



UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
GESTIÓN DE BIBLIOTECAS



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

1 de 2

Neiva, 17 de marzo de 2023

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Ciudad

El (Los) suscrito(s):

Hernán Darío Chavarro Sánchez, con C.C. No. 1075309609,

José Luis Joven Yunda, con C.C. No. 1075305729,

_____, con C.C. No. _____,

_____, con C.C. No. _____,

Autor(es) de la tesis y/o trabajo de grado o _____

titulado Evaluación numérica de un invernadero baticenital de dos naves: ventilación y perfiles de temperatura.

presentado y aprobado en el año 2023 como requisito para optar al título de

Ingeniero Agrícola;

Autorizo (amos) al CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN de la Universidad Surcolombiana para que, con fines académicos, muestre al país y el exterior la producción intelectual de la Universidad Surcolombiana, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en los sitios web que administra la Universidad, en bases de datos, repositorio digital, catálogos y en otros sitios web, redes y sistemas de información nacionales e internacionales "open access" y en las redes de información con las cuales tenga convenio la Institución.
- Permita la consulta, la reproducción y préstamo a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato Cd-Rom o digital desde internet, intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer, dentro de los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia.
- Continúo conservando los correspondientes derechos sin modificación o restricción alguna; puesto que, de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación del derecho de autor y sus conexos.

Vigilada Mineducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional www.usco.edu.co, link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.



**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
GESTIÓN DE BIBLIOTECAS**



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

2 de 2

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, "Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores", los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Firma:

Herman Darío Chavano S.

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Firma:

Jose Luis Joven
Cc. 1015305729

Firma: _____

Vigilada Mineducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional www.usco.edu.co, link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.

	UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA						   			
	GESTIÓN DE BIBLIOTECAS									
DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO										
CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	1 de 3			

TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO: EVALUACIÓN NUMÉRICA DE UN INVERNADERO BATICENITAL DE DOS NAVES: VENTILACIÓN Y PERFILES DE TEMPERATURA.

AUTOR O AUTORES:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Chavarro Sánchez	Hernán Darío
Joven Yunda	José Luis

DIRECTOR Y CODIRECTOR TESIS:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Martínez Palmeth	Luis Humberto
Sanabria Méndez	Nadia Brigitte

ASESOR (ES):

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
N.A	N.A

PARA OPTAR AL TÍTULO DE: Ingeniero Agrícola

FACULTAD: Ingeniería

PROGRAMA O POSGRADO: Ingeniería agrícola

CIUDAD: Neiva

AÑO DE PRESENTACIÓN: 2023

NÚMERO DE PÁGINAS: 34

TIPO DE ILUSTRACIONES (Marcar con una X):

Diagramas_X_ Fotografías___ Grabaciones en discos___ Ilustraciones en general___ Grabados___
 Láminas___ Litografías___ Mapas_X_ Música impresa___ Planos_X_ Retratos___ Sin ilustraciones___
 Tablas o Cuadros_X_

Vigilada Mineducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional www.usco.edu.co, link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.

	UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA GESTIÓN DE BIBLIOTECAS DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO					 ISO 9001	 ISO 14001	 ISO 45001	 LA RED DE BIBLIOTECAS
CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	2 de 3		

SOFTWARE requerido y/o especializado para la lectura del documento: N.A

MATERIAL ANEXO: N.A

PREMIO O DISTINCIÓN (*En caso de ser LAUREADAS o Meritoria*): N.A

PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:

Español

- 1. Temperatura**
- 2. Invernaderos**
- 3. Radiación Solar**
- 4. Modelo computacional**
- 5. CFD**
- 6. Ventilación**

inglés

- 1. Temperature**
- 2. Greenhous**
- 3. Solar irradiation**
- 4. Computational model**
- 5. CFD**
- 6. Ventilation**

RESUMEN DEL CONTENIDO: (Máximo 250 palabras)

En el presente trabajo denominado evaluación numérica de un invernadero tipo baticenital de dos naves se ejecutaron simulaciones numéricas/computacionales tomando como referencia un invernadero que se va a desarrollar en la granja experimental de la Universidad Surcolombiana, para el modelo computacional se propusieron tres configuraciones en relación al tipo de ventilación: ventilación forzada vacío y con plantas, ventilación natural vacío y con plantas y ventilación mixta, además para la ventilación natural se usaron tres niveles de apertura de ventanas (área de entrada de aire externo); dicho modelo geométrico y de volúmenes finitos, se realizó por medio del Ecosistema basado en el software FreeCAD, OpenFoam y Paraview que permiten hacer estudios de dinámica de fluidos computacional (DFC, o en inglés Computational Fluids Dynamics, CFD). FreeCAD tiene una GUI llamada CFDof que permite correr simulaciones mediante el solver OpenFoam. Para las simulaciones se seleccionó, el modelo de turbulencia k-w SST ya que es aplicable a una amplia gama de flujos y usualmente da mejores resultados. Por medio del modelo, se determinó la distribución de variables climáticas de la zona dentro del invernadero tales como temperatura, velocidad del viento y el comportamiento de la presión. Para poder visualizar estos datos nos apoyamos en un software de procesamiento de datos llamado Paraview, con ayuda de este, se determinó aquellas zonas críticas de elevadas temperaturas y circulación nula de aire. Concluyendo que dadas las condiciones climáticas de la zona de estudio además de las condiciones de frontera del modelo entre mayor sea el área de ventanas menor son los gradientes de temperatura interior del invernadero especialmente cuando se hacen combinar la

	UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA GESTIÓN DE BIBLIOTECAS						
DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO							
CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	3 de 3

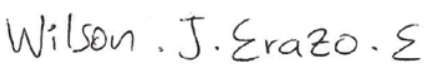
ventilación natural y forzada, el cual en zona de plantas presenta temperaturas óptimas para el buen desarrollo del cultivo de tomate.

ABSTRACT: (Máximo 250 palabras)

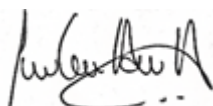
In the present work called numerical evaluation of a baticenital type greenhouse with two warehouses, numerical/computational simulations were carried out taking as reference a greenhouse that is going to be developed in the experimental farm of the Surcolombiana University, for the computational model three configurations were proposed in relation to the type of ventilation: forced ventilation empty and with plants, natural ventilation empty and with plants and mixed ventilation, in addition for natural ventilation three levels of window opening were used (external air intake area); Said geometric model and finite volumes, was carried out by means of the Ecosystem based on the FreeCAD, OpenFoam and Paraview software that allow studies of computational fluid dynamics (DFC, or in English Computational Fluids Dynamics, CFD). FreeCAD has a GUI called CFDof that allows you to run simulations using the OpenFoam solver. For the simulations, the k-w SST turbulence model was selected as it is applicable to a wide range of flows and usually gives better results. Through the model, the distribution of climatic variables of the area inside the greenhouse such as temperature, wind speed and pressure behavior was determined. In order to visualize these data, we relied on a data processing software called Paraview, with the help of this, those critical areas of high temperatures and no air circulation were determined. Concluding that given the climatic conditions of the study area, in addition to the border conditions of the model, the greater the window area, the lower the interior temperature gradients of the greenhouse, especially when natural and forced ventilation are combined, which in the area of plants presents optimum temperatures for the good development of the tomato crop.

APROBACION DE LA TESIS

Nombre Jurado: Wilson Javier Erazo Espinosa

Firma: 

Nombre Jurado: Juan Gonzalo Ardila Marín

Firma: 

Vigilada Mineducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional www.usco.edu.co, link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.

EVALUACIÓN NUMÉRICA DE UN INVERNADERO BATICENITAL DE DOS NAVES: VENTILACIÓN Y PERFILES DE TEMPERATURA

Trabajo de grado presentado al Programa de Ingeniería Agrícola
como requisito para optar al título de: Ingeniero Agrícola

Autores

José Luis Joven Yunda: 20152142961

Hernan Dario Chavarro Sanchez: 20161149435

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería Agrícola

Neiva, Huila, Colombia. 2022.

Nombre Director

Director: Luis Humberto Martínez Palmeth

Nombre Codirectora

Codirector: Nadia Brigitte Sanabria Méndez

Nota de aceptación

Aprobado

Nombre Jurado

Jurado: Wilson Javier Erazo Espinosa

Nombre Jurado

Jurado: Juan Gonzalo Ardila Marín

EVALUACIÓN NUMÉRICA DE UN INVERNADERO BATICENITAL DE DOS NAVES: VENTILACIÓN Y PERFILES DE TEMPERATURA

RESUMEN

En el presente trabajo denominado evaluación numérica de un invernadero tipo baticenital de dos naves se ejecutaron simulaciones numéricas/computacionales tomando como referencia un invernadero que se va a desarrollar en la granja experimental de la Universidad Surcolombiana, para el modelo computacional se propusieron tres configuraciones en relación al tipo de ventilación: ventilación forzada vacío y con plantas, ventilación natural vacío y con plantas y ventilación mixta, además para la ventilación natural se usaron tres niveles de apertura de ventanas (área de entrada de aire externo); dicho modelo geométrico y de volúmenes finitos, se realizó por medio del Ecosistema basado en el software FreeCAD, OpenFoam y Paraview que permiten hacer estudios de dinámica de fluidos computacional (DFC, o en inglés Computational Fluids Dynamics, CFD). FreeCAD tiene una GUI llamada CFDof que permite correr simulaciones mediante el solver OpenFoam. Para las simulaciones se seleccionó, el modelo de turbulencia k-w SST ya que es aplicable a una amplia gama de flujos y usualmente da mejores resultados. Por medio del modelo, se determinó la distribución de variables climáticas de la zona dentro del invernadero tales como temperatura, velocidad del viento y el comportamiento de la presión. Para poder visualizar estos datos nos apoyamos en un software de procesamiento de datos llamado Paraview, con ayuda de este, se determinó aquellas zonas críticas de elevadas temperaturas y circulación nula de aire. Concluyendo que dadas las condiciones climáticas de la zona de estudio además de las condiciones de frontera del modelo entre mayor sea el área de ventanas menor son los gradientes de temperatura interior del invernadero especialmente cuando se hacen combinar la ventilación natural y forzada, el cual en zona de plantas presenta temperaturas óptimas para el buen desarrollo del cultivo de tomate.

Palabras clave: temperatura, invernaderos, radiación solar, modelo computacional, CFD, ventilación.

ABSTRACT

In the present work called numerical evaluation of a baticenital type greenhouse with two warehouses, numerical/computational simulations were carried out taking as reference a greenhouse that is going to be developed in the experimental farm of the Surcolombiana University, for the computational model three configurations were proposed in relation to the type of ventilation: forced ventilation empty and with plants, natural ventilation empty and with plants and mixed ventilation, in addition for natural ventilation three levels of window opening were used (external air intake area); Said geometric model and finite volumes, was carried out by means of the Ecosystem based on the FreeCAD, OpenFoam and Paraview software that allow studies of computational fluid dynamics (DFC, or in English Computational Fluids Dynamics, CFD). FreeCAD has a GUI called CFDof that allows you to run simulations using the OpenFoam solver. For the simulations, the k-w SST turbulence model was selected as it is applicable to a wide range of flows and usually gives better results. Through the model, the distribution of climatic variables of the area inside the greenhouse such as temperature, wind speed and pressure behavior

was determined. In order to visualize these data, we relied on a data processing software called Paraview, with the help of this, those critical areas of high temperatures and no air circulation were determined. Concluding that given the climatic conditions of the study area, in addition to the border conditions of the model, the greater the window area, the lower the interior temperature gradients of the greenhouse, especially when natural and forced ventilation are combined, which in the area of plants presents optimum temperatures for the good development of the tomato crop.

