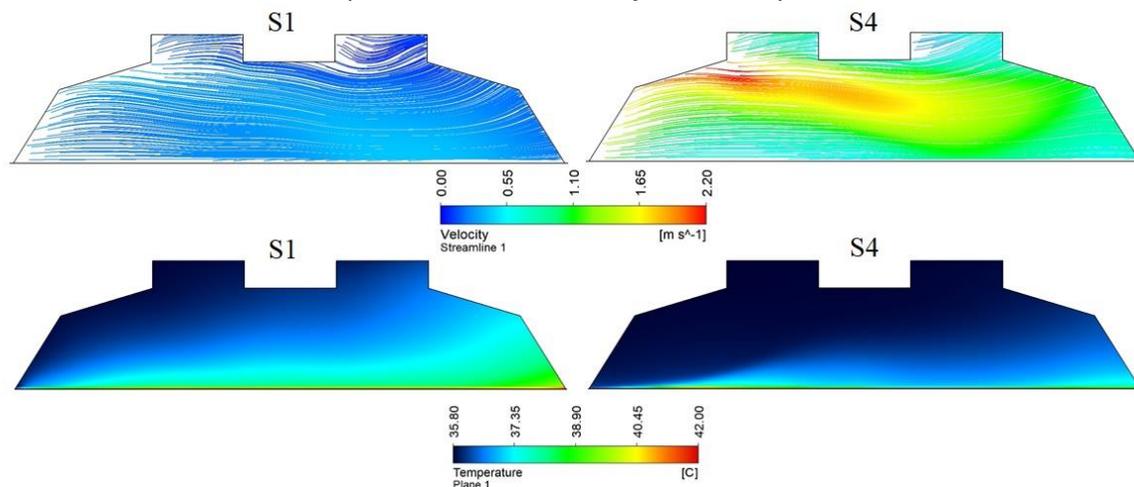
El comportamiento cualitativo de los patrones de flujo y la distribución espacial de la temperatura para los cuatro escenarios evaluados se muestran en la

Figura 26. En este diseño, se pueden observar patrones de flujo de aire que muestran

velocidades uniformes en la zona de crecimiento del cultivo. Existe un área cercana al costado de sotavento en la que se presenta una zona de mayor velocidad, influenciada por una corriente de aire que ingresa por la región del techo de la estructura. Este comportamiento difiere de los observados en casas de malla de techo plano, en las que se tiende a formar un bucle de recirculación o un corto circuito del patrón de flujo de aire (Villagran et al., 2020).

Por otro lado, se observa nuevamente que la distribución de la temperatura presenta una alta homogeneidad, sin la presencia de parches o áreas de alta temperatura (

Figura 26). Este comportamiento también difiere del reportado en trabajos previos para este tipo de estructuras como el desarrollado por Flores-Velazquez et al. (2017). Es posible concluir, a partir de lo anteriormente expuesto, que la geometría de la estructura tiene una alta incidencia sobre el comportamiento de los flujos de aire y la distribución térmica.



**Figura 26.** Patrones de distribución de flujo de aire y distribución espacial de la temperatura obtenidos mediante simulación para S1 y S4.

Fuente: Elaboración propia

En términos cuantitativos, las velocidades medias oscilaron entre  $0,34 \pm 0,19$  m/s y  $1,23 \pm 0,11$  m/s para los escenarios S1 y S4, respectivamente. Estos valores permiten regular las condiciones térmicas e higrométricas en el interior de la estructura (Tabla 19). Nuevamente, como se ya se ha mencionado, se observa una pérdida de velocidad de los flujos de aire en el interior de la estructura, a causa de la pérdida de impulso sobre el patrón de flujo de aire exterior, el cual se genera por la presencia de la malla anti-insecto en el techo, costados y fachadas de la estructura.



**Tabla 19.** Valores de velocidad media en la casa malla simulada para Panamá

Escenario	Velocidad media (m/s)
S1	0,34± 0,19
S2	0,54± 0,13
S3	0,66± 0,23
S4	1,23± 0,11

Fuente: Elaboración propia

Los valores de temperatura media oscilaron entre  $37,5 \pm 1,12$  °C y  $36,3 \pm 0,31$  °C para S1 y S4, respectivamente. Estos valores presentaron una baja desviación estándar, por lo que no es posible inferir que dentro de la estructura, en la zona donde se desarrollan los cultivos, exista una alta homogeneidad del comportamiento de esta variable (Tabla 20. Valores de temperatura media y  $\Delta T$  para el modelo geométrico de casa malla diseñada para Panamá). En el caso de esta estructura, los valores de  $\Delta T$  son inferiores o muy cercanos al valor planteado antes del diseño de 1,8 °C.

**Tabla 20.** Valores de temperatura media y  $\Delta T$  para el modelo geométrico de casa malla diseñada para Panamá

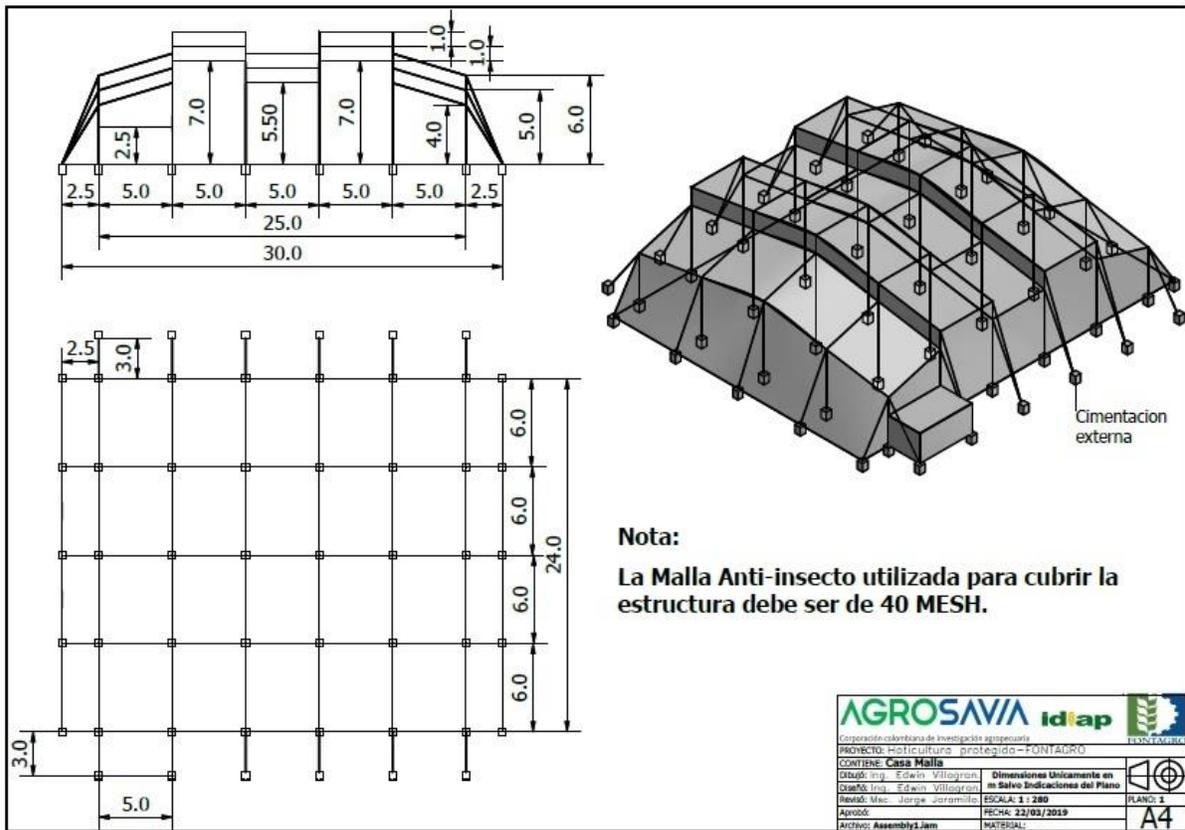
Escenario	Temperatura media (°C)	$\Delta T$ (°C)
S1	37,5 ± 1,12	1,73
S2	37,1 ± 0,78	1,32
S3	36,8 ± 0,52	1,02
S4	36,3 ± 0,31	0,52

Fuente: Elaboración propia

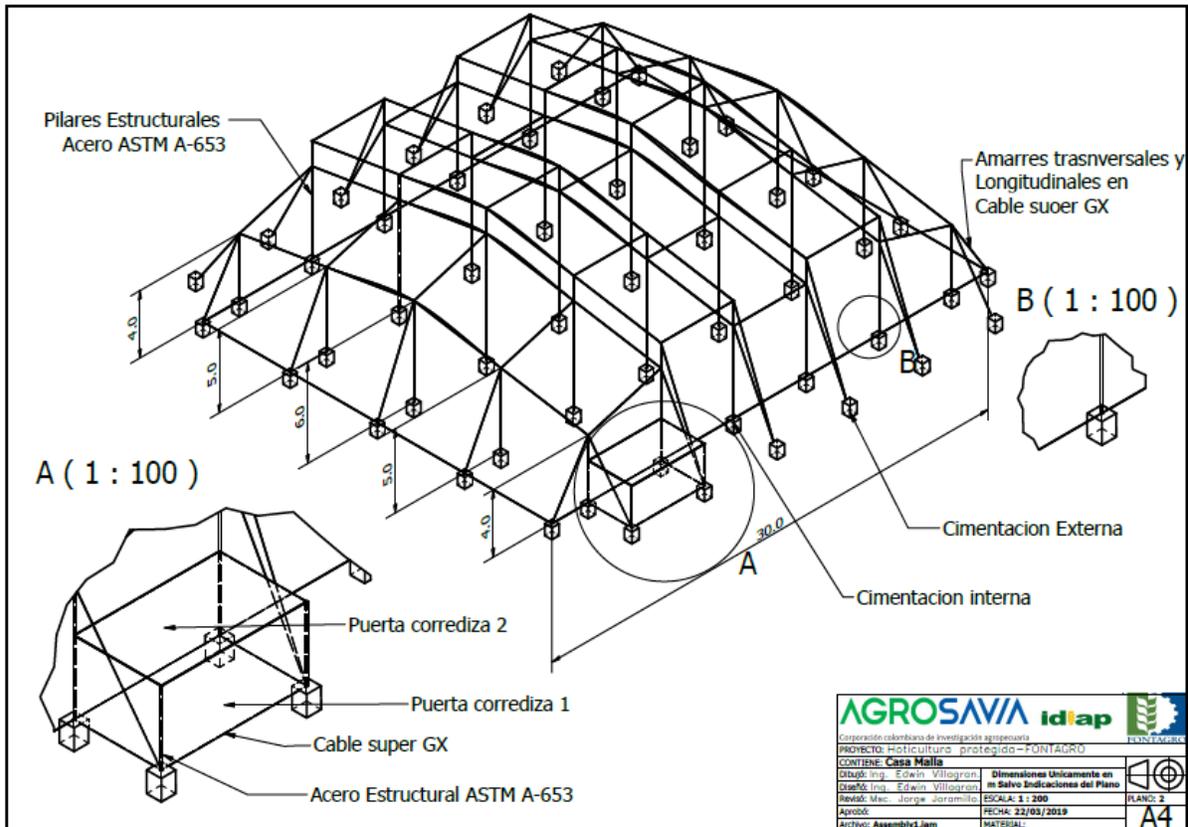
### Planos CAD

El modelo geométrico diseñado para la estructura se presenta en las Figura 27. Vistas generales del modelo geométrico de casa malla en y Figura 28. Vista isométrica del modelo geométrico de la casa malla para Panamá.. En estas pueden encontrarse los planos de vistas generales (frontal, planta e isométrica). Las dimensiones generales de la estructura son de 30 m de ancho por 24 m de largo. En este caso, es necesario contar con un terreno que tenga un área mínima de 900 m<sup>2</sup>, correspondientes a una dimensión transversal de 30 metros y una dimensión longitudinal de 20 metros, con el fin de construir la estructura y

cimentar los anclajes perimetrales.



**Figura 27.** Vistas generales del modelo geométrico de casa malla en Panamá  
Fuente: Elaboración propia



**Figura 28.** Vista isométrica del modelo geométrico de la casa malla para Panamá.

Fuente: Elaboración propia

En términos generales, las estructuras deben contener una cimentación construida en concreto reforzado, estructurada con varilla normalizada y con una resistencia  $F_c$  de  $210 \text{ kg cm}^{-2}$ . Se recomienda verificar la capacidad portante del suelo. La estructura de la casa malla debe construirse en perfiles de acero certificado ASTM A 653, que es un material laminado en caliente y cubierto con zinc.

Los amarres transversales y longitudinales deben ser construidos en cable súper GX. La cubierta y las áreas de ventilación deben ser protegidas con una malla de protección anti-insecto de 40 MESH, con un número de hilos de  $16,1 \times 10,1$  por  $\text{cm}^{-2}$  y una porosidad ( $\epsilon$ ) de 0,33, con un porcentaje de sombra de 30 %. Esta malla debe limitar el ingreso de insectos al área de cultivo.

Para finalizar, comparamos la estructura diseñada respecto a los parámetros de diseño establecidos en la

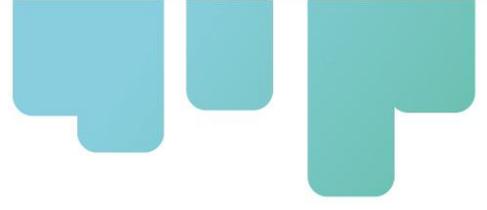
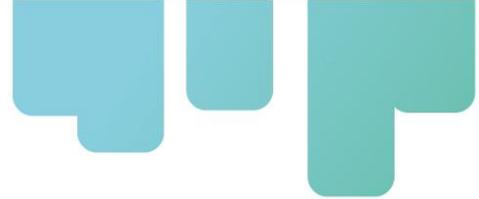


Tabla 6. Esta comparación se resume en la Tabla 21.



**Tabla 21.** Parámetros de diseño finales de la casa malla en Panamá

<b>Parámetro</b>	<b>Descripción</b>
Geometría de la casa malla	Cumple. Se diferencia de las estructuras de casa malla tradicionales que son de techo plano.
Altura de la casa malla	Cumple. Presenta una altura variable, desde una mínima de 4,0 m hasta un máximo de 9,0 m.
Tipo de malla porosa	Su selección resultó de la búsqueda de un alto grado de protección contra insectos plaga sin limitar el flujo de los patrones de aire.
Flujos de aire	Cumple. Flujos de aire con velocidad moderados y adecuados.
Homogeneidad térmica	Cumple. Véase Tabla 20. Valores de temperatura media y $\Delta T$ para el modelo geométrico de casa malla diseñada para Panamá.

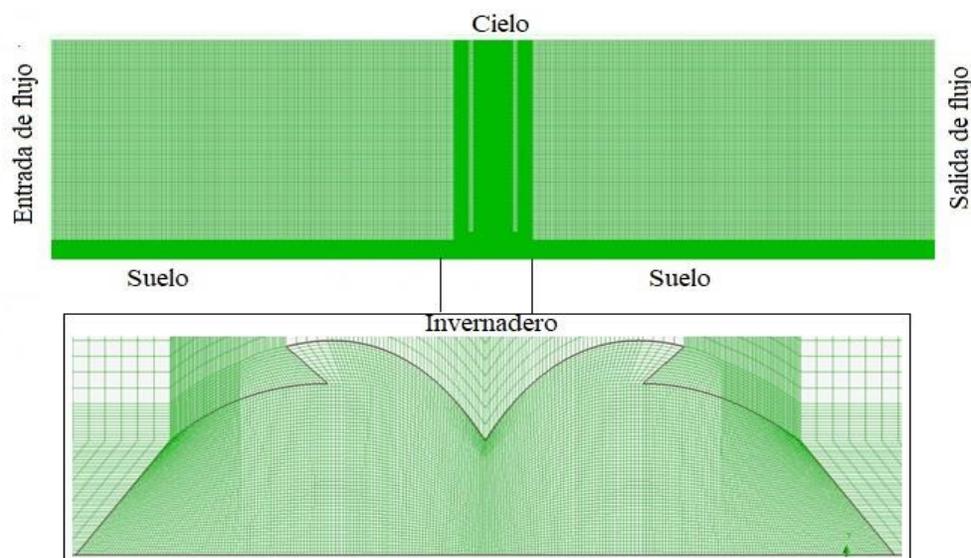
Fuente: Elaboración propia

## **Diseño geométrico del invernadero**

### **Preproceso**

En esta etapa, se definió el área del invernadero que se quería diseñar, el cual debía ser de 520 m<sup>2</sup>. La estructura debía contar con áreas de ventilación en cada uno de sus costados y fachadas, y, a su vez, en la región de la cubierta. Estas áreas de ventilación debían ser equipadas con una malla porosa a prueba de insectos, con un estudio previo realizado de la afectación sobre los patrones de flujo de aire y los índices de renovación horarios.

La cubierta del invernadero contemplada fue un filme de polietileno comercial antitérmico, con un porcentaje de transmisión y difusión de radiación solar de 75 % y 68 %, respectivamente. El dominio computacional y la sección transversal del modelo de invernadero diseñado para la región de estudio y sus grillas numéricas se presentan en la Figura 29.



**Figura 29.** Dominio computacional y mallado numérico del invernadero diseñado para Panamá.

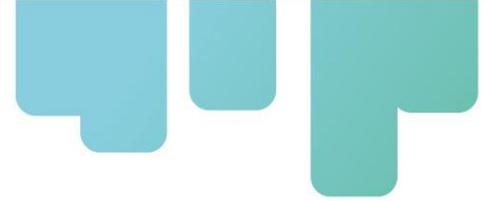
Fuente: Elaboración propia

La grilla numérica establecida en el proceso de mallado fue de tipo no estructurada y conformada por elementos cuadrados y rectangulares. En este caso, la grilla numérica seleccionada fue la número 5, de entre 9 evaluadas (Tabla 22). Esta grilla numérica contiene un total de 532.918 elementos, un tamaño que garantiza una solución totalmente independiente y sin sesgo asociado al tamaño de los elementos del mallado.

**Tabla 22.** Variación de la temperatura en el interior del invernadero en función del número de elementos de la grilla numérica

Malla	Número de elementos	Temperatura media (°C)
1	35.192	41,2
2	78.321	39,7
3	178.752	38,1
4	392.109	37,2
5	532.918	36,9
6	798.359	36,8
7	1.212.521	36,9
8	1.622.371	36,8
9	2.012.382	36,8

Fuente: Elaboración propia



La calidad de la grilla numérica se determinó mediante el factor de asimetría. Se identificó que la grilla numérica contenía un 90,5 % de los volúmenes dentro del rango de asimetría de 0 – 0,25, factor que se define como de alta calidad (Baeza et al., 2017).

Una vez definida la independencia y calidad del mallado numérico, el modelo fue usado para desarrollar las simulaciones numéricas bajo los escenarios establecidos en la Tabla 23.