Keywords: temperature, greenhouse, solar irradiation, computational model, CFD, ventilation.

INTRODUCCIÓN

Una de las técnicas más usadas en todo el mundo para llevar a cabo la producción agrícola es la llamada agricultura protegida en invernaderos, razón por la cual existen estructuras con diferentes formas, tamaños, tipos de materiales y nivel tecnológico (Rodríguez & Velázquez, 2019). En Colombia de a poco esta técnica ha cogido vuelo principalmente en zonas donde el clima es favorable, como la Sabana de Bogotá y la región de Rionegro, Antioquia. En zonas semiáridas el gran problema del manejo de un invernadero son las altas temperaturas que a diario se presentan sobre estas regiones cálidas (Rodríguez & Velázquez, 2019). En estas zonas cálidas, uno de los problemas que se deben controlar es la temperatura interior, ya que suele sobrepasar el umbral máximo biológico permitido por las plantas ocasionando pérdidas en rendimiento y calidad de los cultivos (Ali et al., 1990). Uno de los grandes desafíos locales ha sido la búsqueda de diseños de invernaderos adaptados a las condiciones climáticas locales, para que sea una opción de alternativa, al diseño del invernadero típico colombiano, cuya estructura fue desarrollada para la producción de flores de corte y cultivos ornamentales bajo clima frío y húmedo (Díaz et al., 2016). En particular, lo que se busca con tener invernaderos ventilados naturalmente es proteger a los cultivos de valores extremos de variables climáticas como temperatura, radiación solar, velocidad del viento y las precipitaciones, además la protección contra las plagas y enfermedades además de hacer un uso eficiente del recurso hídrico (Villagrán et al., 2021). El principal concepto de diseño de estas nuevas alternativas de invernadero o estructuras agrícolas protegidas con ventilación natural es optimizar el flujo de aire interno para lograr tasas de ventilación suficientes para garantizar la generación de microclimas aptos para la producción agrícola. En los últimos años, una de las herramientas de modelado y simulación más utilizadas para desarrollar nuevos diseños de invernaderos es la dinámica de fluidos computacional (CFD) (Bournet, 2013; Senhaji et al., 2019; Villagrán et al., 2019). En el modelado numérico del microclima del invernadero, muchos investigadores han utilizado CFD para estudiar los efectos del diseño del invernadero sobre la ventilación dentro del mismo (Bournet et al., 2007; Hong et al., 2008). Esta herramienta permite observar gráficamente el movimiento de aire creado por la ventilación natural en el invernadero (Rojano et al., 2013).

En los últimos tiempos la dinámica de fluidos computacional CFD se ha convertido en una herramienta útil para estudiar fenómenos de ventilación forzada y ventilación natural dentro de un invernadero, en el estudio realizado por Granell, se generaron 24 modelos de flujos de aire alrededor del invernadero resultantes de cuatro modelos de turbulencia, dos modelos de discretización de primer y segundo orden y tres velocidades de viento exterior, esto con el fin de analizar sus diferencias y demostrar sus ventajas e inconvenientes, el estudio se validó con datos en campo mediante análisis de regresión lineal con este estudio se determinó que los modelos SST y RSM representaron de una manera clara el flujo de ventilación. (Granell, 2014). Un estudio

realizado por Villagrán, determinó el comportamiento térmico de un invernadero de producción de rosa utilizando la dinámica de fluidos computacional CFD. Este enfoque metodológico permitió obtener los patrones de distribución térmica en el interior del invernadero, encontrando que para las condiciones meteorológicas evaluadas este genera unas condiciones térmicas inadecuadas para el cultivo durante períodos nocturnos donde el valor de la temperatura estuvo por debajo del mínimo recomendado. La validación del modelo CFD, se comparó realizando los resultados de la simulación y las temperaturas registradas en el prototipo real del invernadero (Villagrán, 2019).

Prado y colaboradores, realizaron un trabajo en un invernadero tipo venlo, donde se simuló la circulación del aire dentro de este para diferentes condiciones de ventilación, utilizando dos modelos: uno de ellos contempla las ecuaciones completas de Navier-Stokes y el otro considera uno simplificado de Navier-Stokes donde no se considera la aceleración convectiva en la ecuación de cantidad de movimiento. La simulación se realizó para un flujo bidimensional incompresible en estado estacionario, el modelo fue resuelto numéricamente por el método de los elementos finitos debido a que se adapta adecuadamente a formas irregulares como pueden ser los techos o ventanas de los invernaderos (Prado et al., 2013). Velásquez y colaboradores, realizaron la evaluación del desempeño climático de un invernadero modelando el flujo de aire de un invernadero batiscéntrico de 10 naves ubicado en el centro de México mediante dinámica de fluidos computacional CFD, dando como resultado que el manejo del clima involucra la combinación de apertura de ventanas para reducir gradientes de temperatura, por otro lado, las ventanas cenitales incrementan el intercambio de aire y en consecuencia homogeniza la distribución espacial térmica (Velásquez et al., 2014).

Se plantearon como objetivos de investigación del caso de estudio, evaluar numéricamente los perfiles de velocidad y temperatura dentro del invernadero batiscéntrico de dos naves mediante la técnica de CFD para varias configuraciones experimentales, igualmente se realizó una revisión bibliográfica sobre cada una de las investigaciones sobre simulaciones CFD aplicadas a los invernaderos; también se solicitaron los datos climáticos provenientes de las estaciones más cercanas a la zona de estudio para luego procesarlos y obtener valores de velocidad del viento promedio de la zona y la temperatura mínima y máxima sobre la cual se trabajó. Así mismo se obtuvieron los campos de velocidades y temperatura para diferentes configuraciones de diseño del invernadero a través de un modelo computacional CFD, luego se identificaron las zonas críticas de temperatura y velocidad dentro del invernadero para cada modelo.

Como antecedente a este trabajo se tiene un diseño propuesto para el invernadero de la granja experimental de la Universidad Surcolombiana, ubicada sobre el Distrito de Riego El Juncal jurisdicción del municipio de Palermo-Huila, bajo condiciones climáticas de clima cálido; se pretende emplear las técnicas de CFD para realizar simulaciones computacionales, que permitan evaluar variables climáticas como temperatura, velocidad del viento y comportamiento de la presión dentro del invernadero. El desarrollo de sistemas de producción bajo ambiente controlado (Invernadero) en Colombia se ha centrado principalmente en regiones del país con climas fríos y templados, en el departamento del Huila se han implementado principalmente casas sombreadas, en donde se tienen infraestructuras con cubiertas únicamente en el techo sin tener límites en las paredes laterales, en donde el control de variables climáticas no es posible, debido a que las condiciones ambientales se encuentran ligadas a las del exterior. En la Granja experimental se tiene proyectado construir un invernadero batiscéntrico con dos naves, sin embargo, ésta se encuentra ubicada en un clima tropical con temperatura exterior por encima de los 30°C, lo cual demanda el uso de sistemas de ventilación para garantizar las condiciones óptimas de temperatura y humedad relativa para el desarrollo de los cultivos. Para realizar la simulación computacional, se realizaron diferentes configuraciones dentro del modelo de elementos finitos y se modeló el flujo mediante

el modelo de turbulencia k- ω SST tanto para la ventilación natural y forzada dentro del invernadero, además se simularon diferentes niveles de aperturas de ventanas laterales para ventilación natural en invernadero vacío y con plantas de cultivo de Tomate, como también la fusión entre ventilación natural y forzada. De hecho, uno de los aportes más importantes de este estudio es que se particularizan las condiciones del modelo computacional para el cultivo de tomate y se incluyen las plantas o el efecto de estas en el estudio de CFD.

MATERIALES Y MÉTODOS

- **Ubicación del área de estudio.**

El invernadero está diseñado para construirse en el Municipio de Palermo Departamento del Huila, sobre el distrito de riego el Juncal sobre margen izquierda del Río Magdalena cuyas coordenadas planas son 810960 N- 863208 W y 450 msnm.

- **Caracterización climática de la zona.**

La zona del distrito de riego el Juncal donde está ubicada la granja experimental de la Universidad Surcolombiana está sobre una zona de clima cálido seco, se encuentra dentro de la franja altitudinal de 500 a 800 msnm, con una precipitación promedio anual de 1000 a 2000 mm (ASOJUNCAL,s.f). Las variables climáticas de temperatura mínima y máxima determinadas para la zona de estudio fueron tomados de la estación hidroclimatológica El Juncal, datos que fueron suministrados por el Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM; se tomaron registros desde el año 2011 hasta 2021; de igual forma, los datos de velocidad del viento se recopilieron registro desde el año 2010 hasta el 2021 de la estación climatológica del Aeropuerto Benito Salas de Neiva, estación más cercana a la zona de estudio ya que la estación el Juncal no contaban con registros de esta variable climática. Para la radiación solar se tomó el dato del atlas de información climática que proporciona el IDEAM para la zona de estudio. Es así como se obtuvo que la zona de estudio cuenta con una temperatura mínima media mensual de 22.85°C (tabla 1) y una temperatura máxima media mensual de 35.85°C (tabla 2). Para la velocidad del viento el valor promedio fue de 6,1 m/s (tabla 3); y radiación solar valor con valor promedio 5000 Wh/m² (Figura 1).

	TEMPERATURA MINIMA °C											
	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
2010	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	22,19	21,6	21,66	21,71	21,69
2011	21,81	n/a	21,84	21,75	22,51	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
2012	n/a	n/a	n/a	21,24	21,92	22,11	22,91	22,95	23,25	22,19	22,14	21,57
2013	21,99	22,07	22,27	22,68	22,18	21,78	22,07	22,5	22,15	22,07	22,12	22,07
2014	22,04	22,37	22,03	22,25	22,27	22,18	23,16	22,65	22,21	22,46	21,95	21,96
2015	21,56	22,56	22,72	22,9	22,61	22,8	23,21	24,08	24,25	23,45	23,03	23,49
2016	23,6	24,32	23,88	23,32	23,17	22,5	22,88	23,08	22,7	22,95	22,66	22,06
2017	22,18	22,32	22,08	22,41	22,39	22,25	23,48	22,6	22,94	23,09	22,23	22,23
2018	21,4	22,08	21,81	21,75	22,13	22,22	22,91	22,87	22,93	22,91	22,9	21,81
2019	22,27	23,8	22,75	21,95	22,02	22,21	22,27	23,86	23,83	21,97	22,29	22,62
2020	22,74	22,6	22,85	23,03	n/a	n/a	n/a	22,32	21,74	22,72	22,47	22,29
2021	21,85	22,38	21,61	22,03	22,26	22,14	22,29	22,59	n/a	n/a	n/a	n/a

TABLA 1. Valores de temperatura mínima de la zona de estudio.

	TEMPERATURA MAXIMA °C											
	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
2012	n/a	n/a	n/a	32,92	32,86	33,6	33,76	34,07	34,61	32,84	31,69	31,9
2013	33,43	31,11	32,7	34,03	31,62	34,28	34,62	34,44	35,54	34,81	31,99	32,14
2014	33,64	34,19	32,59	35,4	34,12	34,56	35,5	35,04	35,96	34,56	32,26	32,96
2015	34,26	34,42	34,21	33,6	34,85	34,72	36,43	36,94	38,1	36,3	34,65	36,11
2016	35,9	35,39	34,6	33,53	33,94	33,94	34,37	34,77	35,6	34,53	33,85	32,66
2017	32,15	33,63	32,41	33,34	33,52	33,9	35,91	36,58	37,55	35,3	32,88	33,18
2018	33,3	33,18	33,79	32,42	33,1	32,2	36,45	36,68	n/a	n/a	33,6	35,95
2019	33,2	34,77	34,59	34,24	35,17	38,2	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
2020	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
2021	33,81	n/a	31,61	n/a	33,66	n/a	n/a	34,3	n/a	n/a	n/a	n/a

TABLA 2. Valores de temperatura máxima de la zona de estudio.

	MAGNITUD m/s											
	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
2010	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	6,49	5,78	6,11	5,19	6,67
2011	6,22	5,48	5,76	5,99	7,22	6,86	7,21	7,26	7,22	5,86	4,72	4,32
2012	4,42	4,77	5,2	4,65	6,21	6,67	7,27	6,84	7,59	6,69	6,11	5,87
2013	4,89	6,19	n/a	n/a	n/a	5,95	6,87	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
2014	5,4	6,16	5,72	6,75	5,44	7,13	8,09	7,98	6,17	5,91	3,8	5,58
2015	4,85	5,33	5,08	6,02	6,27	7,49	7,12	9,04	6,41	5,67	8,32	8,19
2016	6,89	7,31	6,77	6,51	8,22	7,98	9,36	8,48	8,5	7,32	n/a	n/a
2017	n/a	6,41	6,06	5,28	5,42	5,88	8,94	6,92	7,79	6,76	5,21	4,6
2018	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
2019	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
2020	5,1	4,89	4,62	5,2	4,78	4,72	4,67	5,18	4,85	4,56	4,93	4,31
2021	4,11	4,13	4,12	3,91	4,33	4,45	5,89	5,62	n/a	n/a	n/a	n/a

TABLA 3. Valores de velocidad del viento de la zona de estudio.

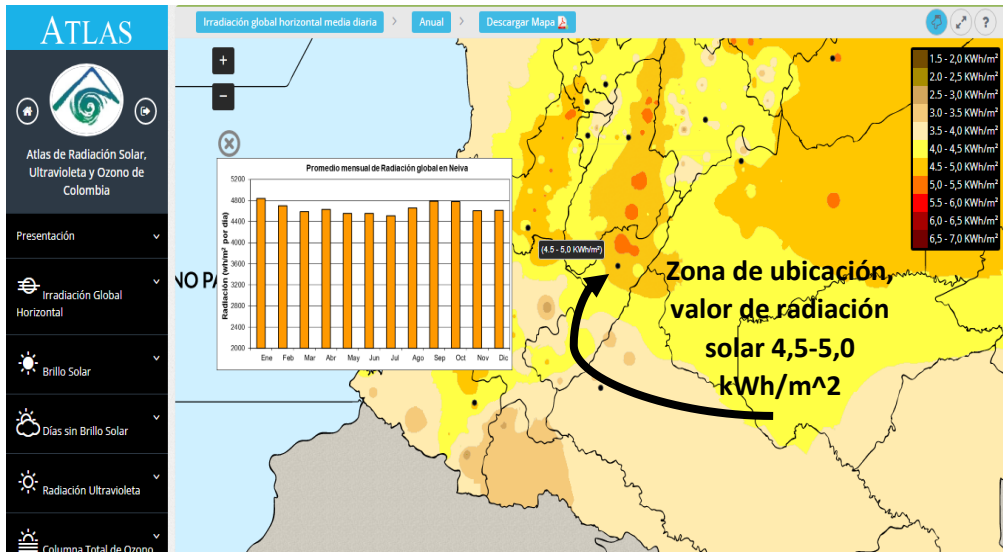


FIGURA 1. Valor de la radiación solar usada en la simulación, Fuente IDEAM.

- **Diseño del invernadero.**

El diseño del invernadero propuesto para la construcción inicialmente cuenta con dos naves en total 10 m en la parte frontal y 12 m de fondo, con un área total de 120 metros cuadrados, de altura 4,5 m y 2 m de altura semicircular, cada nave cuenta con su ventana cenital de altura 1.25 m, imagen 2, además tiene un sistema de ventilación automatizado de 2 ventiladores rotatorios y un extractor de 24'', está proyectado para instalar un cultivo de Tomate (*Solanum lycopersicum*). Dentro de las especificaciones técnicas del proyecto se tiene estipulado para sembrar plantas de Tomate en el invernadero. Finalmente tiene un volumen de 780 metros cúbicos. Figura 2.

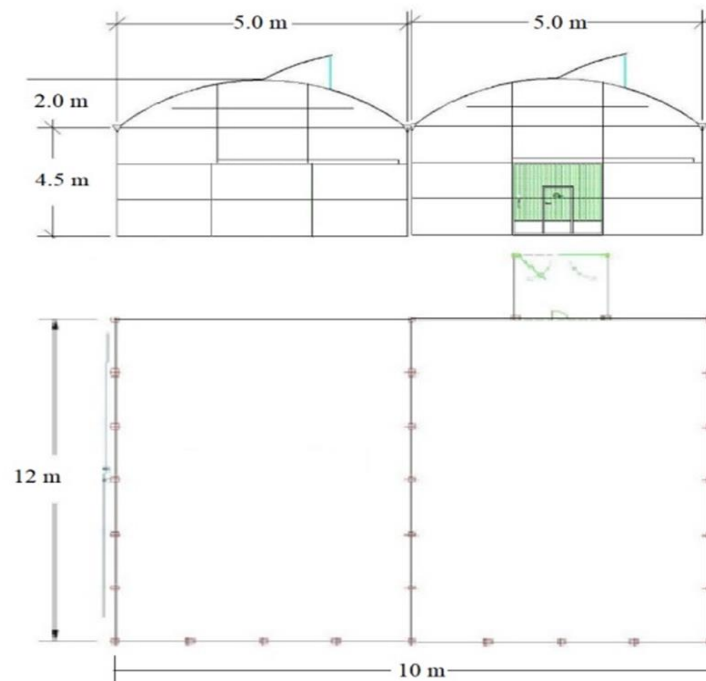


FIGURA 2. Dimensiones del invernadero.

- **Modelo CAD.**

Para el estudio numérico del invernadero baticenital de dos naves se realizaron dos modelos CAD. En uno solo se consideró el invernadero sin plantas, esta configuración se le denominó “invernadero vacío” figura 3, y la otra configuración consistió en modelar también las plantas de tomate en edad de producción media, a esta configuración se le denominó “con plantas” figura 4. Para ambas configuraciones el entorno de trabajo elegido fue FreeCAD, este es un modelador 3D paramétrico de código abierto hecho para diseñar objetos de la vida real en cualquier tamaño. Este modelado paramétrico permite modificar fácilmente el diseño volviendo al historial de su modelo y cambiando sus parámetros, está diseñado para adaptarse a una amplia gama de usos dentro de la ingeniería en general; obtiene herramientas modernas de análisis de elementos y volúmenes finitos con los cuales es posible hacer CFD, banco de trabajo de geodatos y demás (FreeCAD, s.f).

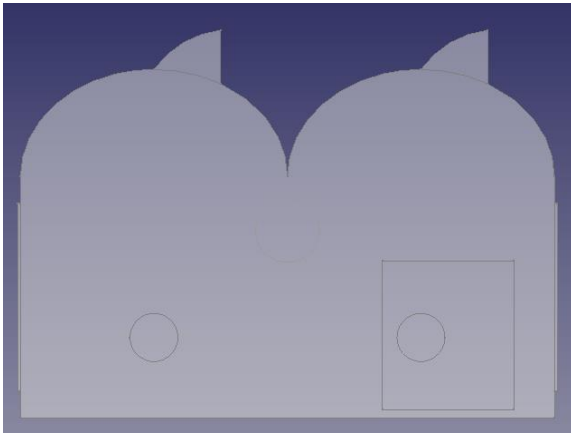


FIGURA 3. Invernadero vacío.

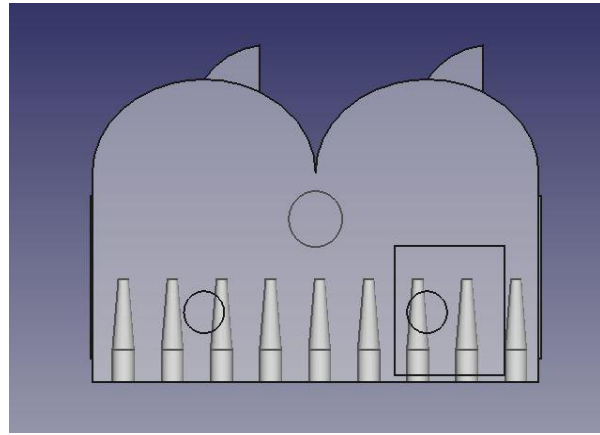


FIGURA 4. Invernadero con plantas.

- **Cálculos para ventilación natural (ventanas laterales).**

Para la ventilación natural del invernadero se tuvieron en cuenta tres áreas de ventanas, las cuales se evaluaron con la misma velocidad del viento, dichas área de ventanas se calcularon de acuerdo a las ecuaciones dadas en los estudios de ingeniería agrícola en América Latina descritos por Kriuchkova et al 2014, citado por Contreras y Sánchez en 2012, donde se calcula el caudal de ventilación ecuación (1) y área de ventilación, ecuación (2):

$$Q_v = (A_i)(h_i)(N_{rev}) \quad (1)$$

$$Q_v = (120 \text{ m}^2)(6.5 \text{ m}) \left(\frac{1 \text{ rev}}{\text{min}} \right) = 780 \frac{\text{m}^3}{\text{min}}$$

Donde: Q_v = caudal de ventilación ($\frac{\text{m}^3}{\text{min}}$); A_i = área del invernadero (m^2); h_i = altura del invernadero (m); N_{rev} = número de renovaciones por minuto. Según Bernat en 1992 citado por Briceño, s.f, la renovación del aire dentro del invernadero es un fenómeno donde el aire más caliente con menor densidad asciende dando paso al aire más frío que entra del exterior por lo tanto más denso ocupando las zonas bajas del invernadero. Esas tasas de ventilación deberían ser entre 0,75 a 1,25 renovaciones del volumen de aire del invernadero por minuto siendo 60 renovaciones por hora lo ideal para los cultivos (Briseño, s.f).

$$Av = \frac{Qv}{(Vv)(E)} \quad (2)$$

$$Av = \frac{780 \frac{m^3}{min}}{(360 \frac{m}{min})(0.30)} = 7.22 m^2$$

Donde: Av = área de ventilación (m^2); Qv = caudal de ventilación ($\frac{m^3}{min}$); Vv = velocidad del viento ($\frac{m}{min}$); E = efectividad de la ventana (adimensional), 0.50 a 0.60 para vientos perpendiculares, de 0.25 a 0.35 para vientos diagonales, se usa la mitad del valor si presenta malla antiafidos (Fuentes et al 2004). Cabe mencionar que se tomaron vientos perpendiculares, pero como las ventanas del invernadero van con malla antiafidos se toma la mitad del valor de efectividad.