**Tabla 23.** Condiciones de simulación iniciales para el diseño del invernadero en Panamá

<b>Escenario</b>	<b>Temperatura del aire (°C)</b>	<b>Humedad relativa del aire (%)</b>	<b>Velocidad del viento (m/s)</b>	<b>Dirección del viento</b>	<b>Radiación solar (W m<sup>-2</sup>)</b>
S1	35,8	70	0,5	N	976,2
S2	35,8	70	1	N	976,2
S3	35,8	70	1,6	N	976,2
S4	35,8	70	2,2	N	976,2

Fuente: Elaboración propia

### **Solución**

Las simulaciones numéricas contemplaron los modelos incluidos en la Tabla 4. En este caso, la convergencia se obtuvo una vez se completaron un total de 2.615, 2.672, 2.692 y 2.681 iteraciones para cada una de las variables contempladas en los escenarios S1, S2, S3 y S4.

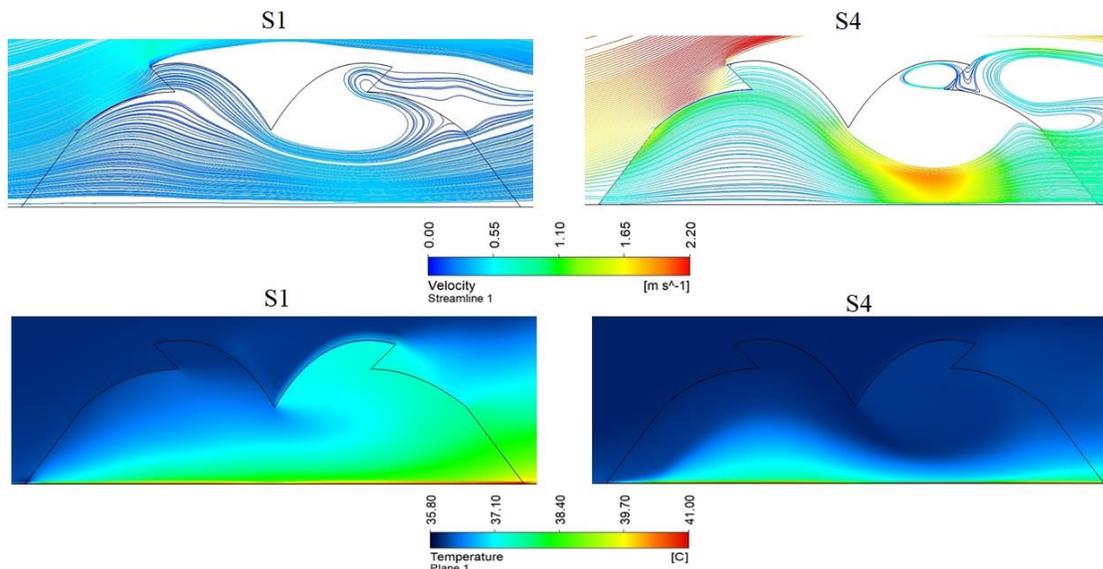
### **Posproceso**

En la Figura 30, se pueden observar los comportamientos cualitativos para los flujos de aire y la distribución espacial de la temperatura obtenidos para los escenarios S1 y S4. Se puede observar cómo las áreas de ventilación cenital y lateral del costado de barlovento permiten el ingreso de flujo de aire a través de la apertura efectiva de estas regiones. Una vez los flujos de aire ingresan al invernadero, se dirigen directamente hacia la zona de cultivo y se desplazan por el eje transversal del invernadero hasta salir por las áreas de ventilación dispuestas en el costado de sotavento.

En términos generales, se observan flujos de aire uniformes y distribuidos en gran parte del área del invernadero, a excepción de un área de la cubierta de la nave número 2. Esto puede estar influenciado por la cercanía de la ventana cenital de la nave 2, la cual permite la salida de gran parte del flujo de aire que se eleva en esta región, influenciado por el efecto eólico y por una convección libre. Este comportamiento es característico de este tipo de invernaderos multitúnel, en el que las ventanas cenitales funcionan como áreas de entrada y salida de aire (Villagran et al., 2019).



Para este caso, se observa nuevamente un comportamiento térmico homogéneo en la zona donde se desarrollan los cultivos. La magnitud del valor de la temperatura en el interior del invernadero disminuye a medida que aumenta la velocidad del aire exterior. Esto nos indica que el invernadero mejora sus índices de renovación en función del aumento de la velocidad del aire exterior, por lo tanto, se puede inferir que el diseño obtenido es adecuado para las condiciones climáticas de la región de estudio.



**Figura 30.** Patrones de distribución de flujo de aire y distribución espacial de la temperatura obtenidos mediante simulación para S1 y S4.

Fuente: Elaboración propia

Se calculó la velocidad media de los patrones de flujo de aire en términos cuantitativos. Se observó que el efecto de la pantalla porosa a prueba de insectos genera una pérdida de la velocidad del aire en el interior del invernadero, en relación con la velocidad del ambiente exterior simulada en cada caso (Tabla 24). Los porcentajes de reducción de velocidad oscilaron entre 36 % y 51 %, los cuales son valores inferiores a los reportados en otro estudio sobre invernaderos equipados con mallas anti-insecto en las áreas de ventilación (Akrami et al., 2020).

**Tabla 24.** Valores de velocidad media en el invernadero simulado para Panamá

Escenario	Velocidad media (m/s)
S1	0,27 ± 0,08
S2	0,56 ± 0,14
S3	0,77 ± 0,26
S4	1,42 ± 0,36

Fuente: Elaboración propia



Los valores de temperatura media interior y  $\Delta_T$  obtenidos en este prototipo de invernadero multitúnel se muestran en la

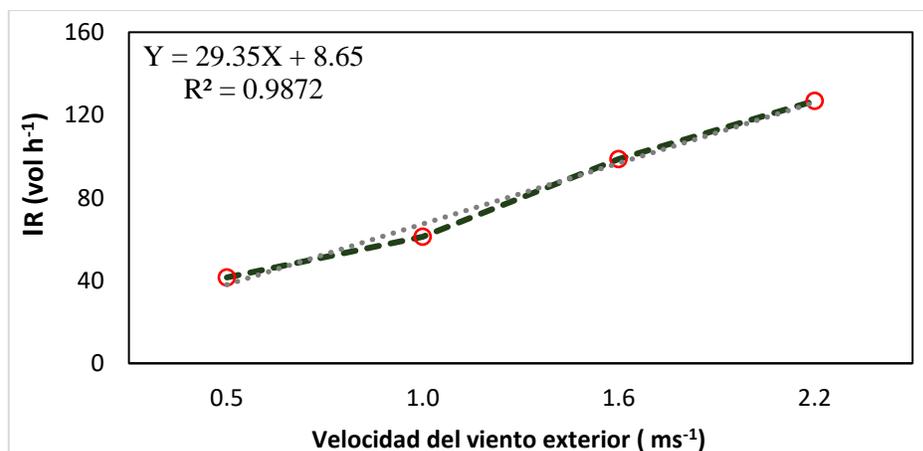
Tabla 25. En general, se observa que el invernadero diseñado responde a los objetivos propuestos al inicio de la investigación, respecto a la búsqueda de comportamientos térmicos homogéneos y con  $\Delta_T$  por debajo de 2 °C.

**Tabla 25.** Valores de temperatura media y  $\Delta_T$  para el invernadero diseñado para Panamá

Escenario	Temperatura media (°C)	$\Delta_T$ (°C)
S1	37,7 ± 1,12	1,92
S2	37,3 ± 0,71	1,51
S3	36,9 ± 0,61	1,03
S4	36,6 ± 0,42	0,82

Fuente: Elaboración propia

Los IR para este invernadero multitúnel tienen valores superiores al mínimo recomendado de 40 volúmenes hora<sup>-1</sup> (Figura 31). Nuevamente, el comportamiento se ajustó a una curva lineal con un coeficiente de correlación  $R^2$  de 0,9872.



**Figura 31.** Índices de renovación horarios (IR) calculados para el invernadero diseñado para Panamá.

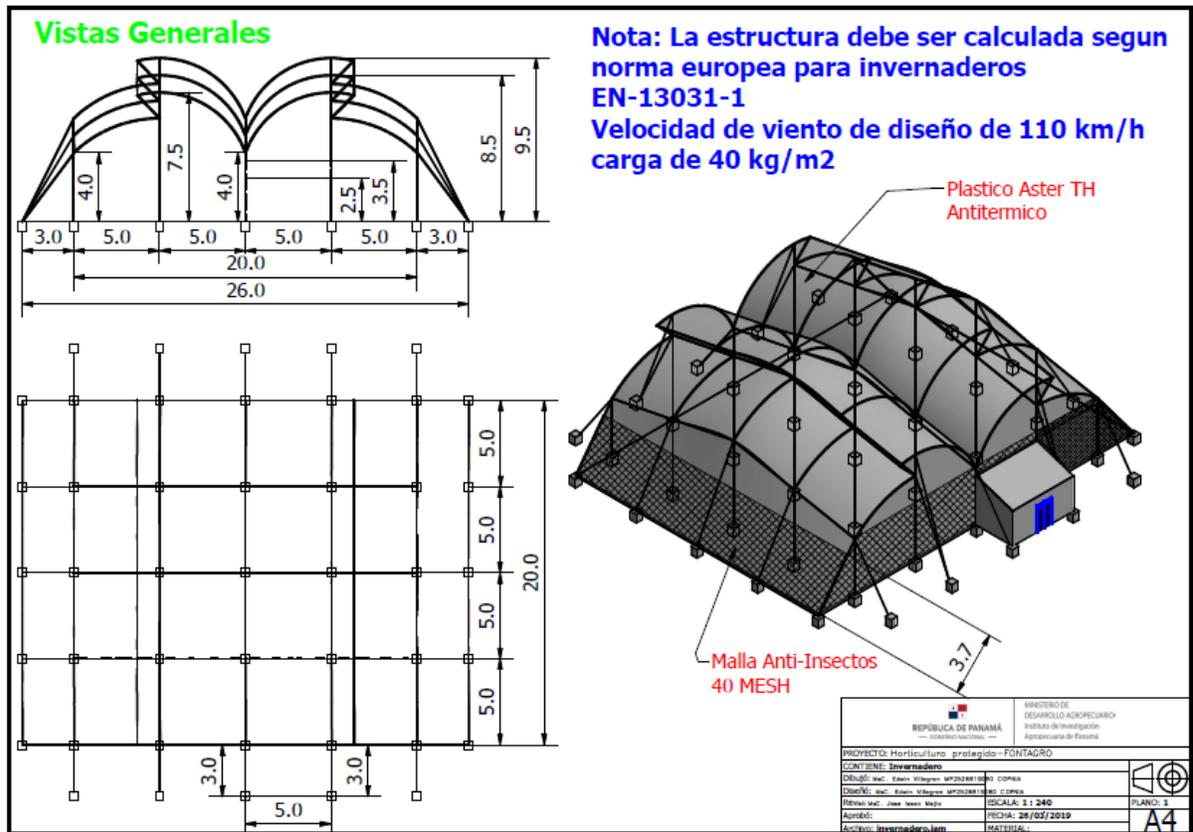
Fuente: Elaboración propia

### Planos CAD

El modelo geométrico final seleccionado se presenta en las Figura 32. Vistas generales del modelo geométrico del invernadero de Panamá. y Figura 33. Vista isométrica del modelo

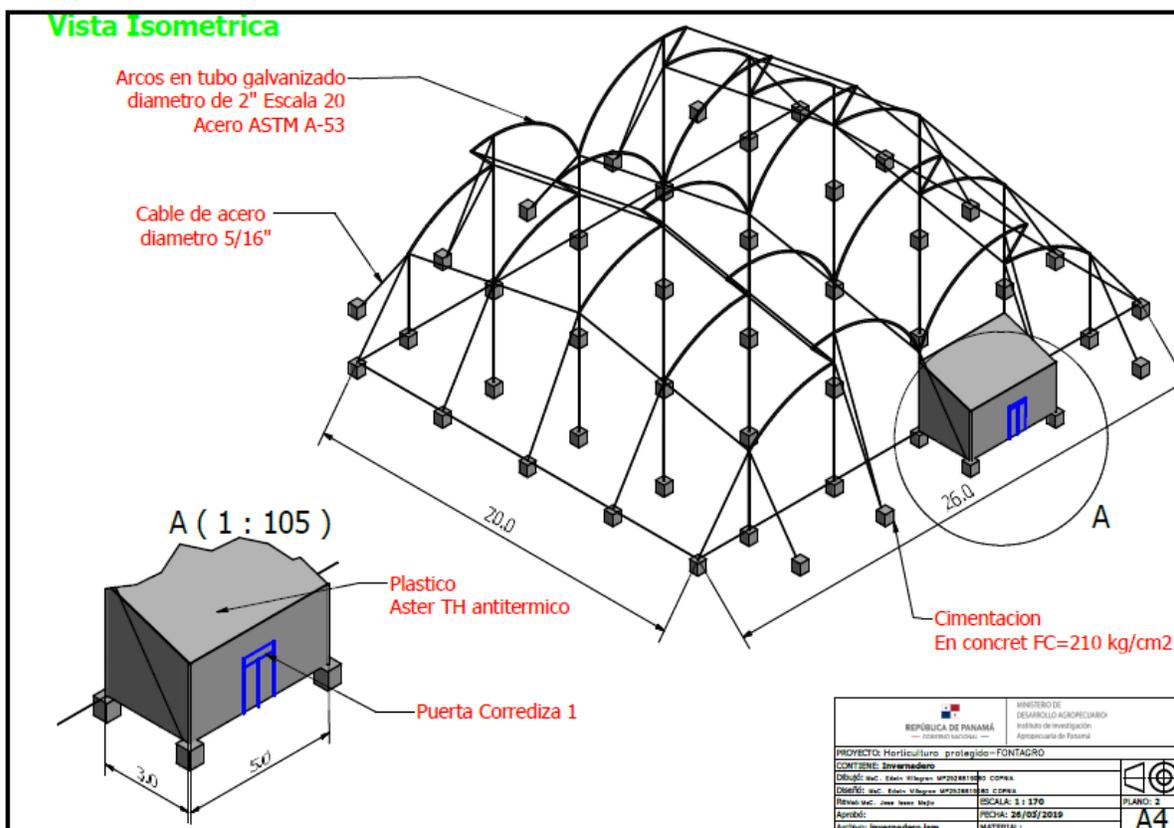
geométrico del invernadero de Panamá., en las cuales pueden encontrarse los planos en vistas generales (frontal, planta e isométrica). Las dimensiones generales de la estructura son de 26 m de ancho por 20 m de largo. En este caso, es necesario contar con un terreno que tenga un área mínima de 676 m<sup>2</sup>, correspondientes a una dimensión transversal de 26 metros y una dimensión longitudinal de 25 metros, para así poder construir la estructura y cimentar los anclajes perimetrales.

En el caso de esta estructura, que estará expuesta a ráfagas de viento con una velocidad máxima de 110 km h<sup>-1</sup>, se plantea una cimentación de concreto reforzado con Fc de 210 kg cm<sup>-2</sup>. Esta tendrá perfiles tubulares de acero ASTM-A53 y un diámetro de 2" y escala 20. Respecto a los amarres perimetrales y anclajes, se fabricarán en cable de acero de diámetro de 5/16".



**Figura 32.** Vistas generales del modelo geométrico del invernadero de Panamá.

Fuente: Elaboración propia



**Figura 33.** Vista isométrica del modelo geométrico del invernadero de Panamá.

Fuente: Elaboración propia

Para finalizar, comparamos la estructura diseñada con los parámetros establecidos en la Tabla 5. Esta comparación se resume en la Tabla 26.



**Tabla 26.** Parámetros de diseño finales del invernadero en Panamá

<b>Parámetro</b>	<b>Descripción</b>
Eje longitudinal del invernadero (largo).	Cumple. El eje longitudinal queda ubicado en sentido perpendicular a la dirección dominante del viento.
Eje transversal del invernadero (ancho)	Cumple. La longitud del eje transversal del invernadero es inferior a 40 m.
Altura del invernadero	Cumple. La altura mínima es de 4,0 m y la máxima de 9,5 m. La relación de volumen de aire encerrado versus superficie cubierta es de 5,4 m <sup>3</sup> m <sup>-2</sup> .
Pendiente longitudinal del invernadero	Cumple. La pendiente longitudinal del invernadero S <sub>L</sub> es igual al 10 %.
Superficie de ventilación.	Cumple. Sv/Ssc = 80,7 %.
Disposición de las áreas de ventilación.	Cumple. Superficies de ventilación en los costados, fachadas y regiones de la cubierta.
Índices de renovación	Cumplen. Véase Figura 31.
Presencia de pantallas porosas a pruebas de insecto	Cumple. Se equipó el invernadero con malla anti-insecto en todas las áreas de ventilación.
Geometría de la estructura y forma de la cubierta	Cumple. Se estableció un invernadero de tipo multitúnel de 2 naves adosadas.
Homogeneidad térmica	Cumple. Los valores de Δ <sub>T</sub> son inferiores a 2 °C.
Uso de pantallas de sombrero	No están contempladas inicialmente para este prototipo.

Fuente: Elaboración propia

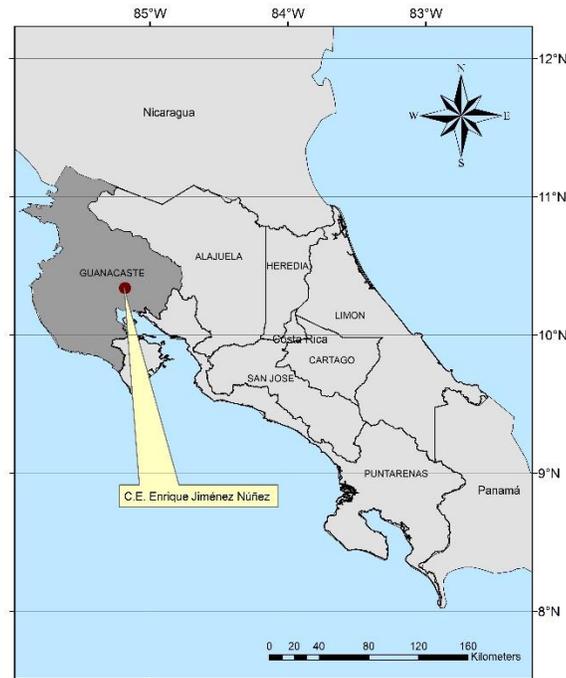
## **Resultados para Costa Rica**

### **Caracterización climática**

#### **Zona piloto**

El sitio piloto de la investigación en Costa Rica es la Estación Experimental Enrique Jiménez Núñez del Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA), ubicada en el Cantón de Cañas, provincia de Guanacaste, en las coordenadas

10,3447° latitud norte y 85,1780° longitud oeste, a 14 m s. n. m. (Figura 34).



**Figura 34.** Ubicación de la zona piloto en Costa Rica. Estación Experimental Enrique Jiménez Núñez, el cantón de Cañas, provincia de Guanacaste.

Fuente: Elaboración propia.

El lugar está ubicado al interior de la zona de vida bosque tropical seco, según la clasificación de Holdridge. La provincia de Guanacaste está en una región perteneciente al régimen de precipitación del Pacífico, conocido por la presencia de un periodo seco y otro lluvioso bien definidos. Se destaca en esta región la presencia de grupos climáticos como: áreas de clima templado (mesotermal) y áreas de clima tropical con estación seca, ambos modificados a lo largo de esta región por factores geográficos que influyen en la intensidad de los sistemas atmosféricos. Esta región se caracteriza por ser una de las más extensas. Se destaca la diversidad climática del Pacífico nacional, razón por la que se ha dividido en cuatro

subregiones para su descripción general: subregión occidental de la Península de Nicoya (PN1), subregión central del Pacífico Norte (PN2), base y faldas de las cordilleras de Guanacaste y Tilarán (PN3), y cuenca baja de los ríos Barranca y Grande de Tárcoles (PN4).

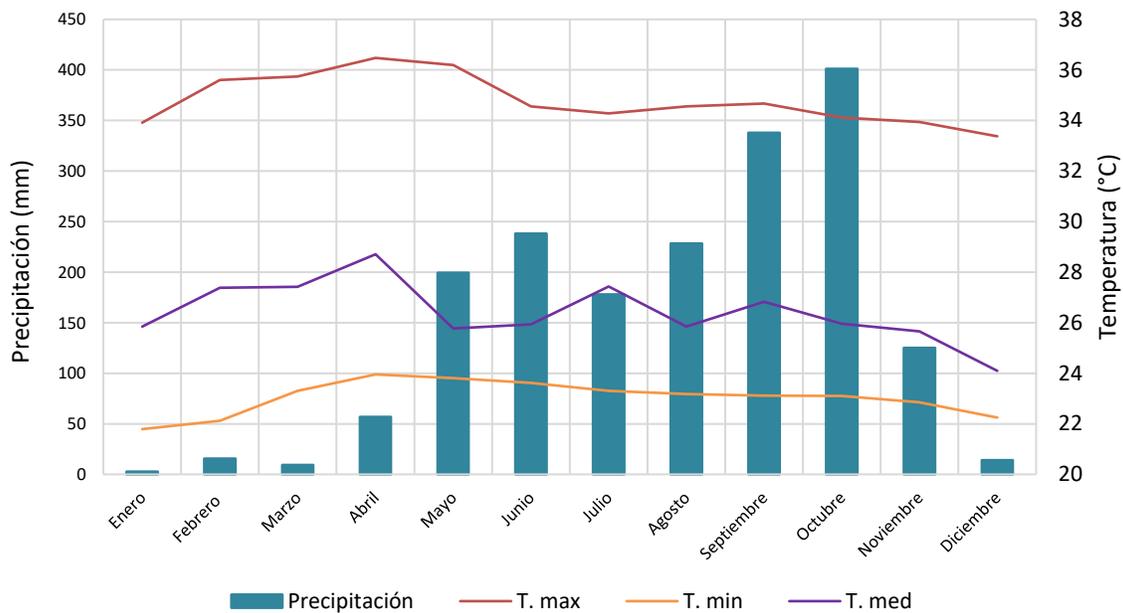
### **Análisis de la información climática de la zona piloto**

El análisis climático local se realizó con los registros diarios de las variables de precipitación, temperatura media, máxima y mínima, humedad relativa, brillo solar y velocidad del viento, del periodo 2001 al 2009, en la estación meteorológica del Ingenio Taboga, ubicada a 4,7 km

de la Estación Experimental.

### Precipitación y temperaturas (máxima, mínima y media)

Durante la época seca (en la zona del bosque del trópico seco), que inicia en el mes de diciembre, ocurre un cese de precipitaciones y un aumento de la temperatura, que llega a valores máximos que superan los 34 °C. En el mes de abril, inicia la etapa de transición, y, en la segunda quincena del mes, las primeras lluvias del año. Los meses de septiembre y octubre son los más favorables en cuanto a milímetros de lluvia, con 338 mm y 401 mm, respectivamente. Este hecho se puede asociar con una reducción de la temperatura promedio, la cual ronda en promedio los 26 °C (Figura 35). El promedio multianual de la precipitación es de aproximadamente 1.806 mm, y las temperaturas promedio multianual máxima, media y mínima son de 35 °C, 26 °C y 23 °C, respectivamente.



**Figura 35.** Precipitación, temperaturas máxima, media y mínima, promedio mensual multianual, estimados a partir de los registros de la estación Ingenio Taboga, Costa Rica. Fuente: Elaboración propia.

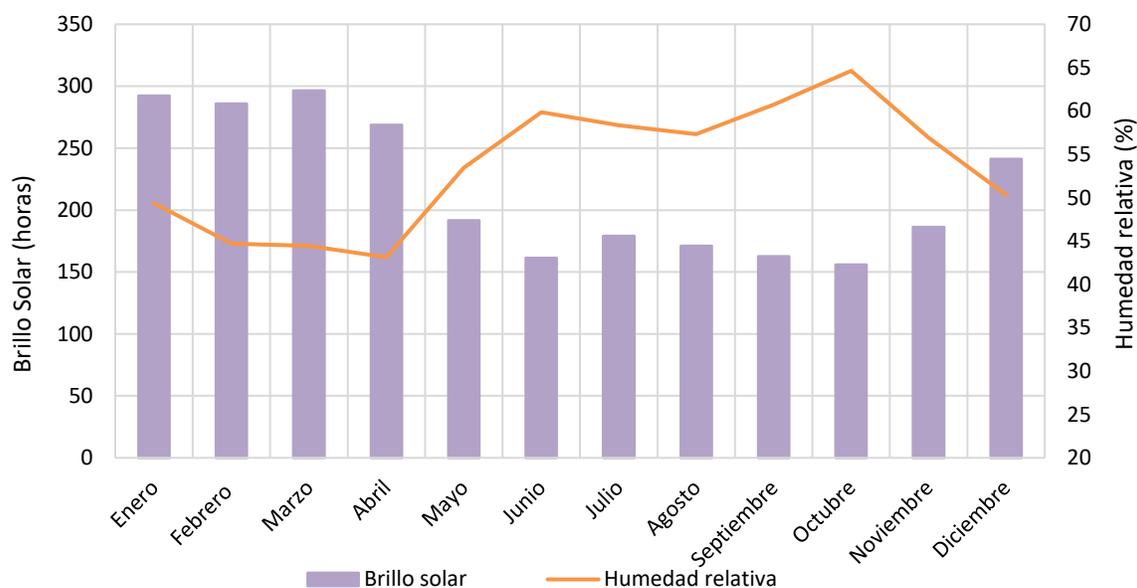
### Humedad relativa y brillo solar

Por las razones antes expuestas, respecto a las diferentes condiciones ambientales en las épocas secas y lluviosas, los días con mayor brillo solar ocurren entre los meses de diciembre y abril, con valores que rondan las 286 horas por mes de brillo solar, lo que significa un promedio de 9,5 horas de brillo solar por día. Por el contrario, los niveles de brillo decaen en la época lluviosa, pues llegan a ser de 156 horas, es decir, un promedio por día de 5,2 horas, lo que nos advierte que el potencial de luminosidad en la zona decae drásticamente de mayo a noviembre. De acuerdo con Maps (2016), para la zona se tiene un



promedio de radiación solar anual de 2.080 kWh/m<sup>2</sup>.

En cuanto a la humedad relativa, aunque no es inversamente proporcional con la temperatura, si tiene una estrecha relación, por lo que se puede apreciar que en la época seca se registran los menores valores de humedad, cercanos al 45 %. En la época lluviosa, se encuentran los mayores valores de humedad, con promedios que superan el 60 % (Figura 35).

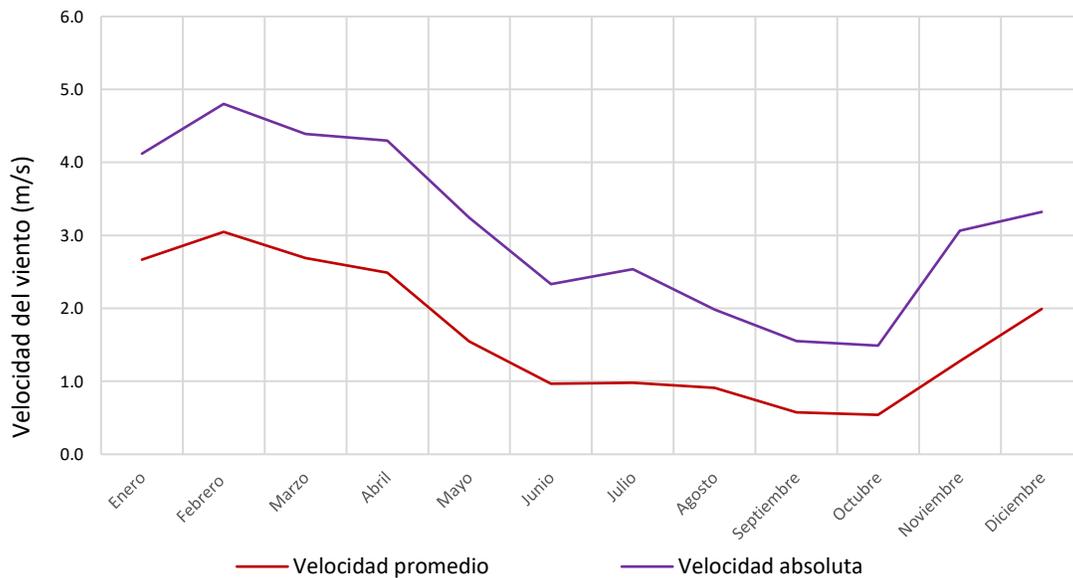


**Figura 36.** Humedad relativa y brillo solar, promedio mensual multianual, estimados a partir de los registros de la estación Ingenio Taboga, Costa Rica.

Fuente: Elaboración propia.

### Velocidad del viento

El aumento de la velocidad del viento inicia en el mes de diciembre y se extiende hasta el mes de marzo, cuando el movimiento del aire puede llegar en promedio a 3 m/s (Figura 37). Este potencial de viento es el gran refrigerante de la provincia de Guanacaste, ya que elimina grandes masas de aire caliente. El mes con las mayores temperaturas es abril, y esto se debe a la disminución de la velocidad del aire. De acuerdo con la velocidad absoluta se puede observar que el viento puede tomar valores de hasta 4,8 m/s en el mes de febrero.



**Figura 37.** Comportamiento de la velocidad del viento a escala mensual, estimado a partir de los registros de la estación Ingenio Taboga, Costa Rica.

Fuente: Elaboración propia.

### Diseño geométrico de las estructuras

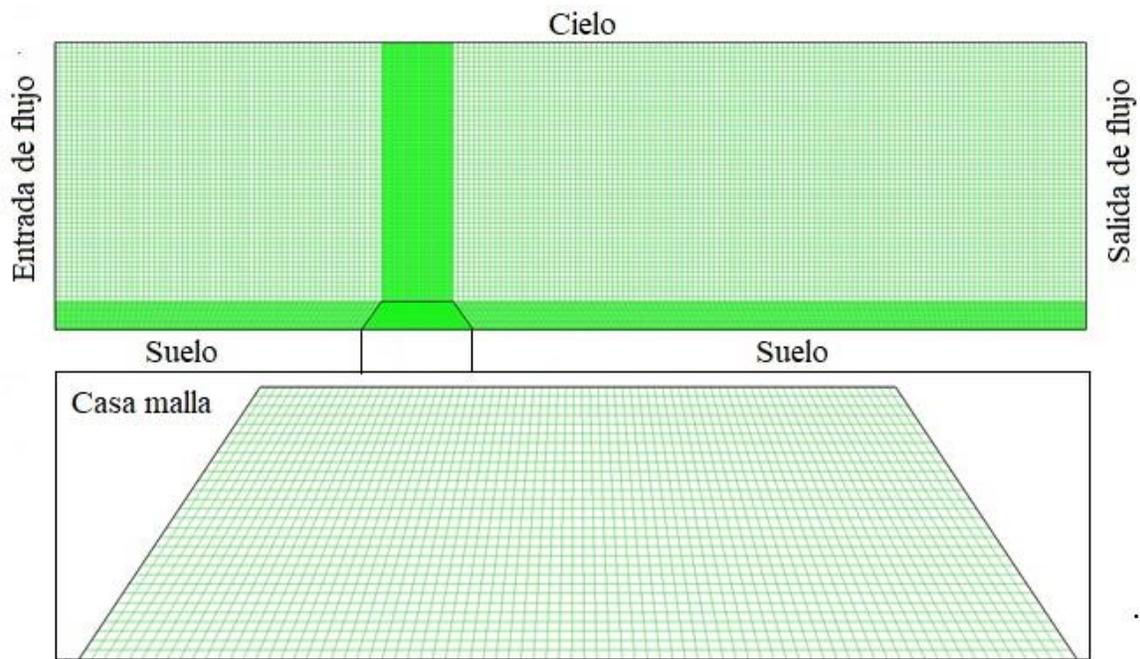
En el caso específico de Costa Rica, debido a su experiencia exitosa en el uso de estructuras de casa malla, se definió implementar el uso de dos estructuras de esta tipología, con variación únicamente en su altura. Así mismo, se diseñó un modelo de invernadero ventilado naturalmente, como alternativa de uso a las estructuras de casa malla. Estas tres estructuras serán construidas a escala real y validadas de forma numérica y experimental en una siguiente fase de la investigación.

### Diseño geométrico de las casas de malla

#### Preproceso

En esta etapa se definió el diseño de dos estructuras de casa malla, así como el tipo de malla anti-insecto a utilizar (malla comercial de 40 MESH), con un número de hilos de 16,1 x 10,1 por  $\text{cm}^{-2}$ , una porosidad ( $\epsilon$ ) de 0,33 y un nivel de sombreado del 30 %. Este tipo de malla es utilizada con éxito en las estructuras de casa malla usadas actualmente.

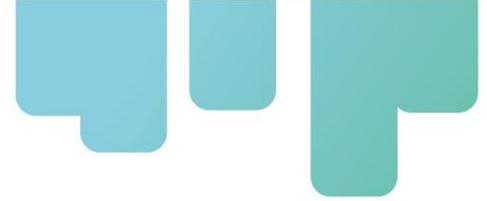
En un paso posterior, se definió y construyó la geometría de la sección transversal de las dos estructuras de casa malla (CM-1 & CM-2), cada una encerrada en su propio dominio computacional. Estos dominios computacionales fueron divididos en grillas numéricas estructuradas de elementos cuadrados (Figura 38).



**Figura 38.** Dominio computacional y malla numérica de la casa malla CM-1, diseñada para Costa Rica.  
Fuente: Elaboración propia

En este caso, la grilla numérica seleccionada fue la número 3, de entre 6 evaluadas para CM-1, y la número 4, de entre 6 evaluadas para CM-2 (Tabla 27). Estas grillas numéricas contienen un total de 275.307 y 423.901 elementos para CM-1 y CM-2, respectivamente. Estos tamaños garantizan soluciones que no tienen sesgo alguno asociado con el número de elementos del malla.

Los factores de asimetría usados para realizar la evaluación de la calidad de las grillas numéricas contenía para CM-1 un 99,1 %, y para CM-2 un 98,7 % de los volúmenes dentro del rango de asimetría de 0-0,25, factor que se define como de alta calidad (Baeza et al., 2017).



**Tabla 27.** Variación de la temperatura en el interior de las casas mallas (CM-1 & CM-2) en función del número de elementos de la grilla numérica

Malla	CM-1		CM-2	
	Número de elementos	Temperatura media (°C)	Número de elementos	Temperatura media (°C)
1	53.162	40,3	42.782	40,2
2	126.578	39,2	83.174	39,6
3	275.307	37,1	239.752	37,8
4	596.623	37,1	423.901	36,9
5	1.025.203	37,1	918.726	36,9
6	1.891.601	37,1	1.786.172	36,9

Fuente: Elaboración propia

Una vez definida la independencia y la calidad del mallado numérico, el modelo fue usado para desarrollar las simulaciones numéricas bajo las condiciones iniciales establecidas en la Tabla 28 .

**Tabla 28.** Condiciones de simulación iniciales para CM-1 y CM-2 en Costa Rica

Escenario	Temperatura del aire (°C)	Humedad relativa del aire (%)	Velocidad del viento (m/s)	Dirección del viento	Radiación solar (W m <sup>-2</sup> )
S1	36,2	55	0,5	E	780,5
S2	36,2	55	1	E	780,5
S3	36,2	55	1,5	E	780,5
S4	36,2	55	3,0	E	780,5

Fuente: Elaboración propia

## Solución

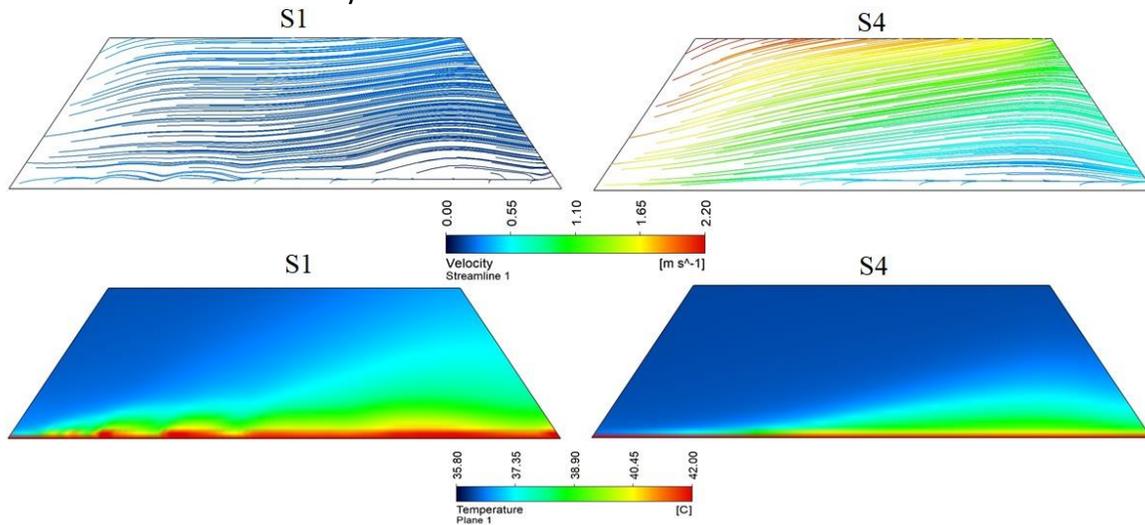
Las simulaciones numéricas contemplaron los modelos incluidos en la Tabla 4. En el caso de CM-1, la convergencia se obtuvo una vez se completaron un total de 1.548, 1.579, 1.492 y 1.517 iteraciones para cada una de las variables contempladas en los escenarios S1, S2, S3 y S4. En el caso de CM-2, la convergencia se obtuvo una vez se completaron un total de 1.891, 1.879, 1.791 y 1.768 iteraciones para cada una de las variables contempladas en los escenarios S1, S2, S3 y S4.