El valor de $360 \frac{m}{min}$ correspondiente a la velocidad del viento descrito en la ecuación 2 da como resultado de pasar los $6,1 \frac{m}{s}$ de la velocidad del viento determinados por los datos climáticos de las estaciones climatológicas de la zona de estudio y se convierten a $\frac{m}{min}$ para uniformidad de unidades.

A partir de estos resultados se establecieron 3 niveles de apertura de ventanas para la ventilación natural, 100% abiertas con $40,25m^2$ de área de ventanas, lo que implica que toda la pared lateral del invernadero configura la ventana, logrando 5,57 renovaciones de aire por minuto, 50% abiertas con $20 m^2$ de área de ventanas, logrando 2,77 renovaciones de aire por minuto, y 18% abiertas con $7,22 m^2$ de área de ventanas, garantizando mínimo 1 renovación por minuto.

Modelo CAD de las plantas de Tomate.

Para el modelado de las plantas se tomó como referencia una medida de altura promedio de una planta de Tomate ya que en el software no se puede simular la figura de una planta en forma real, se utilizó figuras geométricas para simular las plantas dentro de la estructura. De igual forma se simulaban las bolsas plásticas con sustrato según especificaciones del proyecto de 30 litros, las cuales soportan las plantas. Para las plantas se tomó un cono tronco como figura geométrica y para las bolsas plásticas de 30 litros un cilindro. Las dimensiones del cono truncado que simula la planta de Tomate se le dieron medidas de altura de 150 cm, radio menor de 12 cm y radio mayor de 25 cm y al cilindro medidas de 25 cm de radio y una altura de 70 cm respectivamente (figura 5).

Según Fornaris 2007, la altura que puede alcanzar una planta de tomate varía entre los 50 cm en edad temprana hasta los 2 metros o más en etapa productiva. Debido a esto en este estudio se tomó como referencia una altura media de 1,50 m; además según Barraza et al 2004, en un estudio del proceso de crecimiento del cultivo del Tomate encontró que el área foliar para una densidad de siembra de 50.000 plantas por hectárea es de aproximadamente $8100 cm^2$ equivalente a $0.81 m^2$, por tanto, para obtener un área similar se tomó un cono tronco con radio menor y mayor de 12 y 25 cm respectivamente y altura de 150 cm. Para eso se llevó a cabo el cálculo del área del cono tronco y obtener un área cercana a la referenciada, ecuación (3). Además de esto dadas las condiciones del software utilizado FreeCAD el cual no permite ilustrar la forma de una planta de tomate se tomó como referencia la forma de un cono truncado, de igual manera teniendo en cuenta

las podas tal como lo menciona Pérez y Castro en 2011 en la planta se realizan para conducir las en un solo tallo se realizan estas podas en los brotes, estos son ramas potenciales que salen de la axila de cada una de las hojas del tallo principal, también se realizan podas en hojas ya que si no se realiza se generan microambientes de alta humedad relativa en parte inferior de las plantas lo cual es propicio para causar enfermedades y retarda la maduración de frutos. Teniendo en cuenta que las plantas no son sólidas como se toma el cono truncado, sino que hay espacios entre las ramas y que el área de interés para el IAF (Índice de Área Foliar) es solamente el lado superior de la hoja, se ajusta el valor del área calculada con el cono truncado multiplicando por un factor de 0.5. El Índice de Área Foliar (IAF), tal como lo afirma Allen et al, 2006, es una cantidad adimensional, que presenta el área de la hoja (lado superior solamente) por unidad de área de suelo debajo de ella, se expresa como m^2 de área foliar por m^2 de área de suelo. El IAF activo es el índice de área foliar que contribuye activamente a la transferencia superficial de calor y de vapor.

$$A = \pi[R^2 + r^2 + g(R + r)] \quad (3)$$

Donde: A= área del cono tronco (m^2); R= radio de la base inferior (m); r= radio de la base superior (m); g= generatriz (m) o altura.

$$A = \pi[0,25^2m + 0,12^2m + 1,5m(0,25m + 0,12m)]$$

$$A = (1,98 m^2)(0,5) = 0,99 m^2$$



FIGURA 5. Dimensiones de planta simulada.

En el software FreeCad se crearon figuras dentro del volumen del invernadero, formando la separación entre las plantas y surcos de 1,1m x 1,1m con una densidad de siembra de 0,826 plantas por m^2 para la respectiva simulación (figura 6). Se debe tener en cuenta que las densidades de siembra del tomate las cuales están sometidos a una agricultura protegida o de invernadero se utilizan surcos individuales dejando distancia entre estos de 1 a 1,4 metros y camas de doble surco con distancia de surco de 0,5 a 0,6 m. La distancia entre cama oscila de 0,8 y 1 m, y entre plantas de 0,3 a 0,8 m, alcanzando densidades de 2,2 a 2,5 plantas/ m^2 , tomado del manual del tomate emitido por el programa de apoyo agrícola y agroindustrial Cámara de Comercio de Bogotá, 2015. En el caso de la investigación se tomó como referencia una de densidad de siembra baja ya que la capacidad computacional de los equipos era limitada y el aumento de figuras dentro del invernadero dificultaba la simulación razón por la cual se tomó dicha densidad de siembra.

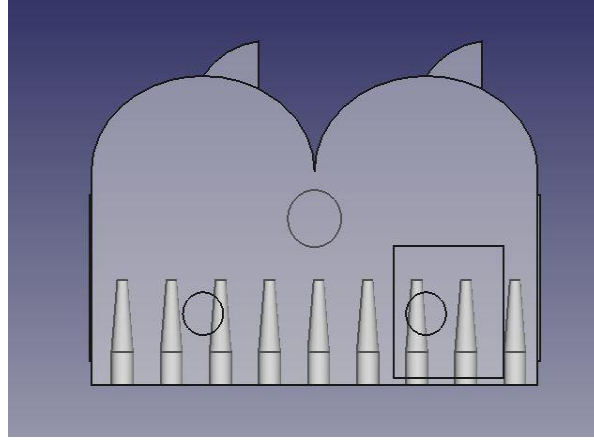


FIGURA 6. Modelo CAD con plantas y ventilación forzada.

- **Cálculos para Ventilación forzada.**

Para la ventilación forzada se colocaron dos ventiladores en la parte superior del invernadero cada uno con un radio de 45 cm, junto con un extractor de 24'' con 60 cm de radio como estaba en las especificaciones iniciales del diseño, así mismo se realizó la configuración en el software FreeCAD para simular ventilación forzada (figura 6).

Los sistemas de ventilación forzada (mecánica) se diseñan generalmente para proporcionar un caudal de aire de $0,04 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m}^2$ ($2,4 \text{ m}^3/\text{min} \cdot \text{m}^2$) de área de suelo cubierta por el invernadero. En la práctica se ha constatado que los beneficios que se obtienen por tener tasas de ventilación mayores son pequeños en comparación con el coste de electricidad que se deriva de emplear un mayor número de ventiladores (Baeza et al, 2014).

De igual forma se realizó el cálculo del caudal de ventilación y el número de ventiladores necesario para ese caudal determinado, según las ecuaciones de Contreras y Sánchez en 2012, ecuación (4 y 5).

$$Qv = (Ai)(2,4 \frac{\text{m}^3}{\text{min} \cdot \text{m}^2}) \quad (4)$$

$$Qv = (120)\text{m}^2 \left(2,4 \frac{\text{m}^3}{\text{min} \cdot \text{m}^2} \right) = 288 \frac{\text{m}^3}{\text{min}}$$

Donde: Qv = caudal de ventilación (m^3/min); Ai = área del invernadero (m^2); $2,4 \text{ m}^3/\text{min} \cdot \text{m}^2$ = tasa de renovación para ventilación forzada.

$$\#Ventiladores = \frac{Qv}{Q_{\text{ventilador}}} \quad (5)$$

$$\#Ventilador = \frac{288 \frac{\text{m}^3}{\text{min}}}{146,511 \frac{\text{m}^3}{\text{min}}} = 2 \text{ ventiladores.}$$

Donde: Qv = caudal de ventilación (m^3/min); $Q_{\text{ventilador}}$ = caudal del ventilador a usar.

Para el caso de estudio se determinó usar un ventilador (modelo 1SDE 24BB), el cual ya estaba definido en el diseño inicial del invernadero. El cual otorga un caudal de $146,511 \text{ (m}^3/\text{min)}$ dado

por el fabricante. Para determinar la velocidad de entrada de cada ventilador tomamos la ecuación de caudal, ecuación (6) y despejando la velocidad se obtuvo ese valor. Para determinar el área del ventilador se aplicó la fórmula de un círculo tomando el radio del ventilador, ecuación (7).

$$Q = V * A = V = \frac{Q}{A} \quad (6)$$

$$A = \pi * r^2 \quad (7)$$

$$A = \pi * (0,45m)^2 = 0,636 m^2$$

$$V = \frac{146,511 m^3/min}{0,636 m^2} = 230,32 m/min = 3,840 m/s.$$

Así se obtuvo el valor de velocidad para cada ventilador en las condiciones de frontera del modelo el cual se simuló para ventilación forzada.

- **Modelo computacional.**

El complemento CfdOF tiene como objetivo ayudar a los usuarios de FreeCAD a configurar y ejecutar análisis CFD mediante comandos que permiten configurar el modelo físico, valores iniciales de entrada y salida para temperatura, velocidad y presión, utilizando el solucionador OpenFOAM que es un software que estudia el comportamiento de los fluidos. Tiene múltiples aplicaciones para resolver problemas relacionados con la dinámica de fluidos computacional tales como la turbulencia para ser recopilados mediante Paraview que es un software de visualización y análisis de datos de código abierto que permite explorar y observar datos en 3D. Para obtener los resultados de las simulaciones para invernadero vacío y con plantas se determinaron las condiciones de entradas, salidas y el flujo de calor en la cubierta de invernadero mostradas en las figuras 7, 8 y 9 con los valores asignados en la tabla 5.

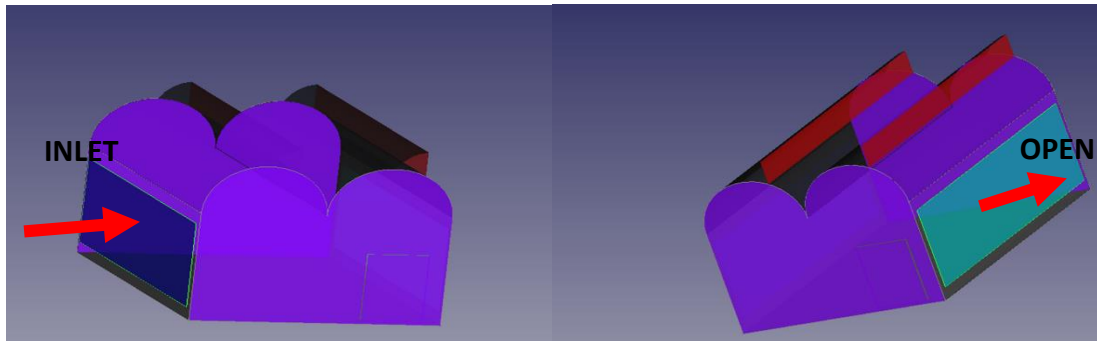


FIGURA 7. Ventana lateral para invernadero vacío y plantas con entrada de aire en dirección del viento y abierta a condiciones atmosféricas para invernadero vacío y plantas.