## Posproceso

En las Figura 39 y Figura 40, se pueden observar los comportamientos de los patrones de

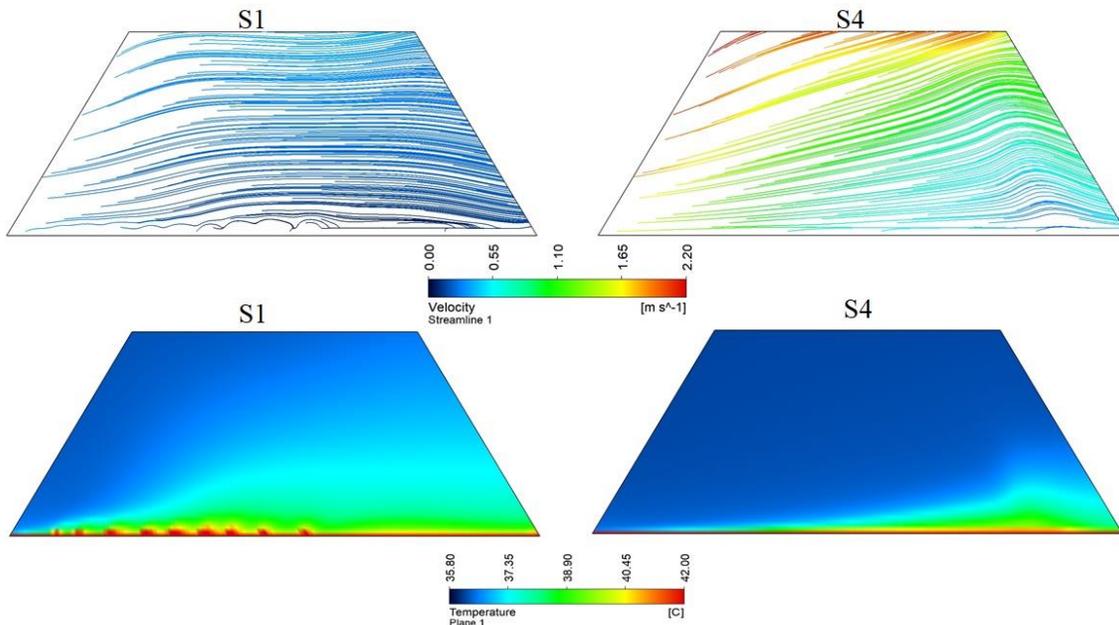


flujo de aire para las casas malla CM-1 y CM-2. En general, en estos escenarios se pueden observar cómo aparecen los principales inconvenientes del patrón de flujo de aire en este tipo de estructuras de techo plano. Los patrones de flujo de aire presentan mayor velocidad cerca de la región del techo de la estructura y tienen unas áreas de escasa velocidad cerca del costado de sotavento, este tipo de comportamiento genera condiciones térmicas heterogéneas en la zona en la que se desarrollan los cultivos y gradientes térmicos entre los costados de barlovento y sotavento.



**Figura 39.** Patrones de distribución de flujo de aire y distribución espacial de la temperatura obtenidos mediante simulación para S1 y S4 en CM-3.

Fuente: Elaboración propia



**Figura 40.** Patrones de distribución de flujo de aire y distribución espacial de la temperatura



obtenidos mediante simulación para S1 y S4 en CM-5.

Fuente: Elaboración propia

En términos cuantitativos, las velocidades medias oscilaron entre  $0,15 \pm 0,07$  m/s y  $0,61 \pm 0,18$  m/s para los escenarios S1 y S4 en CM-1. En los mismos escenarios, para CM-2, oscilaron entre  $0,17 \pm 0,04$  m/s y  $0,78 \pm 0,27$  m/s (Tabla 29). Estos valores son inferiores a los reportados para las estructuras de casa malla diseñadas para Colombia y Panamá, por lo que se puede validar la conclusión dada respecto a los beneficios que se obtienen en los patrones de flujo de aire y la distribución térmica, determinados por las variaciones en la geometría del techo de la estructura.

**Tabla 29.** Valores de velocidad media en las casas mallas CM-1 y CM2, diseñadas para Costa Rica

Escenario	CM-1	CM-2
	Velocidad media (m/s)	Velocidad media (m/s)
S1	$0,15 \pm 0,07$	$0,17 \pm 0,04$
S2	$0,24 \pm 0,17$	$0,25 \pm 0,08$
S3	$0,34 \pm 0,22$	$0,51 \pm 0,17$
S4	$0,61 \pm 0,18$	$0,78 \pm 0,27$

Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, los valores de temperatura media oscilaron entre  $37,9 \text{ °C} \pm 1,32 \text{ °C}$  y  $36,9 \text{ °C} \pm 0,81 \text{ °C}$ , para S1 y S4, en CM-1. Mientras que para CM-2, estos valores estuvieron dentro del rango de  $37,7 \text{ °C} \pm 1,50 \text{ °C}$  y  $36,7 \text{ °C} \pm 0,41 \text{ °C}$ , para S1 y S4 (Tabla 30). Estos valores son superiores a los reportados en el caso de los diseños de Panamá y Colombia, aun cuando las estructuras CM-1 y CM-2 son de menor sección transversal que las estructuras de los otros países, por lo que se esperaría que tuvieran un mejor comportamiento.

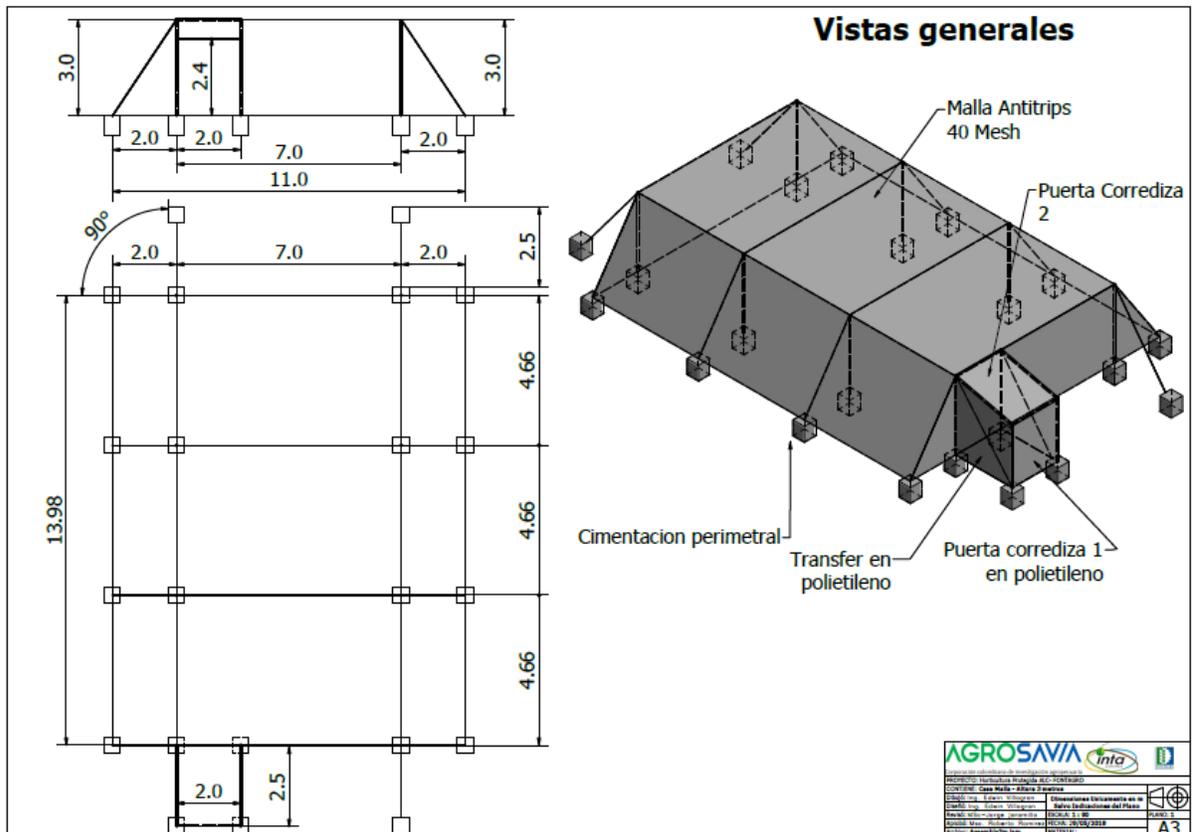
**Tabla 30.** Valores de temperatura media y  $\Delta_T$  para las casas mallas CM-1 y CM2 diseñadas para Costa Rica

Escenario	CM-1		CM-2	
	Temperatura media (°C)	$\Delta_T$ (°C)	Temperatura media (°C)	$\Delta_T$ (°C)
S1	$37,9 \pm 1,32$	1,71	$37,7 \pm 0,72$	1,50
S2	$37,3 \pm 1,38$	1,30	$37,2 \pm 1,28$	1,01
S3	$37,2 \pm 0,93$	1,01	$37,1 \pm 1,32$	0,92
S4	$36,9 \pm 0,81$	0,72	$36,7 \pm 0,41$	0,51

Fuente: Elaboración propia

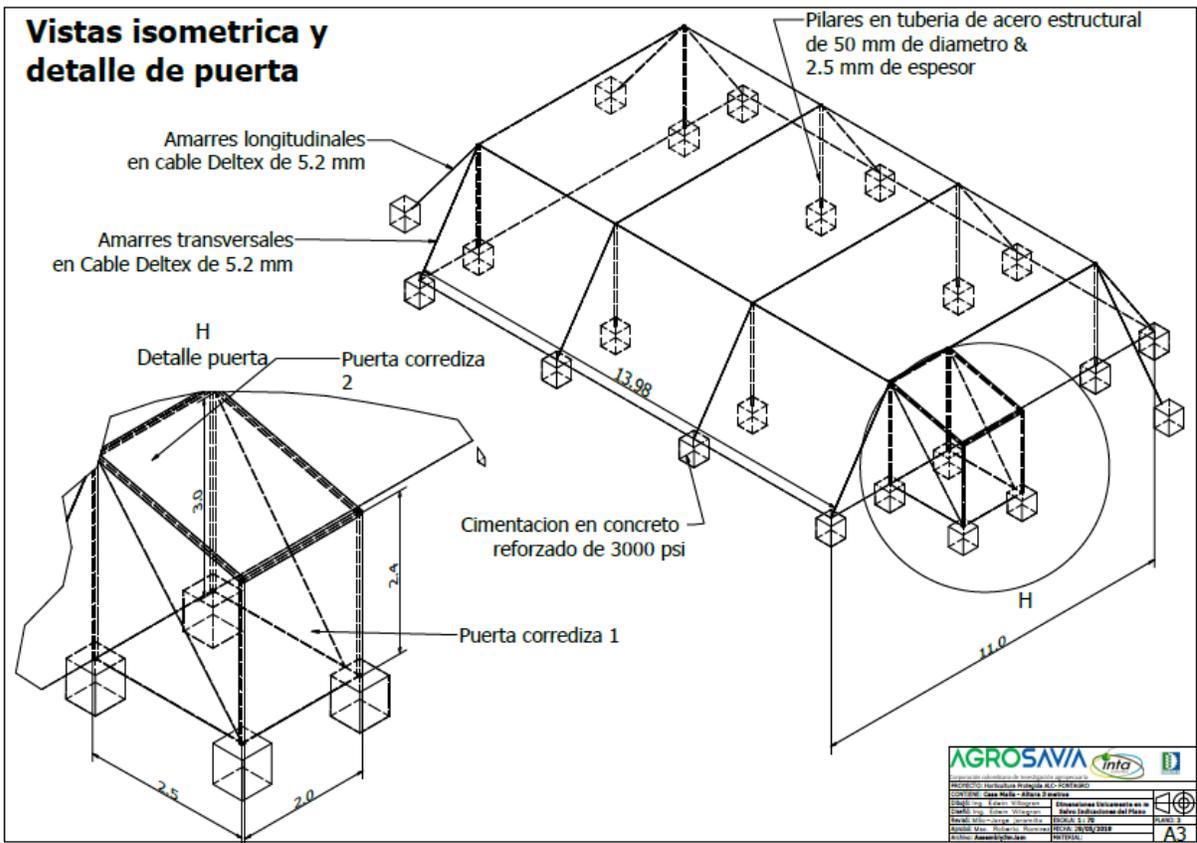
## Planos CAD

Los planos generales, así como los materiales sugeridos para la construcción de la estructuras CM-1 y CM-2, se pueden encontrar en las Figura 41. Vistas generales del modelo geométrico de la casa malla CM-1 diseñada para Costa Rica.,Figura 42. Vistas generales del modelo geométrico de la casa malla CM-1 diseñada para Costa Rica., 43 y 44. En general, en estos planos se encuentran las especificaciones del material de cubierta, el tipo de estructura, el material para los anclajes y la cimentación.



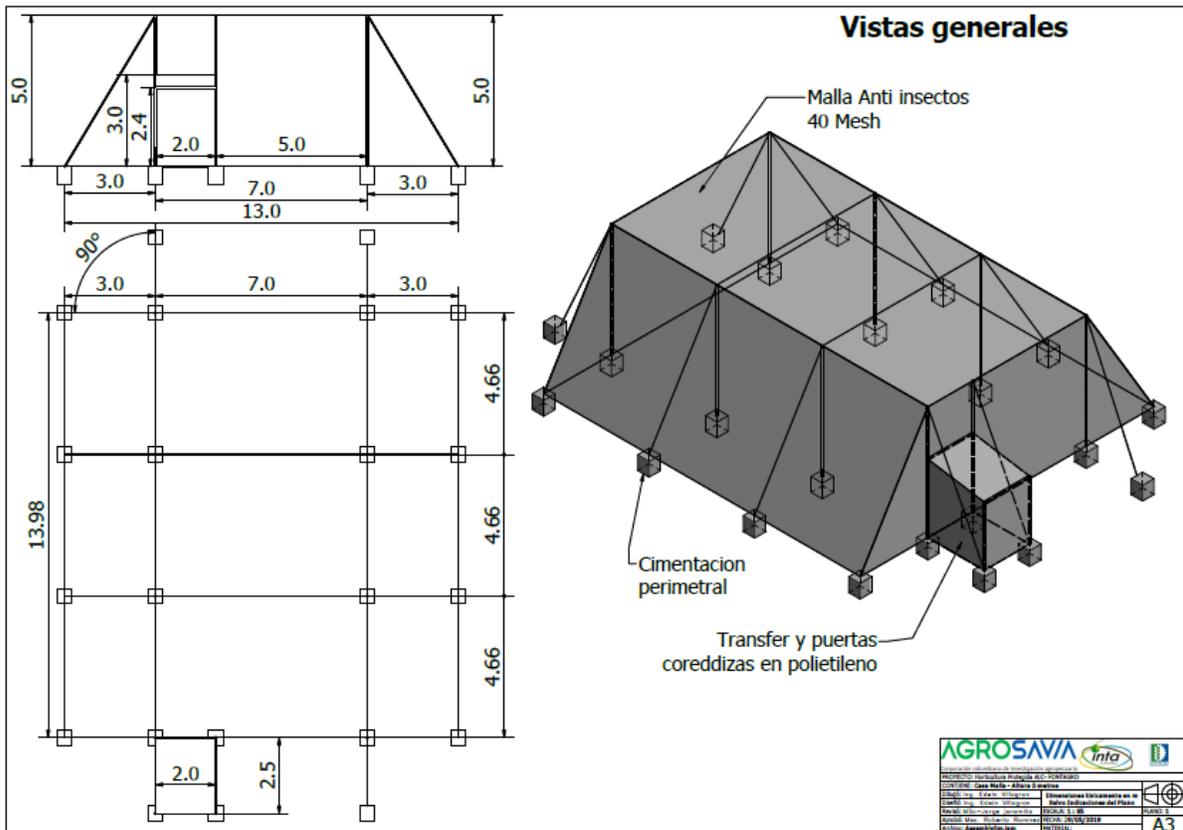
**Figura 41.** Vistas generales del modelo geométrico de la casa malla CM-1 diseñada para Costa Rica.

Fuente: Elaboración propia



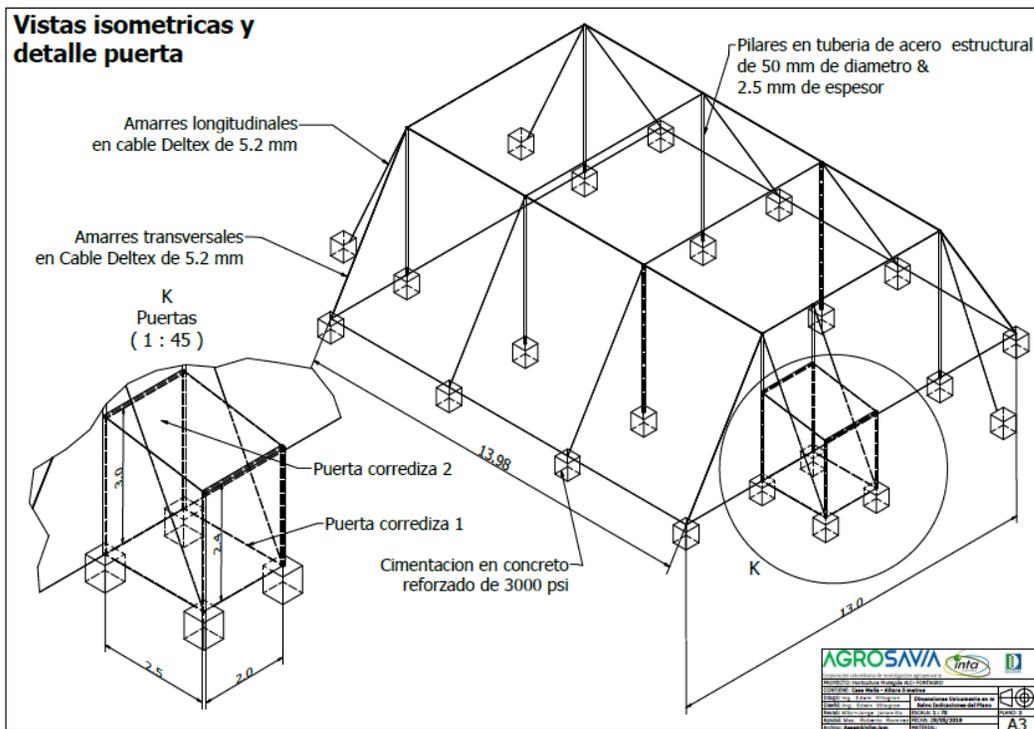
**Figura 42.** Vistas generales del modelo geométrico de la casa malla CM-1 diseñada para Costa Rica.

Fuente: Elaboración propia



**Figura 43.** Vistas generales del modelo geométrico de la casa malla CM-2 diseñada para Costa Rica.

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 44.** Vistas generales del modelo geométrico de la casa malla CM-1 diseñada para Costa Rica.

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 31.** Parámetros de diseño finales de las casas malla CM-1 y CM-2 diseñadas para Costa Rica

Descripción		
Parámetro	CM-1	CM-2
Geometría de la casa malla	Son casas mallas de techo plano como las construidas de forma convencional.	
Altura de la casa malla	Cumple. Presenta una altura uniforme de 3 m.	Cumple. Presenta una altura uniforme de 5 m.
Tipo de malla porosa.	Es el tipo de malla porosa a prueba de insectos usada en esta región.	
Flujos de aire.	No cumple. Flujos de aire inadecuados.	
Homogeneidad térmica.	Cumplen con los objetivos de esta investigación. Aunque se debe resaltar que estas estructuras son de tamaño reducido y aun así presentan comportamientos térmicos heterogéneos.	

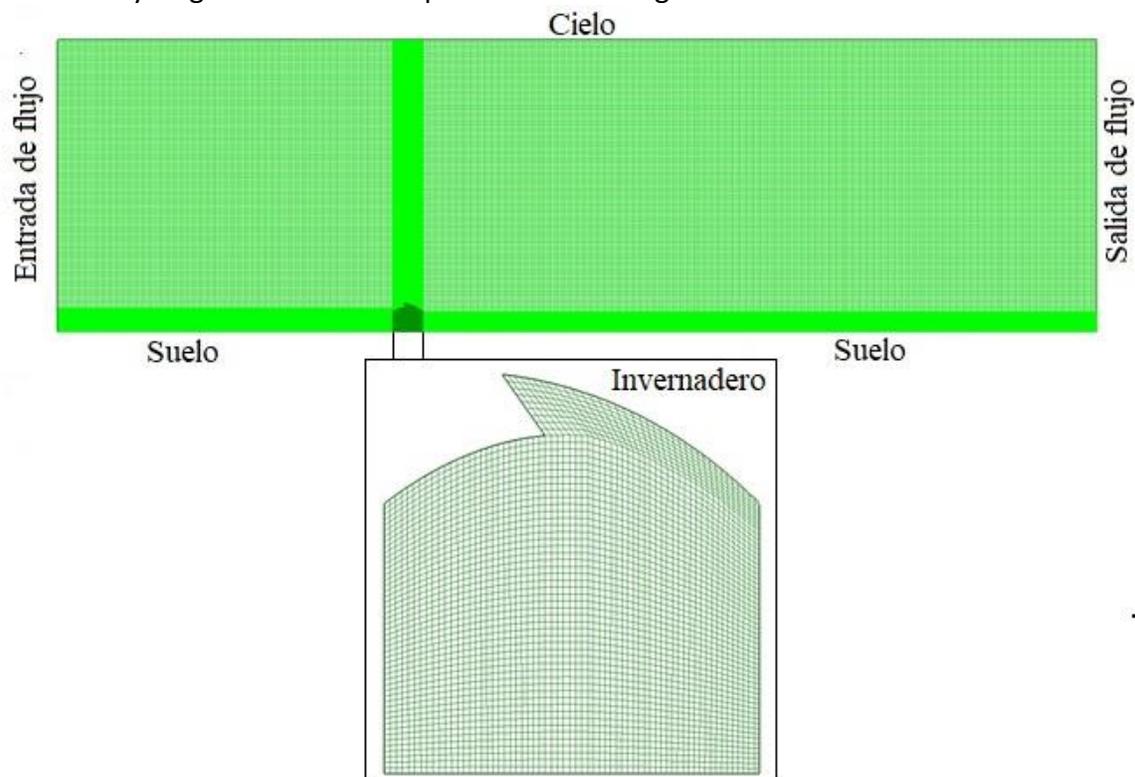
Fuente: Elaboración propia

## Diseño geométrico de invernadero

### Preproceso

Para esta fase, se determinó diseñar el modelo geométrico de un invernadero mono-span de tipo multitúnel. Este prototipo debía estar equipado con áreas de ventilación lateral y cenital protegidas con una malla porosa a prueba de insectos de 40 MESH, un número de hilos de 16,1 x 10,1 por  $\text{cm}^{-2}$ , una porosidad ( $\epsilon$ ) de 0,33 y un nivel de sombreado del 30 %.

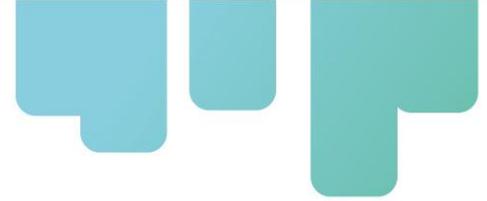
La cubierta del invernadero contemplada fue un filme de polietileno comercial. El dominio computacional y la sección transversal del modelo de invernadero diseñado para la región de estudio y su grilla numérica se presentan en la Figura 45.



**Figura 45.** Dominio computacional y mallado numérico del invernadero diseñado para Costa Rica.

Fuente: Elaboración propia.

La grilla numérica establecida en el proceso de mallado fue de tipo no estructurado y estuvo conformada por elementos cuadrados y rectangulares. En este caso, la grilla numérica seleccionada fue la número 4, de entre 8 evaluadas (Tabla 32). Esta grilla numérica contiene un total de 497.521 elementos, tamaño que garantiza una solución totalmente independiente y sin sesgo asociado al tamaño de los elementos del mallado.



**Tabla 32.** Variación de la temperatura en el interior del invernadero en función del número de elementos de la grilla numérica

<b>Malla</b>	<b>Número de elementos</b>	<b>Temperatura media (°C)</b>
1	52.752	38,1
2	114.296	37,4
3	203.152	36,9
4	497.521	36,3
5	721.157	36,2
6	956.359	36,3
7	1.212.521	36,3
8	1.529.671	36,3

Fuente: Elaboración propia

La calidad de la grilla numérica fue determinada mediante el factor de asimetría. Se identificó que la grilla numérica contenía un 92,1 % de los volúmenes dentro del rango de asimetría de 0-0,25, factor que se define como de alta calidad (Baeza et al., 2017).

Una vez definida la independencia y la calidad del mallado numérico, el modelo fue usado para desarrollar las simulaciones numéricas bajo los escenarios establecidos en la Tabla 33. Condiciones de simulación iniciales para el diseño del invernadero en Costa Rica.

**Tabla 33.** Condiciones de simulación iniciales para el diseño del invernadero en Costa Rica

<b>Escenario</b>	<b>Temperatura del aire (°C)</b>	<b>Humedad relativa del aire (%)</b>	<b>Velocidad del viento (m/s)</b>	<b>Dirección del viento</b>	<b>Radiación solar (W m<sup>-2</sup>)</b>
S1	36,2	55	0,5	E	780,5
S2	36,2	55	1	E	780,5
S3	36,2	55	1,5	E	780,5
S4	36,2	55	3,0	E	780,5

Fuente: Elaboración propia

### **Solución**

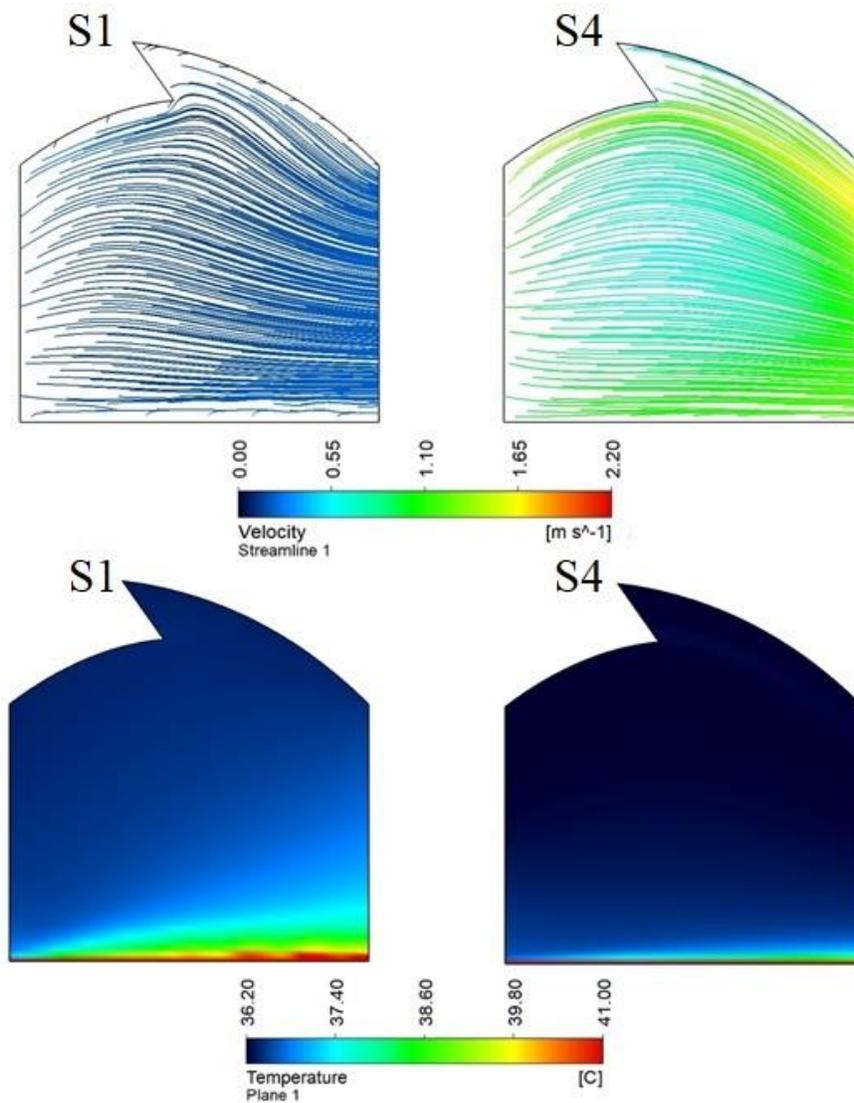
Las simulaciones numéricas contemplaron los modelos incluidos en la Tabla 4. En este caso, la convergencia se obtuvo una vez se completaron un total de 2.203, 2.259, 2.197 y 2.206 iteraciones para cada una de las variables contempladas en los escenarios S1, S2, S3 y S4.



## **Posproceso**

En la Figura 46, se pueden observar los patrones de distribución de los patrones de flujo de aire y la distribución espacial de la temperatura en el interior del invernadero mono-span. En cuanto al movimiento del aire, se observa que hay unas corrientes de aire que ingresan desde el costado de barlovento, y que se desplazan por la sección transversal del invernadero por el costado de sotavento. Se puede observar cómo el área de ventilación ubicada en la cubierta permite el ingreso de flujo de aire, el cual se acelera y sale del interior del invernadero.

Estos flujos de aire uniforme se traducen en comportamientos térmicos homogéneos en la zona en la que se desarrollan los cultivos, tanto para S1 como para S4, lo cual confirma que el diseño del invernadero multitúnel presenta mejores tasas de ventilación que otros prototipos mono-span como el evaluado en el trabajo desarrollado por Molina-Aiz & Valera (2009).



**Figura 46.** Patrones de distribución de flujo de aire y distribución espacial de la temperatura obtenidos mediante simulación para S1 y S4.

Fuente: Elaboración propia

En términos cuantitativos, los valores de velocidad media obtenidos para este prototipo de invernadero oscilaron entre  $0,22 \text{ m/s} \pm 0,04 \text{ m/s}$  y  $0,99 \text{ m/s} \pm 0,32 \text{ m/s}$  (Tabla 34). Nuevamente, como se ha observado en los prototipos de invernaderos diseñados para Colombia y Panamá, se presenta una reducción de la velocidad del flujo de aire a causa de la presencia de la malla anti-insecto en las áreas de ventilación (Akrami et al., 2020). Se debe resaltar que los flujos de aire en este prototipo son uniformes en todo el volumen interno, con lo cual se logra gestionar de forma adecuada el incremento de la temperatura en el ambiente interior.



**Tabla 34.** Valores de velocidad media en el invernadero simulado para Costa Rica

<b>Escenario</b>	<b>Velocidad media (m/s)</b>
S1	0,22 ± 0,04
S2	0,43 ± 0,12
S3	0,56 ± 0,17
S4	0,99 ± 0,32

Fuente: Elaboración propia

Los valores de temperatura media interior y  $\Delta_T$  obtenidos en este prototipo de invernadero multitúnel se muestran en la Tabla 35. Se debe resaltar que, en el caso de este invernadero, se obtuvieron los valores de  $\Delta_T$  más bajos entre los invernaderos evaluados, y que en ningún escenario evaluado en este prototipo el  $\Delta_T$  fue superior a 0,66 °C.

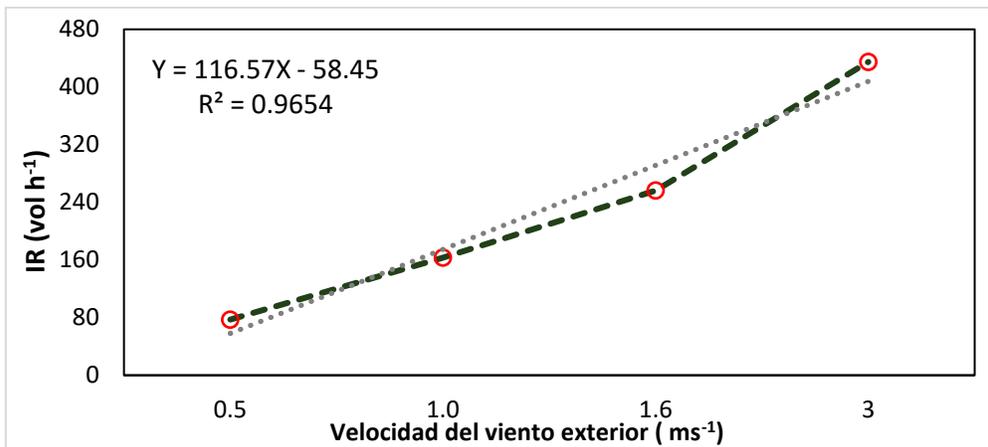
**Tabla 35.** Valores de temperatura media y  $\Delta_T$  para el invernadero diseñado para Costa Rica

<b>Escenario</b>	<b>Temperatura media (°C)</b>	<b><math>\Delta_T</math> (°C)</b>
S1	36,8 ± 0,34	0,66
S2	36,6 ± 0,13	0,43
S3	36,5 ± 0,09	0,31
S4	36,4 ± 0,03	0,20

Fuente: Elaboración propia

Los IR de este invernadero multitúnel presentaron valores muy superiores al mínimo recomendado de 40 volúmenes hora<sup>-1</sup>, y su relación con la velocidad del viento exterior tuvo un comportamiento lineal con un coeficiente de correlación ( $R^2$ ) de 0,9654 (Figura 47).

Se debe resaltar que este prototipo presentó altos índices de renovación y flujos uniformes en el interior del volumen del invernadero. Este hecho es de gran importancia, si se tiene en cuenta que pueden existir modelos de invernaderos que presenten altos valores de IR, pero que no se traduzcan en comportamientos térmicos homogéneos, pues los flujos de aire ingresan y salen del invernadero por regiones como la cubierta, sin interactuar con el aire de la región donde se desarrollan los cultivos (Baeza et al., 2012).