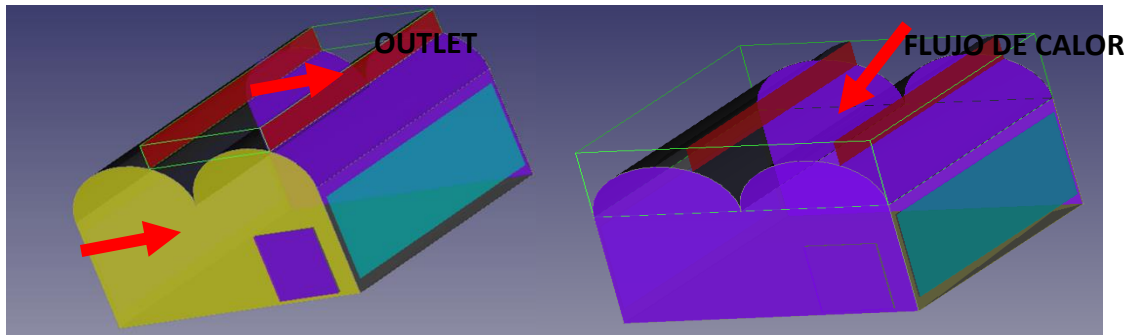


FIGURA 8. Ventanas cenitales utilizadas como salidas y cubierta del invernadero como fuente de flujo de calor de la radiación solar para invernadero vacío y con plantas.

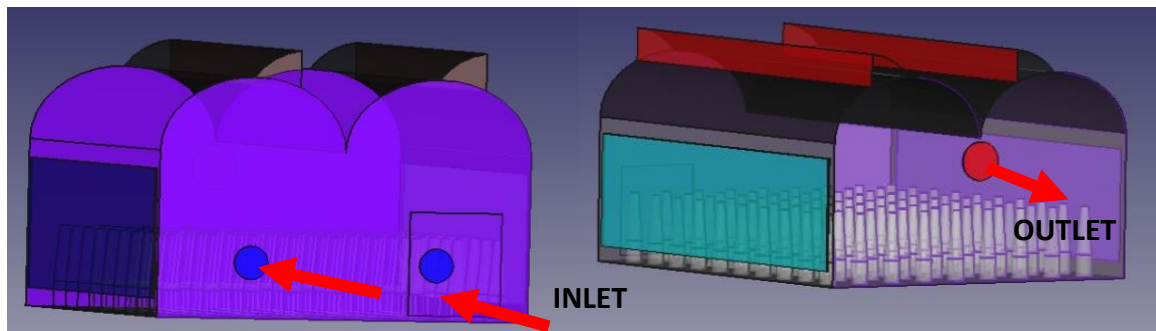


FIGURA 9. Ventiladores utilizados como entradas de aire para ventilación forzada y extractor como salida de aire caliente para invernadero vacío y plantas.

- **Análisis de sensibilidad de malla o estudio de convergencia de resultados.**

Previamente a los estudios de simulación definitivos, fue necesario realizar un estudio sobre la influencia que tienen sobre los resultados el tamaño de los elementos usados en la simulación. Dicho estudio consiste en, mallar nuestro volumen de control varias veces, al inicio con pocos elementos (elementos muy grandes), e ir aumentando el número de elementos (elementos muy pequeños), y observar cómo varían los resultados de la simulación según dicho tamaño, en la figura 10 se observa el modelo de volúmenes finitos usado en las simulaciones.

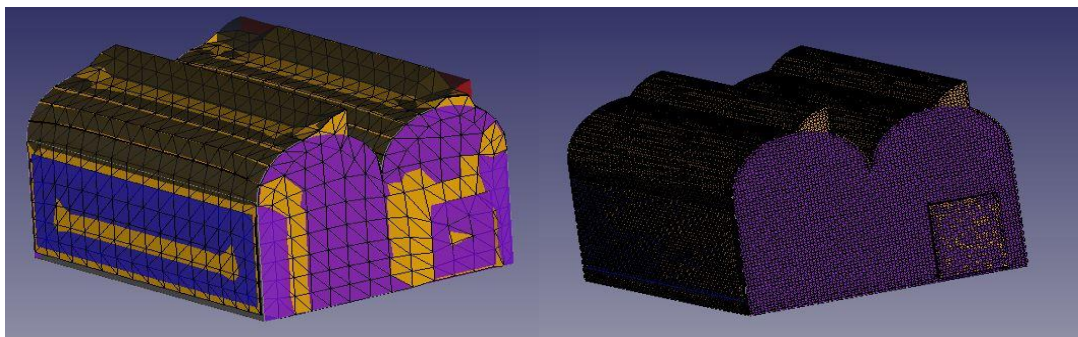


FIGURA 10. Mallado en cfmesh con tamaño de malla grueso y fino

Durante las distintas simulaciones deben permanecer constantes, las condiciones de contorno, los modelos de comportamiento, los materiales y desde luego la geometría. Así mismo, se debe mantener el punto de evaluación para los resultados a comparar, que para este estudio fueron la velocidad del viento. Para nuestro caso el punto de control o toma de los datos numéricos en cada uno de los tamaños de malla fue a 1.5 metros del suelo sobre la línea AB tal como se muestra en la figura 11.

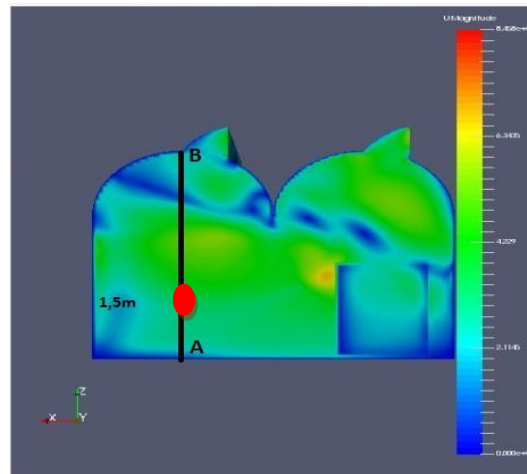


FIGURA 11. Punto de evaluación de resultados a 1,5 metros de altura para diferentes tamaños de malla

Los tamaños de elementos usados, el número de nodos en el modelo y los resultados de la velocidad en el punto de evaluación se muestran en la tabla 4. Donde se observa que el valor calculado de la velocidad varía dependiendo al tamaño de los elementos usados.

CURVA DE CONVERGENCIA		
Valor de la velocidad (m/s) a 1.5m de altura	No. de Nodos en el modelo	Tamaño de los elementos (mm)
0,0002651	1414	700
0,00284	1586	600
0,0114	2190	500
0,02209	4082	400
0,176	7140	300
3,4256	15924	200
3,995	17416	190
4,125	20292	180
4,2246	24286	160
4,4678	27930	150
4,5195	43470	120
4,612	62076	100
4,695	96902	80

TABLA 4. Valores de la velocidad a 1,5 metros de altura para curva de convergencia con diferentes N° de mallas

Al graficar dichos datos, la curva obtenida se muestra en la figura 12. Donde se observa que para un número de nodos de aproximadamente 40000 los resultados convergen o se saturan. Lo que significa que dejan de depender del tamaño de la malla, este número de nodos corresponde a un tamaño de aproximadamente 120mm para los elementos del modelo.

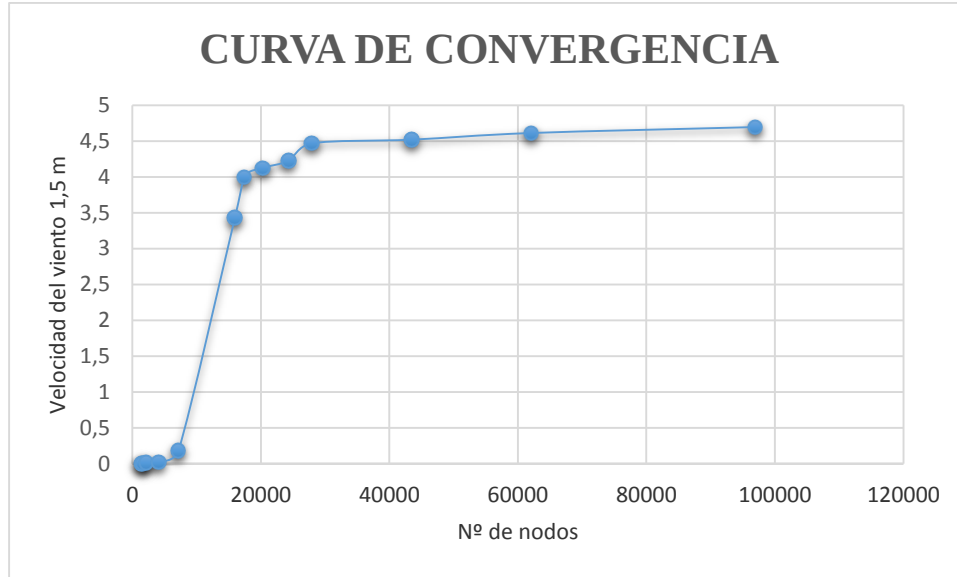


FIGURA 12. Curva de convergencia de resultados.

- **Modelo de turbulencia**

Según Villagrán et al., 2020 los modelos numéricos CFD son una técnica para resolver un conjunto de ecuaciones diferenciales parciales no lineales como Navier Stokes promediadas por Reynolds (RANS), que se discretizan a través de los métodos numéricos utilizando un sistema de ecuaciones lineales. Un análisis de CFD permite calcular los campos de presión y velocidad generados dentro de un invernadero. Así mismo, acoplado el problema de transferencia de calor y solucionándolo simultáneamente podemos además obtener el campo de distribución de temperatura.

Los fenómenos de transporte por convección libre pueden ser descritos por la ecuación (8), la cual se considera la ecuación general de transporte de un fluido en estado estacionario.

$$\frac{\partial(u\phi)}{\partial x} + \frac{\partial(v\phi)}{\partial y} + \frac{\partial(w\phi)}{\partial z} = \Gamma \nabla^2 \phi + S_\phi \quad (8)$$

Donde y, x y z representan las coordenadas en el espacio cartesiano, u, v y w son los componentes del vector de velocidad, ∇^2 es el operador laplaciano, Γ es el coeficiente de difusión, ϕ representa la concentración de la cantidad transportada en una forma dimensional (momento, masa y energía), y S_ϕ es el termino fuente o de generación.

El modelo de turbulencia utilizado para la simulación es el modelo SST k- ω donde se calcula con las siguientes ecuaciones (9 y 10). Este es un modelo que combina la robustez del k- ϵ con la

exactitud del modelo k- ω , lo que lo hace aplicable a una amplia gama de flujos. Emplea k- ϵ en las zonas de corriente libre y k- ω en las regiones cercanas a las paredes, pero su formulación elimina algunas debilidades de estos dos modelos. El modelo SST o el modelo de transporte de esfuerzo cortante SST, combina las ventajas de los dos modelos anteriores. Es del tipo bajo número de Reynolds ya que no está en función de la pared, sino que resuelve el flujo en las regiones cercanas a las paredes, este modelo es más no-lineal y por lo tanto su convergencia es más desafiante que en el modelo k- ϵ ; además, es más sensible al valor inicial supuesto para la solución, por tanto, es más robusto. Usualmente da mejores resultados y es más adecuado que el modelo k- ϵ en regiones con recirculación, cerca de paredes sólidas, para flujos internos, flujos con mucha curvatura, separación de flujos y chorros (Frei, 2018).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho K) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho K u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_i}\right) + G_k - Y_k S_k \quad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho K) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho K w_{uj}) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma_w \frac{\partial w}{\partial x_j}\right) + G_w - Y_w + S_w + D_w \quad (10)$$

Donde: G_w y G_k representan la generación de energía cinética turbulenta y la tasa de disipación específica. La difusividad viene dada por Γ_w y Γ_k . La disipación viene dada por Y_w e Y_k . Los términos fuente vienen dados por S_k y S_w . El término de difusión cruzada adicional D_w es la función de combinación para el modelo K- ϵ estándar y el modelo K- ω estándar (Aftad S.M.A et al, 2016).