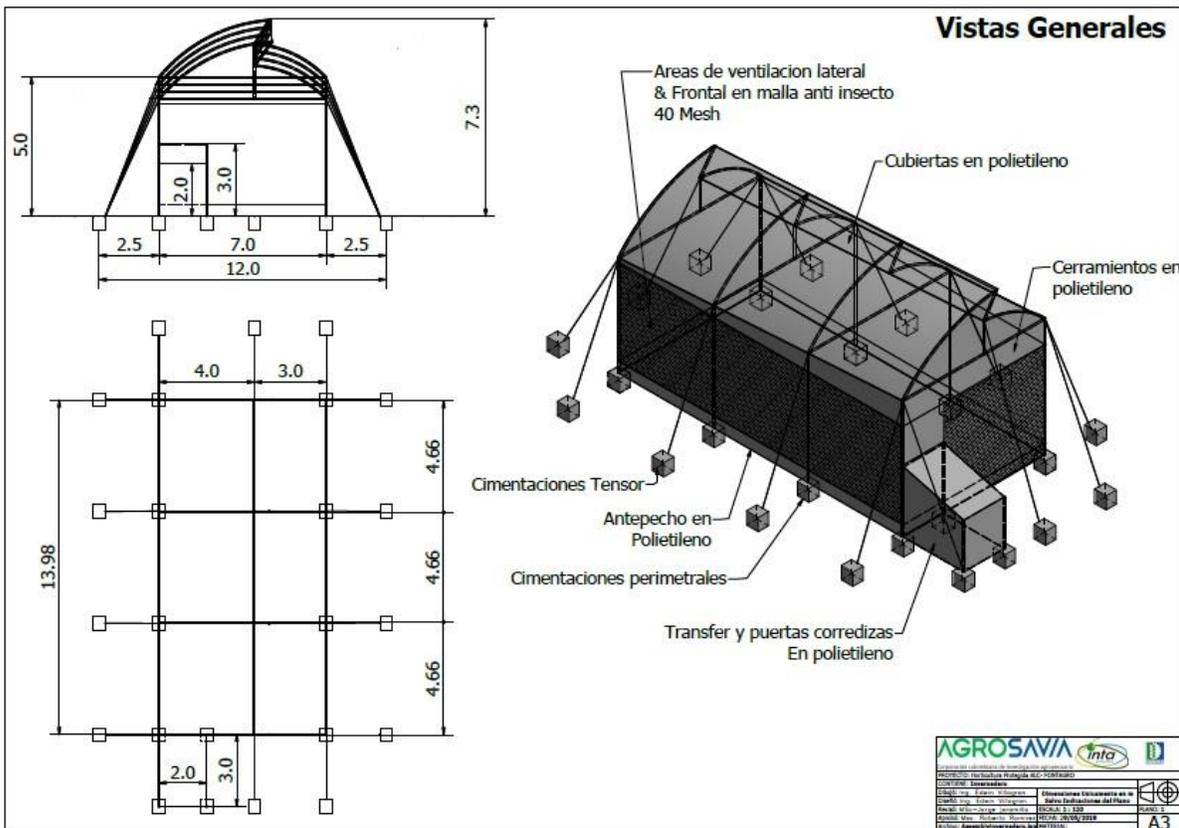


**Figura 47.** Índices de renovación horarios (IR), calculados para el invernadero diseñado para Costa Rica.

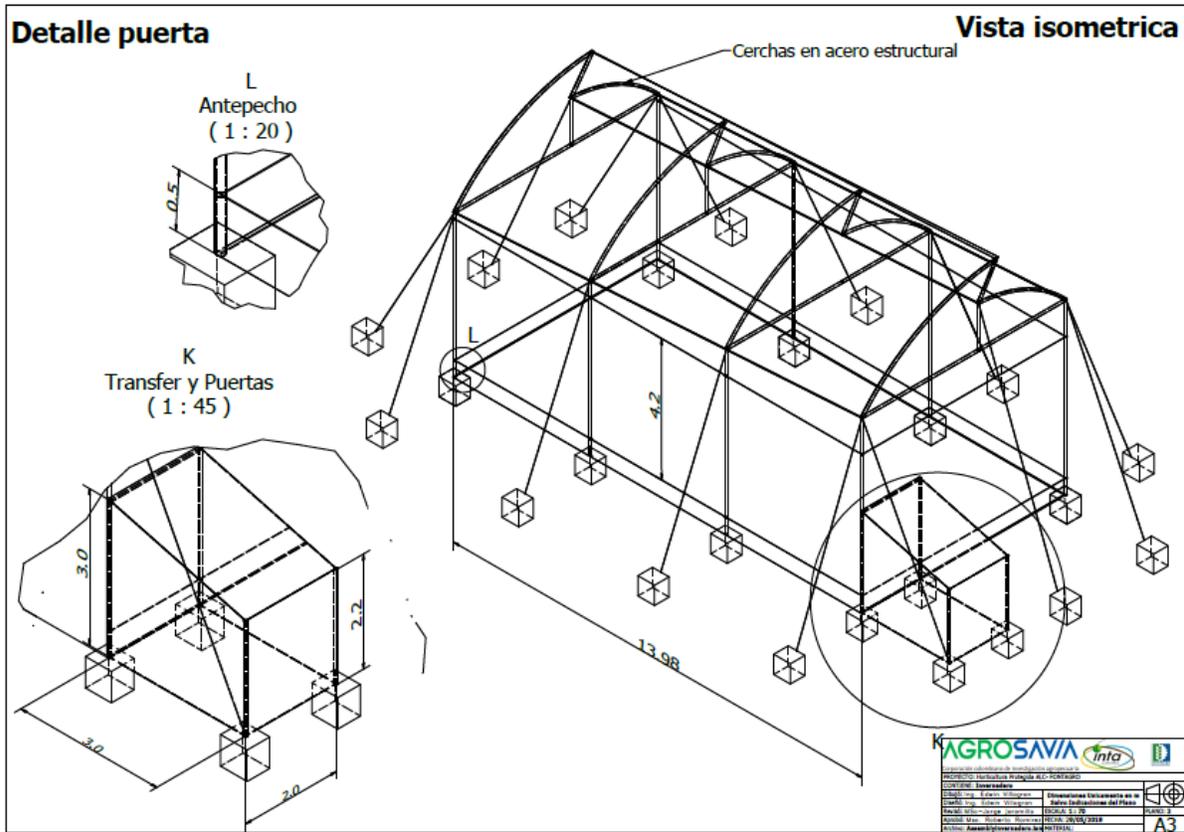
Fuente: Elaboración propia

### Planos CAD

Las dimensiones generales y materiales sugeridos para la construcción del modelo geométrico del invernadero obtenido para Costa Rica pueden encontrarse en las Figura 48. Vistas generales del modelo geométrico del invernadero para Costa Rica. y Figura 49. Vistas isométricas del modelo geométrico del invernadero para Costa Rica.. Las recomendaciones generales son similares a las ya planteadas para las estructuras propuestas para Colombia y Panamá.



**Figura 48.** Vistas generales del modelo geometrico del invernadero para Costa Rica.  
Fuente: Elaboración propia



**Figura 49.** Vistas isométricas del modelo geométrico del invernadero para Costa Rica.  
Fuente: Elaboración propia

Para finalizar, comparamos la estructura diseñada con los parámetros de diseño establecidos en la Tabla 5. Esta comparación se resume en la Tabla 36.

**Tabla 36.** Parámetros de diseño finales del invernadero en Costa Rica

Parámetro	Descripción
Eje longitudinal invernadero (largo)	del Cumple. El eje longitudinal queda ubicado en sentido perpendicular a la dirección dominante del viento.
Eje transversal invernadero (ancho)	del Cumple. La longitud del eje transversal del invernadero es inferior a 40 m.
Altura del invernadero	Cumple. La altura mínima es de 5,0 m y la máxima de 7,5 m. La relación entre el volumen del aire encerrado versus la superficie cubierta es de $5,98 \text{ m}^3\text{m}^{-2}$ .
Pendiente longitudinal del	No cumple. Al ser una estructura

invernadero	pequeña y de un solo tramo, no es necesario contar con una pendiente longitudinal en la zona de la cubierta.
Superficie de ventilación	Cumple. $S_v/S_{sc} = 195,1 \%$ .
Disposición de las áreas de ventilación	Cumple. Superficies de ventilación en los costados, fachadas y regiones de la cubierta.
Índices de renovación	Cumplen. Véase Figura 47.
Presencia de pantallas porosas a pruebas de insecto	Cumple. Se equipó el invernadero con malla anti-insecto en todas las áreas de ventilación.
Geometría de la estructura y forma de la cubierta	Cumple. Se estableció un invernadero de tipo multitúnel mono-span.
Homogeneidad térmica	Cumple. Los valores de $\Delta T$ son inferiores a 2 °C.
Uso de pantallas de sombrío	No están contempladas inicialmente para este prototipo.

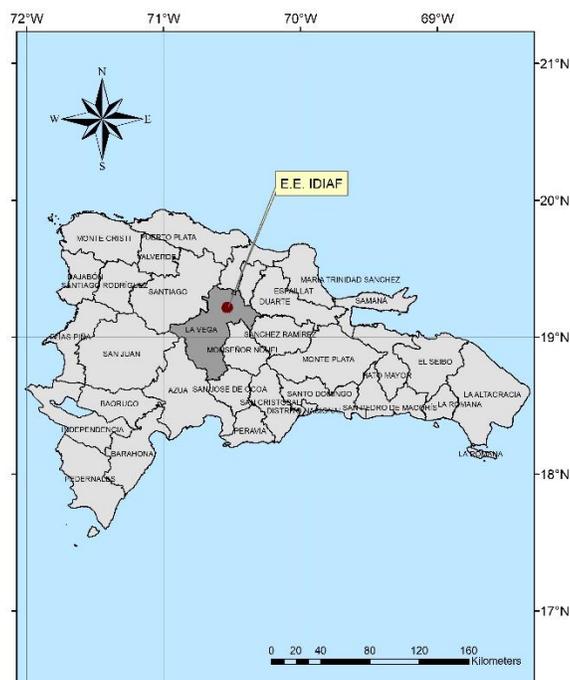
Fuente: Elaboración propia

## Resultados para República Dominicana

### Caracterización climática

#### Zona piloto

La zona piloto seleccionada para el establecimiento de la estructura en República Dominicana es la Estación Experimental del Instituto Dominicano de Investigaciones Agropecuarias y Forestales (Idiaf), ubicada en Sabaneta, La Vega. Se localiza en las coordenadas 19.217° latitud norte y 70.533° longitud oeste, a una altitud de 97 m s. n. m. (Figura 50).



**Figura 50.** Ubicación de zona piloto en Costa Rica. Estación Experimental del Idiaf, Sabaneta, La Vega.

Fuente: Elaboración propia

La provincia de La Vega forma parte de la Región II - Cibao Sur, y está constituida por cuatro municipios: La Vega, Constanza, Jarabacoa y Jima Abajo, con siete distritos municipales: Ranchito, Río Verde Arriba, Tireo, La Sabana, Buena Vista, Manabao y Rincón (Oficina Nacional de Estadística, 2015). Toda la porción occidental de la provincia está ocupada por la cordillera central. Al noroeste de la ciudad de La Vega se encuentran unas pequeñas colinas que separan el valle occidental del Cibao del oriental. El lugar más conocido en esta zona es el Santo Cerro, en la provincia de La Vega. Esta región se encuentra conformada por el municipio de Jima y parte del municipio cabecera de La Vega. Se caracteriza por ser casi completamente llano, con muy pocas colinas bajas. Su clima, según la clasificación de Köppen, es tropical húmedo de bosque. Se caracteriza por una temperatura media de 18 °C, durante todos los meses del año, con pocas diferencias entre el mes más frío y el más caliente. La precipitación media anual es mayor a 2.000 mm. Predomina la zona de vida bosque húmedo subtropical (Bh-S).

### **Análisis de la información climática de la zona piloto**

Para realizar el análisis de las condiciones climáticas locales se obtuvieron los datos diarios de temperaturas máximas, media y mínima, así como los de precipitación, del periodo 1986-2016, en la estación más cercana del municipio de La Vega, ubicada a 19.217 ° N y 70.533 °

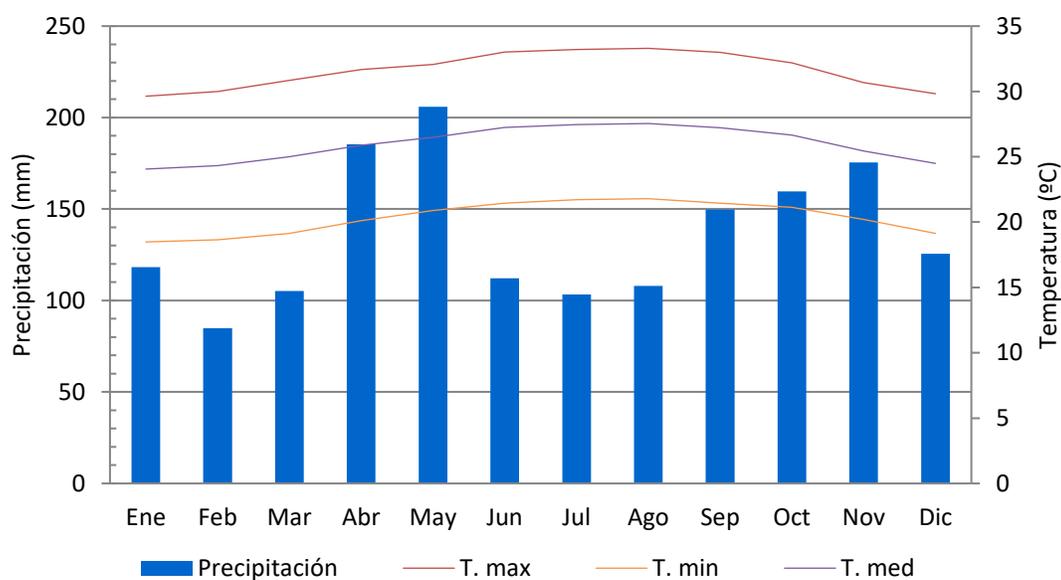


W, a 97 m s. n. m.

### Precipitación y temperaturas (máxima, mínima y media)

De acuerdo con los promedios mensuales, se puede observar que en la zona se presentaron precipitaciones durante todo el año; sin embargo, fueron abril, mayo, septiembre, octubre y noviembre los meses con mayores precipitaciones, entre 150 mm y 205 mm. Los periodos de menor lluvia se dieron en los periodos entre diciembre-marzo y junio-agosto, con valores mensuales entre 85 mm y 120 mm. El promedio multianual de la precipitación es de 1.633 mm (Figura 51).

La temperatura del aire tuvo los registros más altos en los meses de junio, julio, agosto y septiembre, con aproximadamente 27 °C, en promedio; mientras que en enero y diciembre, los valores fueron más bajos, de 24 °C. Las temperaturas promedio multianual máxima, media y mínima fueron de 32 °C, 26 °C y 20 °C, respectivamente (Figura 51).



**Figura 51.** Precipitación, temperaturas máxima, media y mínima, promedio mensual multianual, estimados a partir de los registros de la estación La Vega, República Dominicana. Fuente: Elaboración propia

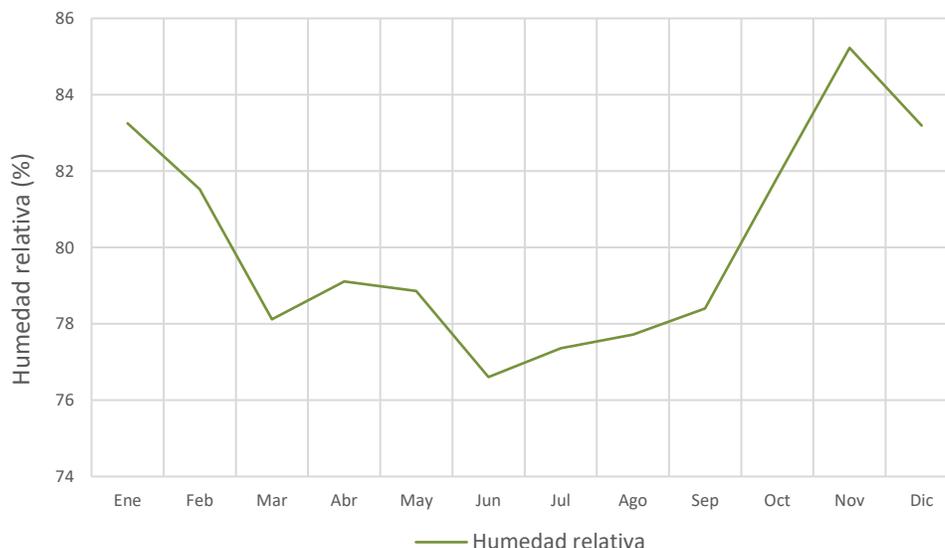
### Humedad relativa y radiación solar

Como la estación meteorológica seleccionada solo cuenta con las variables de temperatura y

precipitación, se relaciona el análisis del comportamiento de la humedad relativa con los



registros de una estación adicional cercana a la estación experimental e información diaria de dos años (agosto de 2016 - agosto de 2018). El promedio anual de la humedad relativa es del 80 %, con valores mensuales entre el 77 % y el 85 %. Estos valores son mayores entre octubre y enero, y llegan a un máximo de 85 %, en noviembre. Los menores registros de humedad se identificaron entre marzo y septiembre, con un mínimo del 77 % en junio (Figura 52). De acuerdo con Maps (2016), en la zona hay un promedio de radiación solar anual de 2.030 kWh/m<sup>2</sup>

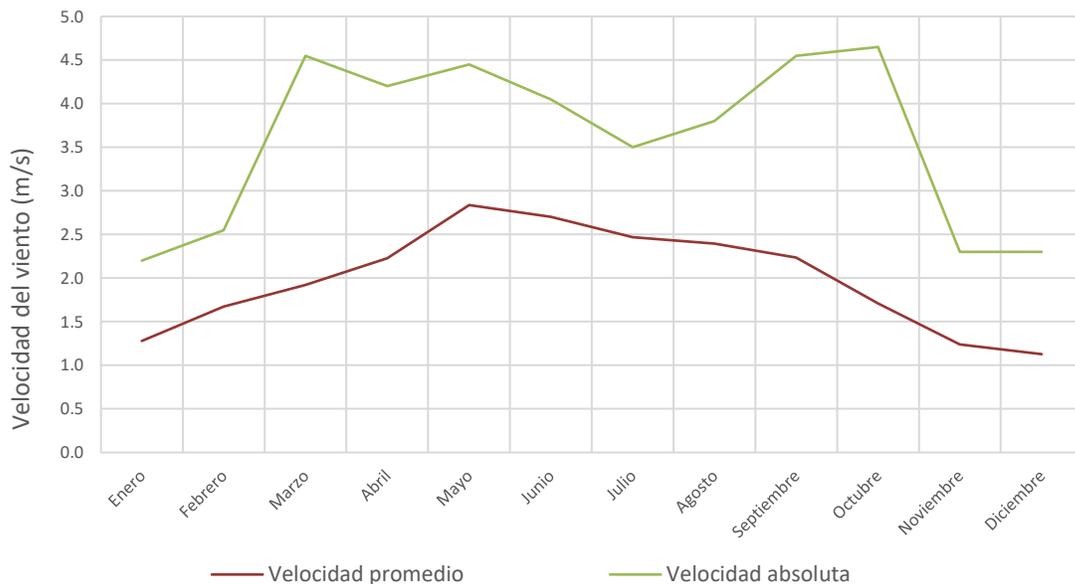


**Figura 52.** Humedad relativa. Promedio mensual estimado con la estación adicional en La Vega, República Dominicana.

Fuente: Elaboración propia

### Velocidad del viento

De acuerdo con los registros de velocidad del viento de la estación adicional, se identifican como referencia valores de velocidad del viento con un promedio anual de 2,0 m/s. Los registros más altos se registraron en mayo, con 2,8 m/s, y los más bajos en diciembre, con 1,1 m/s. La velocidad absoluta muestra máximos de hasta 4,5 m/s en meses como abril, mayo y septiembre, y en octubre de 4,6 m/s (Figura 53).



**Figura 53.** Velocidad del viento. Promedio mensual estimado con la estación adicional en La Vega, República Dominicana.

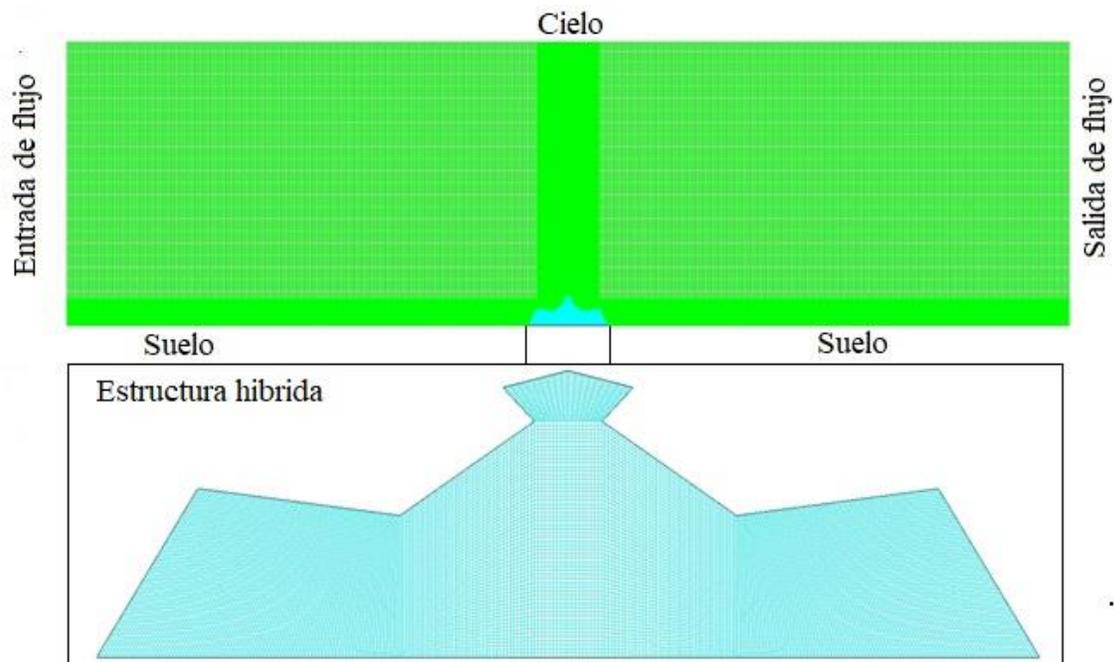
Fuente: Elaboración propia

## Diseño geométrico de una estructura híbrida

### Preproceso

En esta fase se determinó que se debía diseñar el modelo geométrico del de una estructura híbrida que funcione conjuntamente como invernadero y estructura de casa malla. Para la cubierta de la región que se establecerá como invernadero, se determinó usar un filme de polietileno con unos porcentajes de radiación y difusión de la radiación solar de 80 % y 75 %. Así mismo, se contempló una pantalla porosa a prueba de insectos de 40 MESH, con un número de hilos de  $16,1 \times 10,1$  por  $\text{cm}^{-2}$ , una porosidad ( $\epsilon$ ) de 0,33 y un nivel de sombreado del 30 %.

La sección transversal del modelo de estructura diseñada para la región de estudio y su grilla numérica se presentan en la Figura 54.



**Figura 54.** Dominio computacional y mallado numérico del invernadero diseñado para República Dominicana.

Fuente: Elaboración propia

La grilla numérica establecida en el proceso de mallado fue de tipo no estructurada y conformada por elementos cuadrados. En este caso, la grilla numérica seleccionada fue la número 4, de entre 8 evaluadas (Tabla 37). Esta grilla numérica contiene un total de 583.414 elementos, tamaño que garantiza una solución totalmente independiente y sin sesgo asociado al tamaño de los elementos del mallado.

**Tabla 37.** Variación de la temperatura en el interior de la estructura en función del número de elementos de la grilla numérica

Malla	Número de elementos	Temperatura media (°C)
1	69.152	36,9
2	184.216	35,4
3	374.452	34,6
4	583.414	34,1
5	1.032.357	34,1
6	1.434.829	34,2
7	1.631.919	34,1

Fuente: Elaboración propia

La calidad de la grilla numérica se determinó mediante el factor de asimetría. Se identificó que la grilla numérica contenía un 94,5 % de los volúmenes dentro del rango de asimetría de 0 – 0,25, factor que se define como de alta calidad (Baeza et al., 2017).

Una vez definida la independencia y calidad del mallado numérico, el modelo fue usado para desarrollar las simulaciones numéricas bajo los escenarios establecidos en la tabla 38.

**Tabla 38.** Condiciones de simulación iniciales para el diseño del invernadero en República Dominicana

Escenario	Temperatura del aire (°C)	Humedad relativa del aire (%)	Velocidad del viento (m/s)	Dirección del viento	Radiación solar (W m <sup>-2</sup> )
S1	33,4	80	1,1	E	873,1
S2	33,4	80	2,2	E	873,1
S3	33,4	80	2,8	E	873,1
S4	33,4	80	4,0	E	873,1

Fuente: Elaboración propia

### Solución

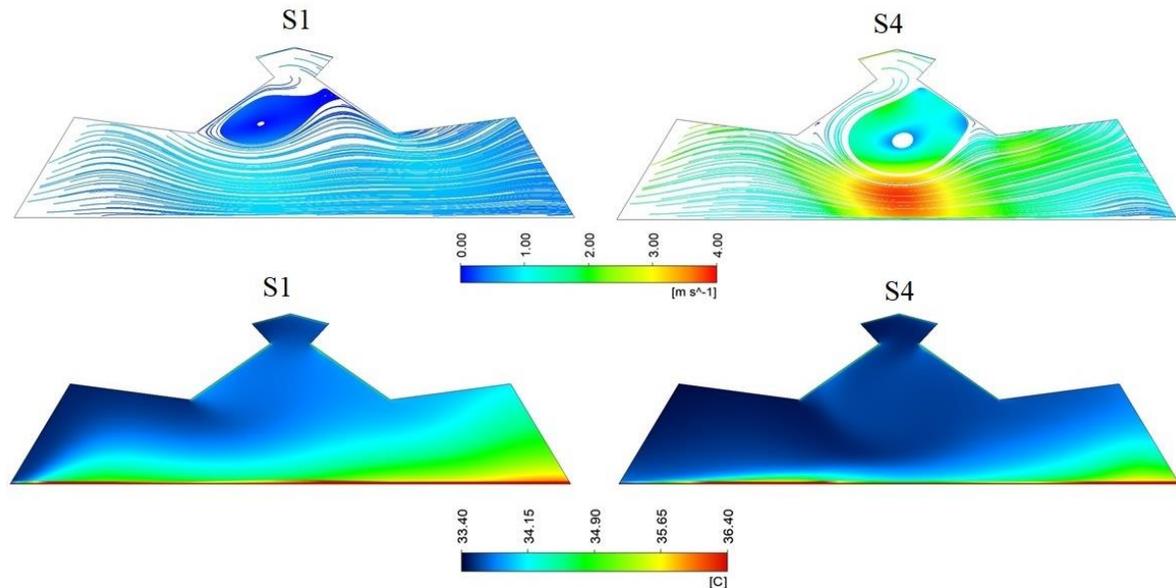
Las simulaciones numéricas contemplaron los modelos incluidos en la Tabla 4. En este caso, la convergencia se obtuvo una vez se completaron un total de 2.514, 2.496, 2.517 y 2.498 iteraciones para cada una de las variables contempladas en los escenarios S1, S2, S3 y S4.

### Posproceso

En la

Figura 55 se pueden observar los patrones de distribución de los patrones de flujo de aire y la distribución espacial de la temperatura en el interior de la estructura híbrida. En general, se observa que las velocidades de flujo tienen una mayor velocidad sobre la zona cercana en la que se desarrollan los cultivos; en este caso específico, se observa un flujo turbulento justo debajo de la cubierta plástica de la región del invernadero. Este flujo tiene su origen en la interacción de un flujo de aire de entrada a través de la ventana cenital de barlovento y un flujo de aire ascendente desde la región del suelo.

En el caso del comportamiento espacial de la temperatura, se observa que es altamente homogéneo, con solo una pequeña región en el costado de sotavento, en la que se origina una temperatura con un valor mayor en magnitud y que puede estar originada por una desaceleración del flujo que se mueve cerca del costado de la estructura



**Figura 55.** Patrones de distribución del flujo del aire y distribución espacial de la temperatura obtenidos mediante simulación para la estructura de Republica Dominicana. Fuente: Elaboración propia

En términos cuantitativos los valores de velocidad media obtenidos para este prototipo de estructura oscilaron entre  $0,62 \text{ m/s} \pm 0,24 \text{ m/s}$  y  $2,09 \text{ m/s} \pm 0,82 \text{ m/s}$  (Tabla 39). Estas velocidades de flujo del aire son los que presentan valores más elevados en comparación con las estructuras anteriormente diseñadas.

**Tabla 39.** Valores de velocidad media en la estructura diseñada para Republica Dominicana

Escenario	Velocidad media (m/s)
S1	$0,62 \pm 0,24$
S2	$0,97 \pm 0,43$
S3	$1,37 \pm 0,56$
S4	$2,09 \pm 0,82$

Fuente: Elaboración propia

Los valores de temperatura media interior y  $\Delta_T$  obtenidos en este prototipo de estructura



se muestran en la

Tabla 40. En general, se observa que dadas las condiciones evaluadas y en función de los flujos de aire adecuados, obtenidos en el interior de la estructura, los valores de temperatura media están muy cerca del valor registrado en el ambiente exterior.

**Tabla 40.** Valores de temperatura media y  $\Delta T$  en la estructura diseñada para Republica Dominicana

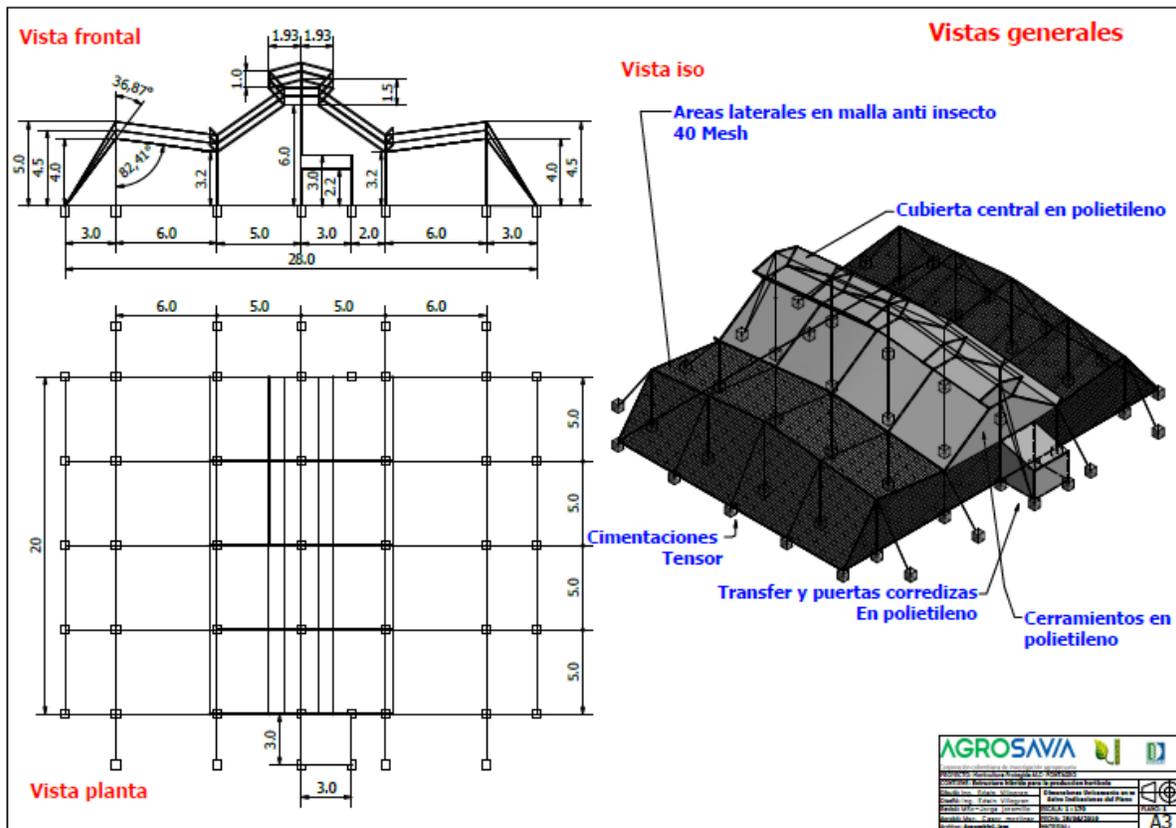
<b>Escenario</b>	<b>Temperatura media (°C)</b>	<b><math>\Delta T</math> (°C)</b>
S1	34,6 ± 0,82	1,21
S2	34,3 ± 0,73	0,92
S3	33,9 ± 0,36	0,63
S4	33,7 ± 0,12	0,40

Fuente: Elaboración propia

#### **Planos CAD**

Las dimensiones generales y los materiales sugeridos para la construcción de la estructura híbrida de Republica Dominicana pueden encontrarse en las Figura 56. Vistas generales del modelo geométrico de la estructura para Republica Dominicana. y Figura 57. Vista isométrica del modelo geométrico de la estructura para Republica Dominicana.. Las

recomendaciones generales para la construcción son similares a las ya planteadas para las estructuras de los otros tres países participantes de esta investigación.



**Figura 56.** Vistas generales del modelo geométrico de la estructura para República Dominicana.

Fuente: Elaboración propia

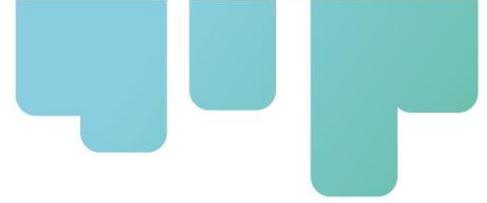




**Tabla 41.** Parámetros de diseño finales de la casa malla en Panamá

<b>Parámetro</b>	<b>Descripción</b>
Geometría de la estructura	Cumple. Se diferencia de las estructuras convencionales. Además, esta estructura puede usarse como casa de malla o invernadero.
Altura de la casa malla	Cumple. Presenta una altura variable, desde una mínima de 4,0 m hasta un máximo de 9,0 m.
Tipo de malla porosa	Se seleccionó con la finalidad de lograr un alto grado de protección contra insectos plaga, sin limitar el flujo de los patrones de aire.
Flujos de aire	Cumple. Flujos de aire con velocidad moderados y adecuados. Véase Tabla 39.
Homogeneidad térmica	Cumple. Véase Tabla 40.

Fuente: Elaboración propia



## Conclusiones

La zona piloto de Colombia se caracteriza por tener un clima cálido y muy seco. El promedio de la precipitación anual es de 664 mm y una temperatura media promedio de 29 °C. Las temperaturas más altas se registran en abril, con un promedio de 35 °C. La humedad relativa registra valores mensuales entre el 71 % y 85 %. La velocidad máxima del viento promedio durante el año es de 1,3 m/s, y puede tomar valores hasta de 1,7 m/s en marzo. En el primer periodo del año, hasta mayo, predominan los vientos desde el oeste (WSW), y a partir de junio y hasta diciembre desde el noroeste (NW).

El sitio piloto de Panamá se caracteriza por ubicarse dentro de una zona con condiciones de clima tropical de sabanas Awi, según la clasificación de Köppen. El promedio de la precipitación anual es de 1.063 mm, con una temperatura media promedio de 28 °C. Las mayores temperaturas se registran en abril, con un promedio de 34 °C. La humedad relativa registra valores mensuales entre el 66 % y el 83 %. La velocidad del viento anual es de 1,2 m/s y los valores más altos se presentan en febrero, con 2,3 m/s, en promedio. La dirección predominante del viento varía durante el año, desde enero hasta abril en dirección noreste, y a partir de mayo y hasta diciembre, sureste.

El sitio piloto de Costa Rica se caracteriza por ubicarse dentro la zona de vida bosque tropical seco, según la clasificación de Holdridge. El promedio de la precipitación anual es 1.806 mm, con una temperatura promedio de 26 °C. Las mayores temperaturas se registran en abril, con un promedio de 36,5 °C. La humedad relativa registra valores mensuales de entre el 43 % y el 65 %. La velocidad del viento anual es de 1,6 m/s, y los valores más altos se presentan en febrero en un promedio de 3,0 m/s.

La zona piloto de República Dominicana se caracteriza por ubicarse en una región de clima tropical húmedo de bosque, según la clasificación de Köppen. El promedio de la precipitación anual es de 1.633 mm, con una temperatura media de 26 °C. Las temperaturas máximas más altas se registran en agosto con un promedio de 33 °C. La humedad relativa toma valores mensuales de entre el 77 % y el 85 %. La velocidad del viento anual es de 2,0 m/s y los mayores valores se presentan en mayo, en promedio de 2,8 m/s. El viento predominante va desde el sureste y el este.

El uso de la dinámica de fluidos computacional como herramienta de apoyo a procesos de diseño de estructuras de agricultura protegida y en lo específico para definir el mejor modelo geométrico demostró ser una alternativa bastante ágil, robusta y económica, mediante la cual es posible obtener estructuras de agricultura protegida adaptadas a las condiciones climáticas locales de cada sitio experimental evaluado.



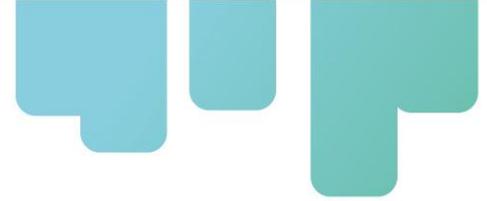
Durante la investigación, se encontró que los factores geométricos y arquitectónicos de las estructuras, así como las propiedades ópticas y aerodinámicas de los materiales de cubierta tienen una alta incidencia sobre los patrones de flujo de aire y sobre el microclima interior generado en cada una de las estructuras.

En el caso de cada región de estudio se identificó que las estructuras de agricultura protegida que mejor comportamiento ofrecían eran los invernaderos ventilados de forma natural y las estructuras de casa malla. Para esta última, se reconoció que era recomendable analizar el tipo de malla porosa a prueba de insectos a instalar, puesto que sus propiedades aerodinámicas afectan la velocidad del movimiento de los flujos del aire y, por ende, la distribución espacial de la temperatura.

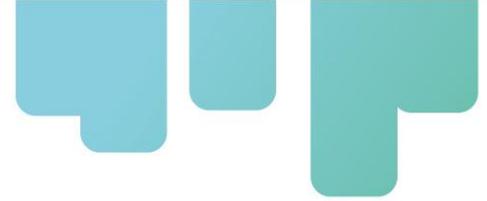
Por último, para la construcción de las estructuras es recomendable contemplar su robustez estructural y de cimentación, con el fin de garantizar su estabilidad y durabilidad en los sitios piloto de cada una de las regiones de estudio.