- **Configuración del modelo computacional (simulaciones).**

En esta primera etapa se definieron los parámetros físicos y matemáticos del caso de estudio, determinado por la geometría del invernadero, el proceso de mallado, los fenómenos físicos que fueron simulados, se determinó el aire como tipo de fluido y sus propiedades, se definieron las condiciones de frontera, que paredes fueron rígidas, el tipo de ventilación el valor de velocidad del viento y los valores de temperatura exterior e interior del invernadero, el tipo de entrada por las laterales o por los ventiladores, fueron determinadas las salidas en este caso las ventanas cenitales o en la forzada el extractor, el valor de la radiación solar que a través del techo lo tomamos como flujo de calor por conducción (tabla 5).

Condiciones de frontera DEL MODELO (NATURAL-FORZADA)	
Factor	Valor
Estado	Estacionario
Flujo	Compresible
Modelo usado	RANS k-wSST
Gravedad	9,81 m/s ²
Velocidad del viento (natural)	6,1 m/s
Velocidad del viento (forzada)	3,840 m/s
Temperatura exterior	22,85°C
Temperatura interior del invernadero	35,85 °C
Radiación solar Promedio	5 kW/m ²

Mensual	
Presión atmosférica	101,15 kPa

TABLA 5. Condiciones de frontera para las simulaciones del invernadero.

Se realizaron un total de 9 simulaciones para el análisis numérico del invernadero baticenital de dos naves en el cual se evaluó la temperatura, velocidad del viento y el comportamiento de la presión así (tabla 6):

	Ventilación Natural			Ventilación forzada	Ventilación combinada
Área de Ventanas	100%	50%	18%	Ventanas cerradas	100%
Invernadero o Vacío	1	1	1	1	
Invernadero o plantas	1	1	1	1	1

TABLA 6. Número de simulaciones del invernadero.

- **Convenciones de simulaciones.**

Para dar una guía para la evaluación de los resultados se utilizaron unas abreviaturas para cada una de las 9 simulaciones tal como lo muestra la tabla 7.

NOMBRE DE LA SIMULACION	ABREVIATURA
Invernadero vacío ventilación natural con área de ventanas a 100%	VNV-100%
Invernadero vacío ventilación natural con área de ventanas a 50%	VNV-50%
Invernadero vacío ventilación natural con área de ventanas a 18%	VNV-18%
Invernadero con plantas ventilación natural con área de ventanas a 100%	VNP-100%
Invernadero con plantas ventilación natural con área de ventanas a 50%	VNP-50%
Invernadero con plantas ventilación natural con área de ventanas a 18%	VNP-18%
Invernadero vacío ventilación forzada	VFV
Invernadero con plantas ventilación forzada	VFP
Invernadero con plantas ventilación combinada (forzada-natural)	VCP

TABLA 7. Abreviaturas de las simulaciones.

RESULTADOS

Los archivos de resultados que se obtienen del solver OpenFoam no se pueden leer directamente con la GUI CFDof por lo cual se deben abrir con un software externo, por esto se usó Paraview. Los resultados mostrados se encuentran focalizados en la evaluación del comportamiento de las

variables climáticas temperatura y velocidad del viento con y sin plantas además del comportamiento de la presión tal como se observa en las imágenes siguientes. (figura 13, 14 y 15).

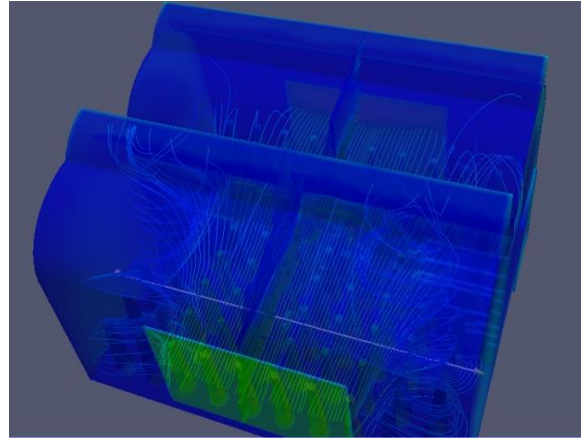
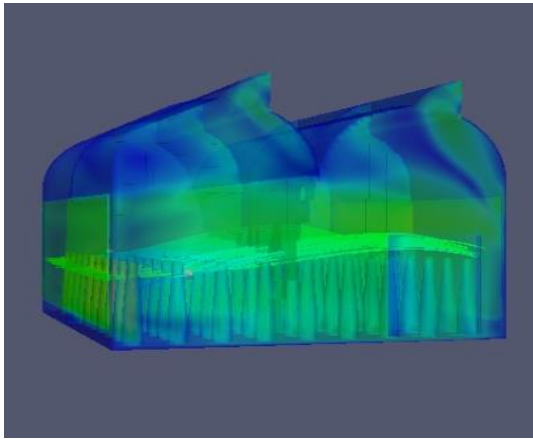


FIGURA 13. Entrada del flujo de aire. **FIGURA 14.** Distribución del flujo en el invernadero.

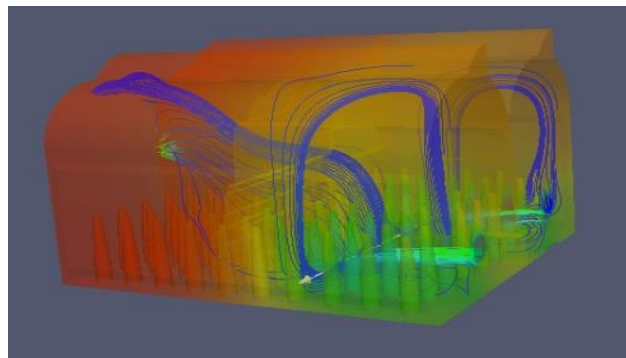


FIGURA 15. Entrada, salida y distribución del flujo y temperatura en ventilación forzada.

Todos los resultados que se mostrarán en las siguientes secciones, se tomaron en tres ubicaciones de referencia, en cada nave se tomaron valores desde la altura del suelo hasta la ventana cenital (Siendo A-A la toma en la nave 1 y C-C la toma en de los datos en la nave 2) y otro en el centro del invernadero de forma vertical (B-B la zona centro del invernadero). En las tres localizaciones se van a medir los tres campos: temperatura, velocidad del viento y presión (figura 16). Las medidas y resultados que se mostraran a continuación todas se realizaron en las mismas tres ubicaciones.

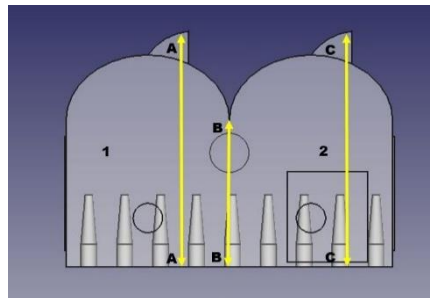


FIGURA 16. Ubicaciones de las posiciones donde se tomaron las medidas.

- **Temperatura.**

En la figura 17 y 18, se puede visualizar la distribución de la temperatura para las nueve simulaciones en los diferentes puntos de referencia situados en las dos naves del invernadero, en primer lugar, el invernadero vacío con tres tipos de área de ventanas con ventilación natural identificadas como (VNV-100%, VNV-50%, VNV-18%).

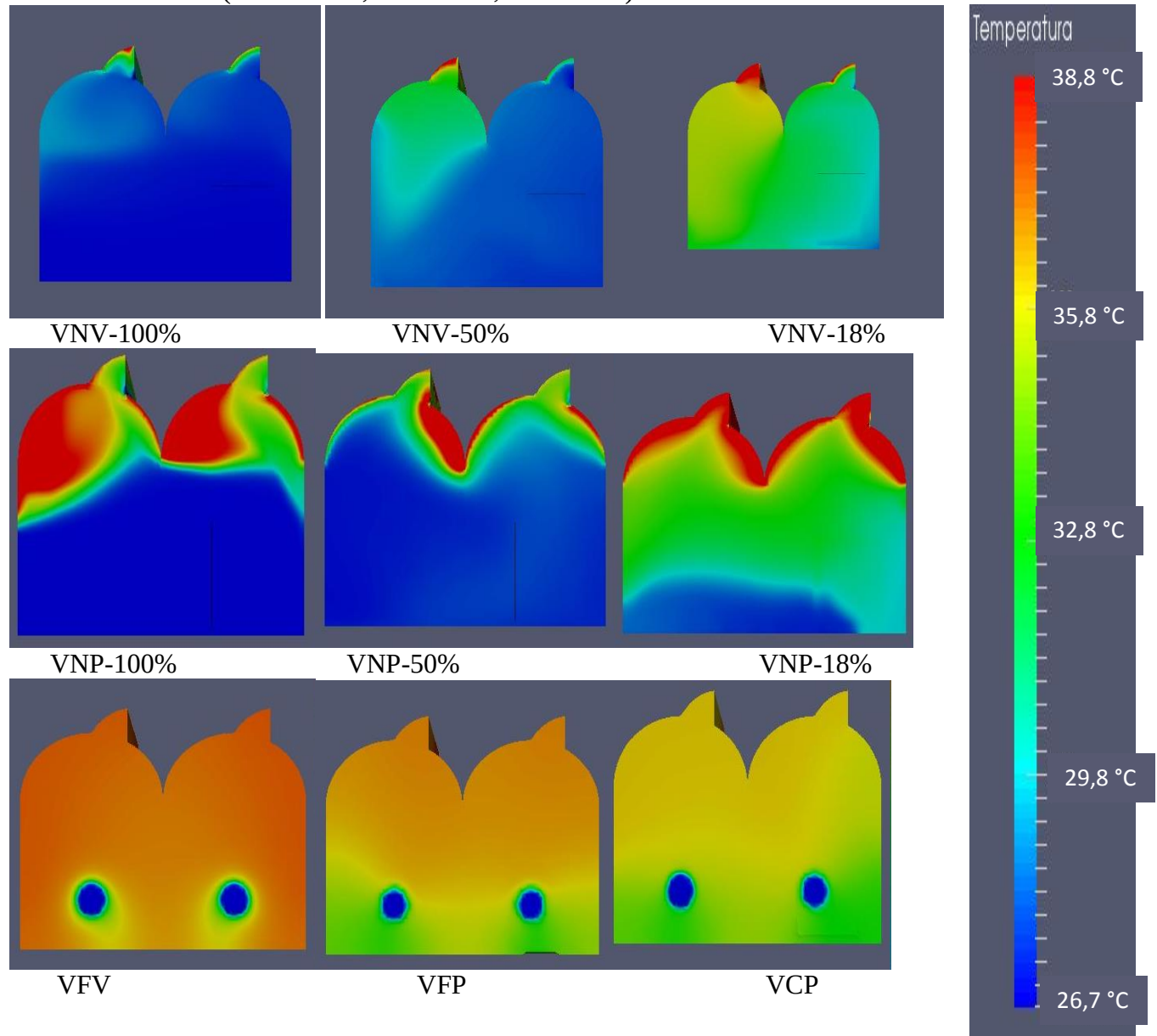


FIGURA 17. Representación de la distribución de la variable temperatura para las nueve simulaciones con su respectiva escala.

Para la simulación VNV-100% se identifica que entre los 1 y 4 metros la temperatura se mantiene constante alrededor de 26.7°C para las tres zonas de medida, temperatura cercana al exterior, mientras que entre los 5 a 7 metros aumenta alrededor de 45°C. Lo anterior es debido a que el aire fresco que entra del exterior al invernadero arrastra el aire caliente hacia la ventana cenital sacándolo del invernadero. Para las simulaciones VNV-50% y VNV-18% los valores para el

campo de temperaturas fueron mayores, encontrándose en el rango entre los 27 y 32°C sobre los 1 y 4 metros, aumentando de igual forma a medida que se acerca a la ventana cenital sobre los 5 y 7 metros, en donde se alcanzó una temperatura de 44°C parte alta sobre zona roja muy pequeña de la cenital, además se observa que en la nave 1 en la VNV-50% una zona de calentamiento sobre el techo del invernadero donde la magnitud del viento no logra refrigerar el aire de esta zona causando remolinos o turbulencia con una temperatura de 31 a 32°C, de igual manera se logra identificar que la simulación donde las temperaturas están en un rango bueno para la producción agrícola fue la VNV-100% donde se realizan mayores renovaciones por minuto de aire dentro del invernadero, seguido de la configuración VNV-50% y por último la VNV-18% en la cual la temperatura se incrementa 2 grados Celsius con referencia a las dos anteriores áreas de ventanas sobre los 2 metros desde el suelo; de igual manera se logra identificar que en las salidas en las ventanas cenitales de la nave 1 del invernadero se logran mayores temperaturas a diferencia de la salida cenital de la nave 2, en la cual las temperaturas de salida son más bajas.

En las simulaciones del invernadero con plantas y ventilación natural en sus tres configuraciones VNP-100%, VNP-50%, VNP-18%. Los resultados encontrados fueron los siguientes, para la VNP-100% se determinó que fue la configuración que mejores resultados mostró en cuanto a un nivel de temperatura ideal para las plantas, manteniendo sobre la zona de plantas una temperatura de 26,85 °C sobre los 1 y 4 metros, aumentando la temperatura sobre las ventanas cenitales saliendo aire caliente del interior sobre los 39°C, para la simulación VNP-50% en los 1 y 2 metros se tienen temperaturas de 26,85°C, aumentando hasta los 47°C saliendo sobre las ventanas cenitales; y en la VNP-18% solo sobre 1 metros se mantuvo una temperatura de 26,85°C, ya que sobre los 2 y 4 metros aumento de 27,85°C a 35°C, además de evidenciar salida de aire caliente sobre las cenitales con temperatura de 47°C. En estas dos últimas simulaciones se aprecia un alza de temperatura debido a que al tener menor área de ventanas las renovaciones de aire por minuto dentro del invernadero son menores que la de VNP-100%, de igual manera sobre la zona de ventanas se mantienen temperaturas aceptables para la implementación del cultivo con oscilaciones de temperatura entre 26,85 y 29°C, pero para dar una mayor seguridad al cultivo, la configuración VNP-100% es la más adecuada, ya que nos proporciona mayor renovación y uniformidad hasta los 4 metros de temperaturas de 26,85°C.

En la evaluación de la ventilación forzada, se realizaron dos simulaciones, una con invernadero vacío y otra con las plantas. En la simulación de ventilación forzada con invernadero vacío (VFF) se identifican temperaturas de 34 a 35°C sobre los 1 y 3 metros y de 36 a 38°C en las ventanas cenitales y extractor de aire del invernadero (salidas del invernadero), se observa que el aire caliente que se encuentra dentro del invernadero se está renovando, tal vez el aire que está entrando no es el suficiente para disminuir la temperatura del interior del invernadero por debajo de los 26°C, se determinó que la longitud del invernadero es muy corta haciendo que el aire caliente no salga todo por el extractor y ventanas cenitales sino que se devuelve por acción de la gravedad al rebotar con la pared provocando temperaturas de 34 y 35°C. Seguidamente se analiza la ventilación forzada con plantas (VFP), se distinguen de manera clara que sobre los 1 y 2 metros, las temperaturas varían de 30 a 31°C siendo algo razonable ya que se presenta sobre la zona en la cual los ventiladores están inyectando el aire del exterior, en los 3 y 7 metros las temperaturas se incrementan en 34 y 36,35°C, infiriendo así, que el aire fresco que entra del exterior al invernadero por los ventiladores arrastra el aire caliente sobre las ventanas cenitales y extractor sacándolo del invernadero, comparándolo con (VFF), se encuentra una menor temperatura sobre 1 y 3 metros

en la VFP, ya que las plantas hacen rozamiento frenando la velocidad del aire haciendo que la temperatura disminuya 4°C en comparación con la VFV.

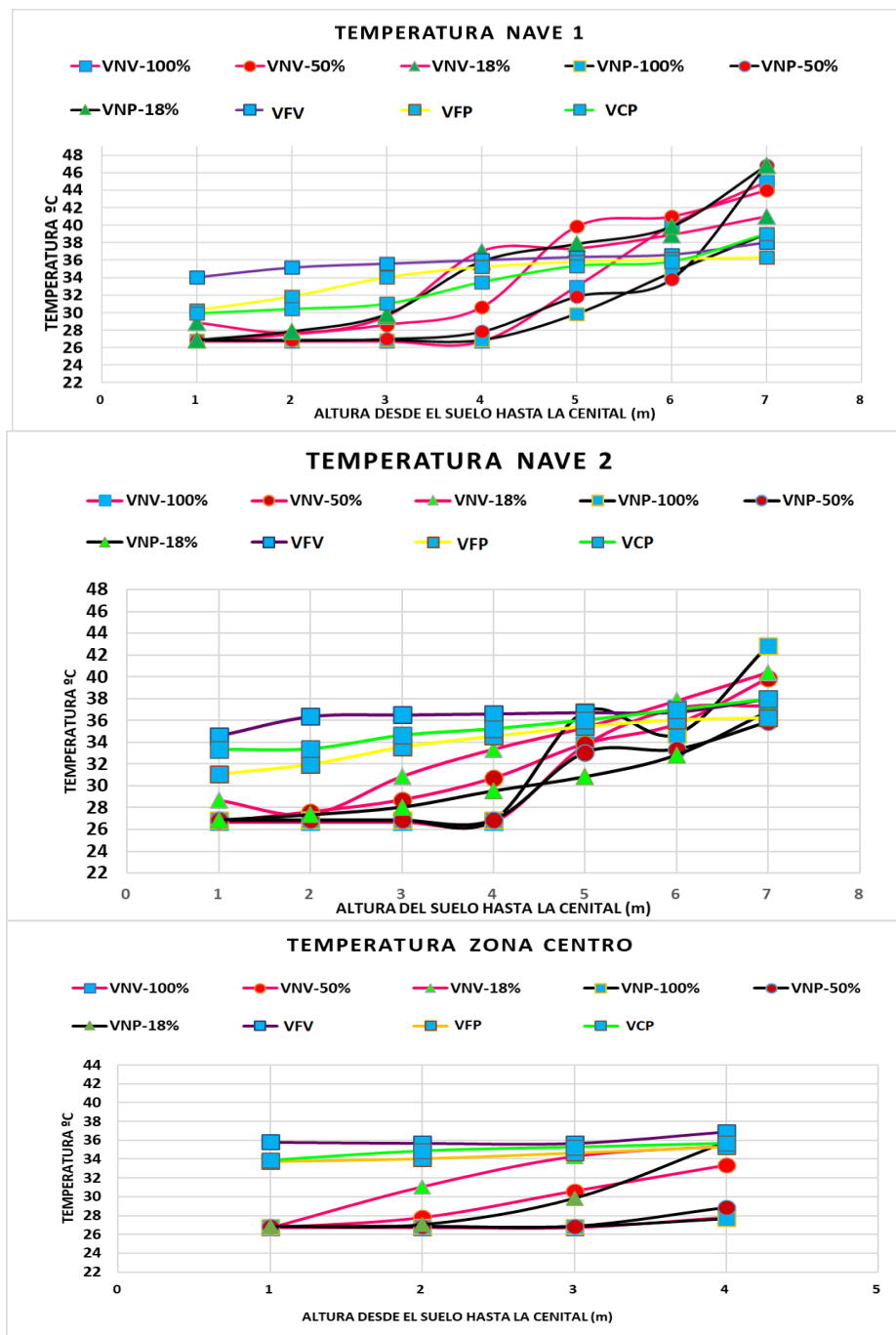


FIGURA 18. Graficas en el cual se muestra el comportamiento de la temperatura para las nueve simulaciones, en cada punto de evaluación de datos.

Por último, la configuración de ventilación forzada-natural (combinada) con plantas (VCP), los resultados fueron similares a los de ventilación forzada con plantas con la variación de

temperaturas entre 29 y 30°C a una altura de 1 a 3 metros desde el suelo. Y entre 3 y 7 metros la temperatura se incrementa de manera que se logra evidenciar que el aire interior del invernadero sale del invernadero por las ventanas cenitales y el extractor con temperaturas entre 33,5 a 39°C.

- **Velocidad del viento.**

En la figura 19 y 20, se aprecia la distribución de la velocidad del viento (m/s) dentro del invernadero en cada una de las configuraciones simuladas, en primera instancia se analizó el invernadero vacío con ventilación natural para los tres niveles de aperturas en las ventanas (VNV-100%, VNV-50%, VNV-18%).