## Referencias

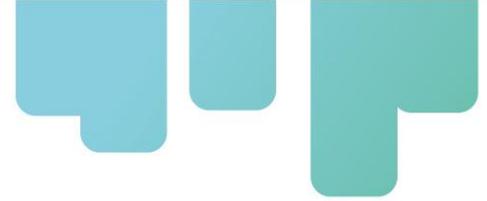
- Akrami, M., Salah, A. H., Javadi, A. A., Fath, H. E. S., Hassanein, M. J., Farmani, R., Dibaj, M., & Negm, A. (2020). Towards a sustainable greenhouse: Review of trends and emerging practices in analysing greenhouse ventilation requirements to sustain maximum agricultural Yield. *Sustainability* 12(7), 2794. <https://doi.org/10.3390/su12072794>
- Al-Mulla, Y. A., Al-Balushi, M., Al-Rawahy, M., Al-Raisy, F., & Al-Makhmary, S. (2008). Screenhouse microclimate effects on cucumber production planted in soilless culture (open system). *Acta Horticulturae*. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2008.801.73>, 801 (pp. 637-644)
- Autoridad Nacional del Ambiente (2010). Atlas ambiental de la República de Panamá. *Editora Novo Art*.
- Baeza, E. (2007). *Optimización del diseño de los sistemas de ventilación en invernaderos tipo parral*. Universidad de Almería.
- Baeza, Esteban J., Pérez-Parra, J. J., Montero, J. I., Bailey, B. J., López, J. C., & Gázquez, J. C. (2009). Analysis of the role of sidewall vents on buoyancy-driven natural ventilation in parral-type greenhouses with and without insect screens using computational fluid dynamics. *Biosystems Engineering*, 104(1), 86–96. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.04.008>
- Baeza, E., Pérez-Parra, J., López, J. C., & Gázquez, J. C. (2012). La dinámica de fluidos computacional como herramienta para mejorar el diseño de los sistemas de ventilación natural en invernadero. *Estación Experimental de La Fundación Cajamar*, 1079–1086. [http://www.magrama.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/revistas/pdf\\_SH/SH\\_2007\\_15\\_1079\\_1086.pdf](http://www.magrama.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/revistas/pdf_SH/SH_2007_15_1079_1086.pdf)
- Baeza, Esteban, Ignacio Montero, J., Pérez-Parra, J., J. Bailey, B., Hernández, J. C., & Carlos Gázquez, J. (2014). *Avances en el estudio de la ventilación natural*. Disponible en <http://www.publicacionescajamar.es/pdf/series-tematicas/centros-experimentales-las-palmerillas/avances-en-el-estudio-de-la-ventilacion>.
- Baeza, E. J., Sapounas, A., Stanghellini, C., Bonachela, S., Hernández, J., Montero, J. I., López, J. C., Granados, M. R., Muñoz, P., Lorenzo, P., & Fernández-Del Olmo, P. (2017). Numerical simulation of the effect of different mulches on the heat storage capacity of a Mediterranean greenhouse soil. *Acta Horticulturae*, 1170, 119–127. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2017.1170.13>
- Baeza, Esteban, Hemming, S., & Stanghellini, C. (2020). Materials with switchable radiometric properties: Could they become the perfect greenhouse cover? *Biosystems Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.02.012>, 193; 157-173.
- Baxevanou, C., Fidaros, D., Bartzanas, T., & Kittas, C. (2018). Yearly numerical evaluation of greenhouse cover materials. *Computers and Electronics in Agriculture*, 149, 54 - 70. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.12.006>



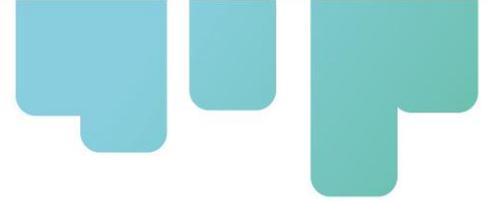
- Benni, S., Tassinari, P., Bonora, F., Barbaresi, A., & Torreggiani, D. (2016). Efficacy of greenhouse natural ventilation: Environmental monitoring and CFD simulations of a study case. *Energy and Buildings*, *125*, 276–286. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2016.05.014>
- Boulard, T. (2011). Advantages and constraints of CFD greenhouse modelling. *Acta Horticulturae*, *719*, 605-614
- Cabrera, F. J., López, J. C., Baeza, E. J., & Pérez-Parra, J. (2006). Efficiency of anti-insect screens placed in the vents of Almería greenhouses. *Acta Horticulturae*. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2006.719.70>
- Cajamar, F. (2012). Innovaciones en estructuras protegidas y manejo de cultivos en agricultura protegida. *Cuadernos de Estudios Agroalimentarios (CEA)*. <https://www.publicacionescajamar.es/publicaciones-periodicas/cuadernos-de-estudios-agroalimentarios-cea/cuadernos-de-estudios-agroalimentarios-cea-3-innovacion-en-estructuras-productivas-y-manejo-de-cultivos-en-agricultura-protegida>
- Castilla, N. (2002). Current situation and future prospects of protected crops in the mediterranean region. *Acta Horticulturae*, *582*, 135–147. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2002.582.11>
- Castilla, Nicolás, & Hernández, J. (2005). The plastic greenhouse industry of Spain. *Chronica Horticulturae*, *45*(3), 15–20.
- Choab, N., Allouhi, A., El Maakoul, A., Kousksou, T., Saadeddine, S., & Jamil, A. (2019). Review on greenhouse microclimate and application: Design parameters, thermal modeling and simulation, climate controlling technologies. *Solar Energy*, *191*, 109-137. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.08.042>
- Chu, C. R., Lan, T. W., Tasi, R. K., Wu, T.R., & Yang, C.-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>
- Chu, C. R., & Lan, T. W. (2019). Effectiveness of ridge vent to wind-driven natural ventilation in monoslope multi-span greenhouses. *Biosystems Engineering*, *186*, 279-292. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.08.006>
- Dorado, J., & León, G. (2011). *Control de calidad y homogeneidad de los datos* [Nota técnica]. Ideam.
- Flores-Velázquez, J., Mejía-Saenz, E., Montero-Camacho, J. I., & Rojano, A. (2011). Análisis numérico del clima interior en un invernadero de tres naves con ventilación mecánica. *Agrociencia*, *45*(5), 545–560.
- Flores-Velazquez, J., Ojeda, W., Villarreal-Guerrero, F., & Rojano, A. (2017). Effect of crops on natural ventilation in a screenhouse evaluated by CFD simulations. *Acta Horticulturae*, *1170*, 95–101. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2017.1170.10>
- Franke, J., Hellsten, A., Schlünzen, H., & Carissimo, B. (2010). The Best Practise Guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment : an outcome of COST 732. *The Fifth International Symposium on Computational Wind Engineering (CWE2010)*.
- Gutiérrez, H. (1991). *Clasificaciones climáticas*. <https://Documentacion.Ideam.Gov>



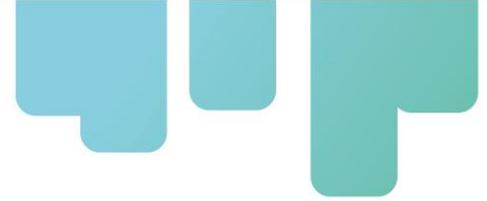
- Co/Openbiblio/Bvirtual/016592/Clasificacionclima. Pdf.
- Haijun, L., Cohen, S., Lemcoff, J. H., Israeli, Y., & Tanny, J. (2015). Sap flow, canopy conductance and microclimate in a banana screenhouse. *Agricultural and Forest Meteorology*, 201, 165 - 175. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.11.009>
- Hann, J. (1991). Biogeografía terrestre del Caribe Colombiano. *Dugandia*, 3 (1), 11-13.
- He, K., Chen, D., Sun, L., Huang, Z., & Liu, Z. (2015). Effects of vent configuration and span number on greenhouse microclimate under summer conditions in eastern China. *International Journal of Ventilation*, 13(4), 381–396. <https://doi.org/10.1080/14733315.2015.11684062>
- He, X., Wang, J., Guo, S., Zhang, J., Wei, B., Sun, J., & Shu, S. (2017). Ventilation optimization of solar greenhouse with removable back walls based on CFD. *Computers and Electronics in Agriculture*, 149, 16-25. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.10.001>
- Ilić, Z. S., Milenković, L., Šunić, L., & Fallik, E. (2015). Effect of coloured shade-nets on plant leaf parameters and tomato fruit quality. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. <https://doi.org/10.1002/jsfa.7000>, 95(13), 2660-2667.
- Ilić, Z. S., & Fallik, E. (2017). Light quality manipulation improves vegetable quality at harvest and postharvest: A review. *Environmental and Experimental Botany*, 139, 79-90. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2017.04.006>
- Jung, D. H., Kim, H. S., Jhin, C., Kim, H. J., & Park, S. H. (2020). Time-serial analysis of deep neural network models for prediction of climatic conditions inside a greenhouse. *Computers and Electronics in Agriculture*, 173. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105402>
- Kittas, C., Karamanis, M., & Katsoulas, N. (2005). Air temperature regime in a forced ventilated greenhouse with rose crop. *Energy and Buildings*, 37(8), 807-812. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.10.009>
- Li, K., Xue, W., Mao, H., Chen, X., Jiang, H., & Tan, G. (2019). Optimizing the 3D Distributed Climate inside Greenhouses Using Multi-Objective Optimization Algorithms and Computer Fluid Dynamics. *Energies*, 12(15), 2873. <https://doi.org/10.3390/en12152873>
- López, A., Valera, D. L., & Molina-Aiz, F. (2011). Sonic anemometry to measure natural ventilation in greenhouses. *Sensors*, 11(10), 9820 - 9838. <https://doi.org/10.3390/s111009820>
- López-Martínez, A., Molina-Aiz, F. D., Valera, D. L., & Espinoza-Ramos, K. E. (2020). Models for characterising the aerodynamics of insect-proof screens from their geometric parameters. *Biosystems Engineering*, 192, 42-55. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.01.013>
- Mahmood, A., Hu, Y., Tanny, J., & Asante, E. A. (2018). Effects of shading and insect-proof screens on crop microclimate and production: A review of recent advances. *Scientia Horticulturae*, 241, 241–251. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.06.078>
- Maps, S. R. (2016). *GIS Data for 200+ Countries*. <https://solargis.com/maps-and-gis-data/overview>



- McCartney, L., & Lefsrud, M. G. (2018). Field trials of the natural ventilation augmented cooling (NVAC) greenhouse. *Biosystems Engineering*, 174, 159-172. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.07.004>
- McGuire, S. (2015). FAO, IFAD, and WFP. The State of Food Insecurity in the World 2015: Meeting the 2015 International Hunger Targets: Taking Stock of Uneven Progress. Rome: FAO, 2015. *Advances in Nutrition*. <https://doi.org/10.3945/an.115.009936>.
- Meisel-Roca, A., Pérez-Valbuena, G. J., & Pérez-Valbuena, G. J. (2006). Geografía física y poblamiento en la Costa Caribe colombiana [Documento de trabajo sobre economía regional N.º 73]. Banco de la República, Centro de Estudios Económicos Regionales (CEER) - Cartagena .
- Mesmoudi, K., Meguallati, K. H., & Bournet, P. E. (2017). Effect of the greenhouse design on the thermal behavior and microclimate distribution in greenhouses installed under semi-arid climate. *Heat Transfer - Asian Research*, 46(8), 1294–1311. <https://doi.org/10.1002/htj.21274>
- Molina-Aiz, F. D., & Valera, D. L. (2009). Configuration by evaluating ventilation efficiency based on computational fluid dynamics. *International Symposium on High Technology for Greenhouse Systems: GreenSys2009* 893, 669–677.
- Montero, J. I., Stanghellini, C., & Castilla, N. (2008). Invernadero para la producción sostenible en áreas de clima de invierno suaves. *Horticultura Internacional*, 65 (31), 14-28.
- Mupambi, G., Anthony, B. M., Layne, D. R., Musacchi, S., Serra, S., Schmidt, T., & Kalcsits, L. A. (2018). The influence of protective netting on tree physiology and fruit quality of apple: A review. *Scientia Horticulturae*, 236, 60-72. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.03.014>
- Noble, I. R., Huq, S., Anokhin, Y. a., Carmin, J., Goudou, D., Lansigan, F. P., Osman-Elasha, B., & Villamizar, A. (2014). IPCC-WGII-AR5-14. Adaptation Needs and Options. *Assessment Report 5- Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects*. <https://doi.org/31>
- Oficina Nacional de Estadística. (2015). División Territorial 2015, República Dominicana.
- Ould-Khaoua, S. A., Bournet, P. E., Migeon, C., Boulard, T., & Chassériaux, G. (2006). Analysis of Greenhouse Ventilation Efficiency based on Computational Fluid Dynamics. *Biosystems Engineering*, 95(1), 83–98. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2006.05.004>
- Pakari, A., & Ghani, S. (2019). Airflow assessment in a naturally ventilated greenhouse equipped with wind towers: numerical simulation and wind tunnel experiments. *Energy and Buildings*, 199, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.06.033>
- Reynafarje, X., Villagran, E. A., Bojacá, C. R., Gil, R., & Schrevens, E. (2020). Simulation and validation of the airflow inside a naturally ventilated greenhouse designed for tropical conditions. *Acta Horticulturae*, 1271, 55–62. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2020.1271.8>
- Righini, I., Vanthoor, B., Verheul, M. J., Naseer, M., Maessen, H., Persson, T., & Stanghellini, C. (2020). A greenhouse climate-yield model focussing on additional light, heat



- harvesting and its validation. *Biosystems Engineering*, 194, 1-15  
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.03.009>
- Román-Roldán, N. I., López-Ortiz, A., Ituna-Yudonago, J. F., García-Valladares, O., & Pilatowsky-Figueroa, I. (2019). Computational fluid dynamics analysis of heat transfer in a greenhouse solar dryer “chapel-type” coupled to an air solar heating system. *Energy Science and Engineering*, 7(4), 1123-1139. <https://doi.org/10.1002/ese3.333>
- Senhaji, A., Mouqallid, M., Majdoubi, H., Senhaji, A., Mouqallid, M., & Majdoubi, H. (2019). CFD Assisted Study of Multi-Chapels Greenhouse Vents Openings Effect on Inside Airflow Circulation and Microclimate Patterns. *Open Journal of Fluid Dynamics*, 09(02), 119–139. <https://doi.org/10.4236/ojfd.2019.92009>
- Sorza, S. M. (2016). Metodología y resultados del control de calidad, relleno de datos faltantes y homogeneización realizado a la base de datos climática suministrada por el Ideam a Corpoica para el desarrollo del contrato N.º PS0580 de 2015. Corpoica, C.I. Tibaitatá
- Tanny, J. (2013). Microclimate and evapotranspiration of crops covered by agricultural screens: A review. *Biosystems Engineering*, 114(1), 26-43. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.10.008>
- Tanny, J., Lukyanov, V., Neiman, M., Cohen, S., Teitel, M., & Seginer, I. (2018). Energy balance and partitioning and vertical profiles of turbulence characteristics during initial growth of a banana plantation in a screenhouse. *Agricultural and Forest Meteorology*. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.02.028>
- Teitel, M., & Wenger, E. (2012). The effect of screenhouse roof shape on the flow patterns - CFD simulations. *Acta Horticulturae*. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.927.74>, 927, 603-610.
- Teitel, M., Garcia-Teruel, M., Ibanez, P. F., Tanny, J., Laufer, S., Levi, A., & Antler, A. (2015). Airflow characteristics and patterns in screenhouses covered with fine-mesh screens with either roof or roof and side ventilation. *Biosystems Engineering*, 131, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.12.010>
- Teitel, M., Liang, H., Tanny, J., Garcia-Teruel, M., Levi, A., Ibanez, P. F., & Alon, H. (2017). Effect of roof height on microclimate and plant characteristics in an insect-proof screenhouse with impermeable sidewalls. *Biosystems Engineering*, 162, 11-19. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.07.001>
- Teitel, M., Rguez, M. G. T., Liang, H., Tanny, J., Ozer, S., & Alon, H. (2018a). Vertical profiles of temperature, humidity ratio and air velocity in different types of insect-proof screenhouse. *Acta Horticulturae* 227, 205-212. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2018.1227.25>
- Teitel, M., Vitoshkin, H., Geoola, F., Karlsson, S., & Stahl, N. (2018b). Greenhouse and screenhouse cover materials: Literature review and industry perspective. *Acta Horticulturae* 1227, 31-44. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2018.1227.4>
- Tominaga, Y., Mochida, A., Yoshie, R., Kataoka, H., Nozu, T., Yoshikawa, M., & Shirasawa, T. (2008). AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96(10–



- 11), 1749–1761. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2008.02.058>
- Tong, G., & Christopher, D. M. (2018). New insights on span selection for Chinese solar greenhouses using CFD analyses. *Computers and Electronics in Agriculture*, *149*, 3–15. <https://doi.org/10.1016/j.COMPAG.2017.09.031>
- Valera-Martínez, D. L., Belmonte-Ureña, L. J., Molina-Aiz, F. D., & López-Martínez, A. (2016). Greenhouse agriculture in Almería. A comprehensive techno-economic analysis. *Cajamar Caja Rural*. <https://www.publicacionescajamar.es/series-tematicas/economia/greenhouse-agriculture-in-almeria-a-comprehensive-techno-economic-analysis>.
- Van Dooren, H. J. C., & Sapounas, A. (2013). *Use of computational fluid dynamics (CFD) modelling to improve tracer gas techniques in very open naturally ventilated livestock buildings*. Wageningen UR Livestock Research.
- Vanthoor, B. H. E., Stanghellini, C., van Henten, E. J., & de Visser, P. H. B. (2011). A methodology for model-based greenhouse design: Part 1, a greenhouse climate model for a broad range of designs and climates. *Biosystems Engineering*, *110*(4), 363–377. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.06.001>
- Vidogbéna, F., Adégbidi, A., Assogba-Komlan, F., Martin, T., Ngouajio, M., Simon, S., Tossou, R., & Parrot, L. (2015). Cost: Benefit analysis of insect net use in cabbage in real farming conditions among smallholder farmers in Benin. *Crop Protection*, *78*, 164–171. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2015.09.003>
- Villagran, E. A. (2016). *Diseño y evaluación climática de un invernadero para condiciones de clima intertropical de montaña*. Universidad Nacional de Colombia.
- Villagran, E. A., Gil, R., Acuña, J. F., & Bojacá, C. R. (2012). Optimization of ventilation and its effect on the microclimate of a colombian multispans greenhouse. *Agronomia Colombiana*, *30*(2), 282–288.
- Villagran, Edwin A., Baeza Romero, E. J., & Bojacá, C. R. (2019). Transient CFD analysis of the natural ventilation of three types of greenhouses used for agricultural production in a tropical mountain climate. *Biosystems Engineering*, *188*, 288–304 <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.10.026>
- Villagran, E. A. & Bojacá, C. R. (2019a). Effects of surrounding objects on the thermal performance of passively ventilated greenhouses. *Journal of Agricultural Engineering*, *50* (1), <https://doi.org/10.4081/jae.2019.856>
- Villagran, E. A. & Bojacá, C. R. (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/https://doi.org/10.14295/oh.v25i2.2013>
- Villagran, E. A. (2020). Microclimatic behavior of a screen house proposed for horticultural production in low-altitude tropical climate conditions. *Comunicata Scientiae*, *11*, e3350–e3350.
- Villagran, E., & Bojacá, C. (2020). Analysis of the microclimatic behavior of a greenhouse used to produce carnation (*Dianthus caryophyllus* L.). *Ornamental Horticulture*, *26*(2), 109–204. <https://doi.org/https://doi.org/10.1590/2447-536X.v26i2.2150>



- Villagran, E., Ramírez, R., Rodríguez, A., Pacheco, R. L., & Jaramillo, J. (2020). Simulation of the thermal and aerodynamic behavior of an established greenhouse 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>
- Wilson, S. (2013). World population to reach 9.7 billion by 2050 new study predicts - Telegraph. *The Telegraph*.
- Zorzeto, T. Q., Leal, P. A. M., & Nunes, E. F. (2014). Homogeneity of temperature and relative humidity of air in greenhouse. *Environment*, 1(9), 12.



## Instituciones participantes



Secretaría Técnica Administrativa



Con el apoyo de:



[www.fontagro.org](http://www.fontagro.org)

Correo electrónico: [fontagro@fontagro.org](mailto:fontagro@fontagro.org)