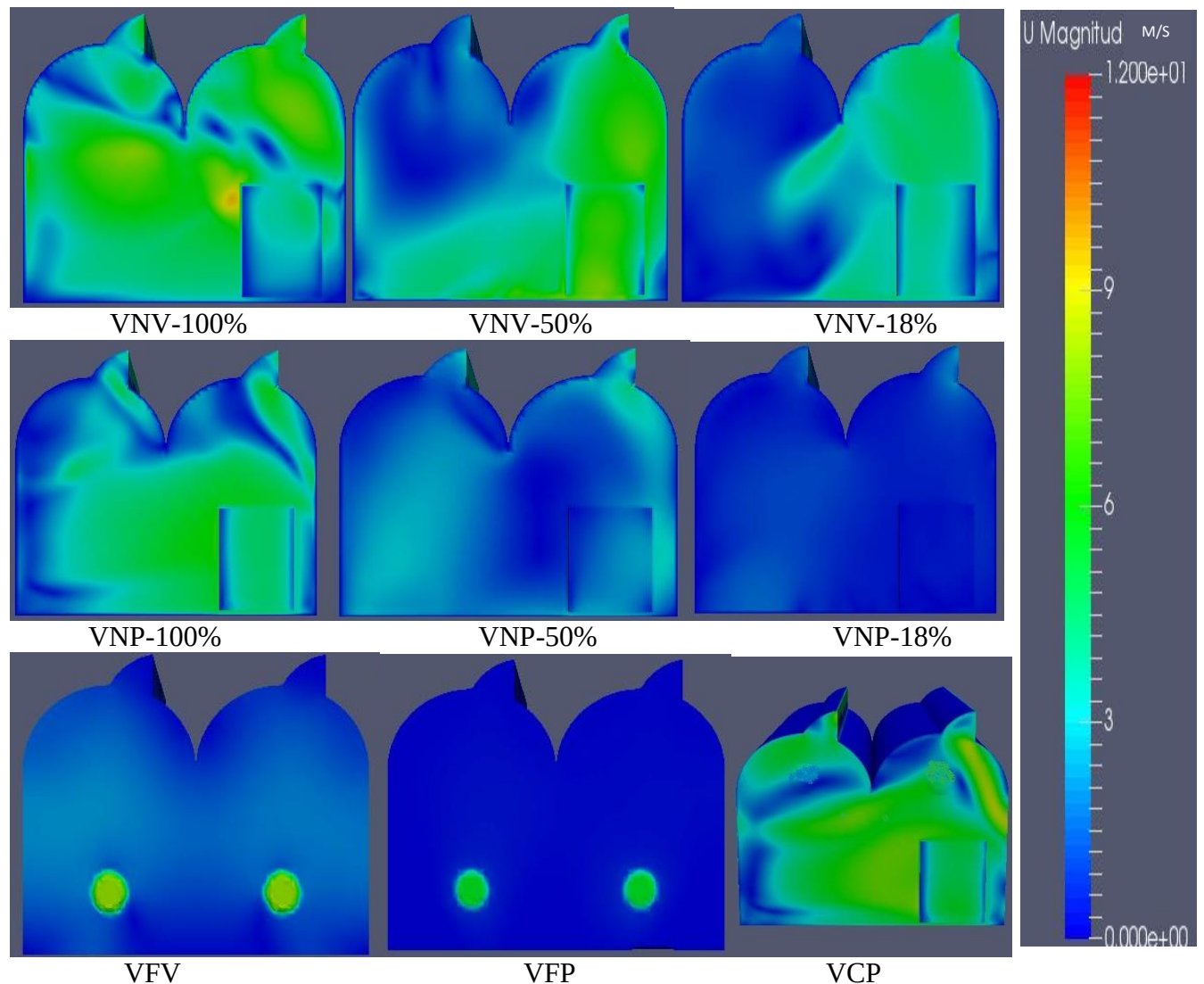


FIGURA 19. Representación de la distribución de la variable velocidad del viento para las nueve simulaciones con su respectiva escala

Al evaluar los resultados de la configuración VNV-100%, se identifica que, a 1 metro de altura para las tres zonas evaluadas, la velocidad del viento es de 4,5 m/s y que para los 2 y 4 metros de altura hay una zona de refrigeración y el aire del exterior extrae las masas de aire caliente del

interior provocando una temperatura cercana a la ambiente donde la velocidad es de aproximadamente 5,5 m/s y va disminuyendo sobre los últimos metros cercanos a la ventana cenital con salida de aire caliente del interior. En la simulación con una apertura de ventana lateral de 50% (VNV-50%), a una altura de 1 metro la velocidad es menor a la encontrada en la VNV-100% con un valor de 3,8 m/s y al igual que en la configuración VNV-100%, se crean zonas donde se mantiene constante las magnitudes del viento refrigerando el interior del invernadero a una altura de 2 y 4 metros, en dicha zona la velocidad del viento es de aproximadamente 4,8 m/s, a una altura entre los 5 y 7 metros se evidencian magnitudes bajas de velocidad en rangos de 0,8 a 0,3 m/s. Finalmente, en la configuración VNV-18% se observa que, a 1 metro de altura la velocidad del viento es de 3,3 m/s y entre el rango de 3 a 7 metros encontramos velocidades bajas de 1,57 a 0,3 m/s. Como era de esperarse la configuración de VNV-100% presenta mayores velocidades del viento, debido a que es la configuración donde mayor apertura de ventanas se tiene y por tanto mayor área, lo que ocasiona que tengamos más renovaciones por minuto de aire dentro del invernadero, seguido por las configuraciones VNV-50% y VNV-18%.

Al evaluar los resultados de las simulaciones para las configuraciones VNP-100%, VNP-50%, VNP-18%, el comportamiento de la velocidad del viento a la altura de 1 metro disminuyo considerablemente, en comparación con los datos obtenidos de la simulaciones anteriores (VNV-100%, VNV-50%, VNV-18%, respectivamente), esto debido a el obstáculo que hacen las plantas cuando el aire entra por la ventana lateral, con valores de 1,3 m/s para la configuración VNP-100%, 1,2 m/s en la configuración VNP-50% y 1 m/s en VNP-18%. La velocidad del viento para una altura entre los 3 y 4 metros del invernadero se incrementa debido a que no hay cultivo, y va disminuyendo hasta la salida por las ventanas cenitales del invernadero. Se infiere que donde se presentó mejor distribución de la velocidad del viento fue en la VNP-100% haciendo que las renovaciones de aire dentro del invernadero se estén cumpliendo por tener la mayor área de ventana lateral; seguido de la VNP-50% y finalmente VNP-18%.

En las simulaciones de ventilación forzada para invernadero vacío (VFF) y con plantas (VFP) se obtuvieron resultados de velocidades del viento bajas en un rango de 0,05 y 1 m/s, para VFF se identifican velocidades mayores con relación al invernadero con plantas (VFP), esto debido a la oposición que presentan las plantas para el flujo del aire, a medida que entra el aire por los ventiladores va disminuyendo en zona cercana a las salidas de las ventanas cenitales y del extractor alcanzando velocidades de 0,05 m/s para VFF y 0,23 m/s en la simulación VFP.

Por último, se obtuvieron los resultados para la ventilación combinada (VCP), donde se esperaba tener velocidades del viento mayores ya que tenían dos entradas de aire, por los ventiladores y por la ventana lateral. En 1 metro de altura del invernadero se presentó el valor de 1,44 m/s y sobre los 3 y 4 metros de altura la velocidad del aire aumento a niveles en el rango de 6,57 y 6 m/s, muy similar a los resultados encontrados en la simulación VNP. En las zonas de extracción de aire caliente del interior del invernadero se tienen velocidades bajas en torno a 2,5 m/s.

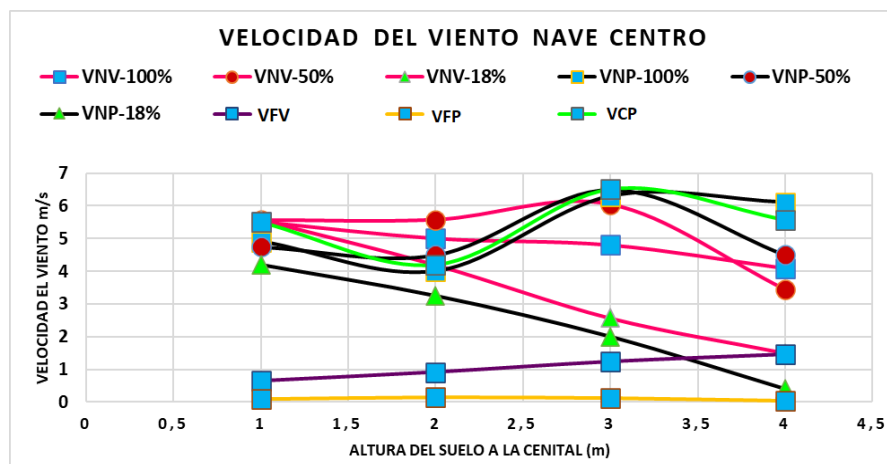
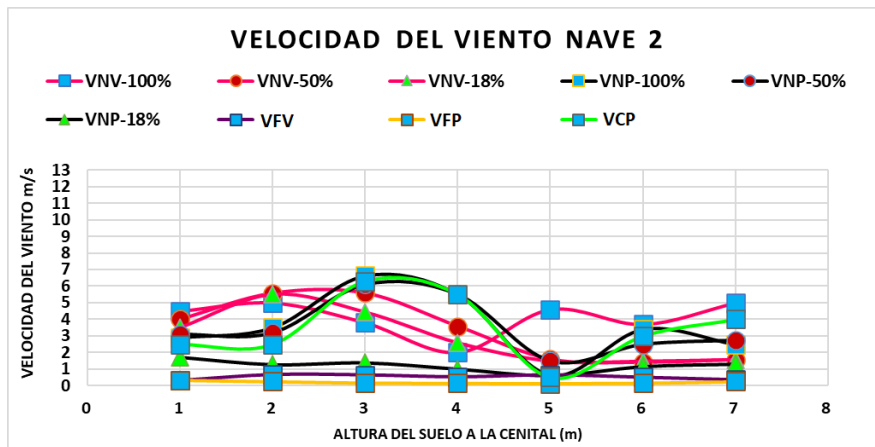
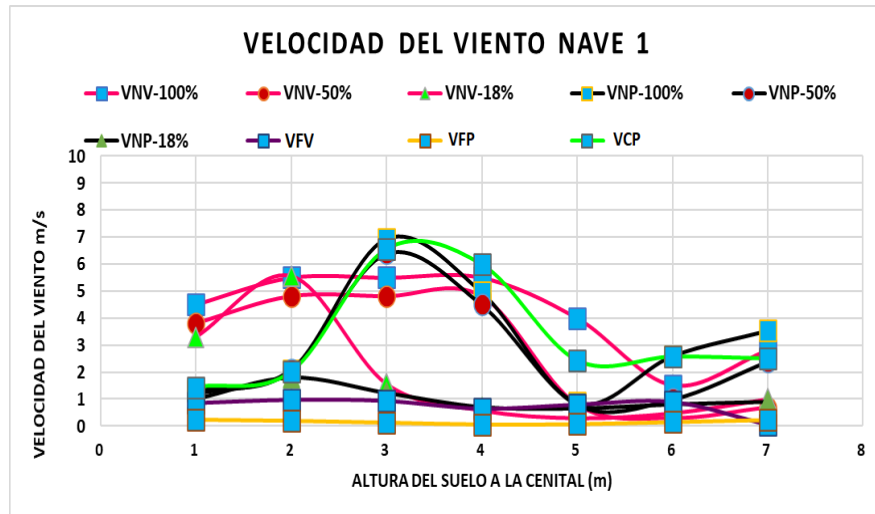


FIGURA 20. Graficas en el cual se muestra el comportamiento de la velocidad del viento para las nueve simulaciones, en cada punto de evaluación de datos.

- **Presión.**

En las figuras 21 y 22 se observa el comportamiento de la distribución de presión dentro del invernadero para las diferentes configuraciones simuladas, esto es, ventilación natural con invernadero vacío: VNV-100%, VNV-50%, VNV-18%, ventilación natural con plantas: VNP-100%, VNP-50%, VNP-18%, ventilación forzada con plantas: VFP y ventilación forzada-natural con plantas (VCP), todas muestran una caída de presión, destacando que el lugar donde se presenta mayor presión es sobre los primeros metros y lugares cercanos a las entradas de flujo de aire del exterior y zona de plantas. Además, los resultados mostraron que, en las ventanas cenitales por donde está saliendo el aire caliente del invernadero se presenta un menor valor de presión.

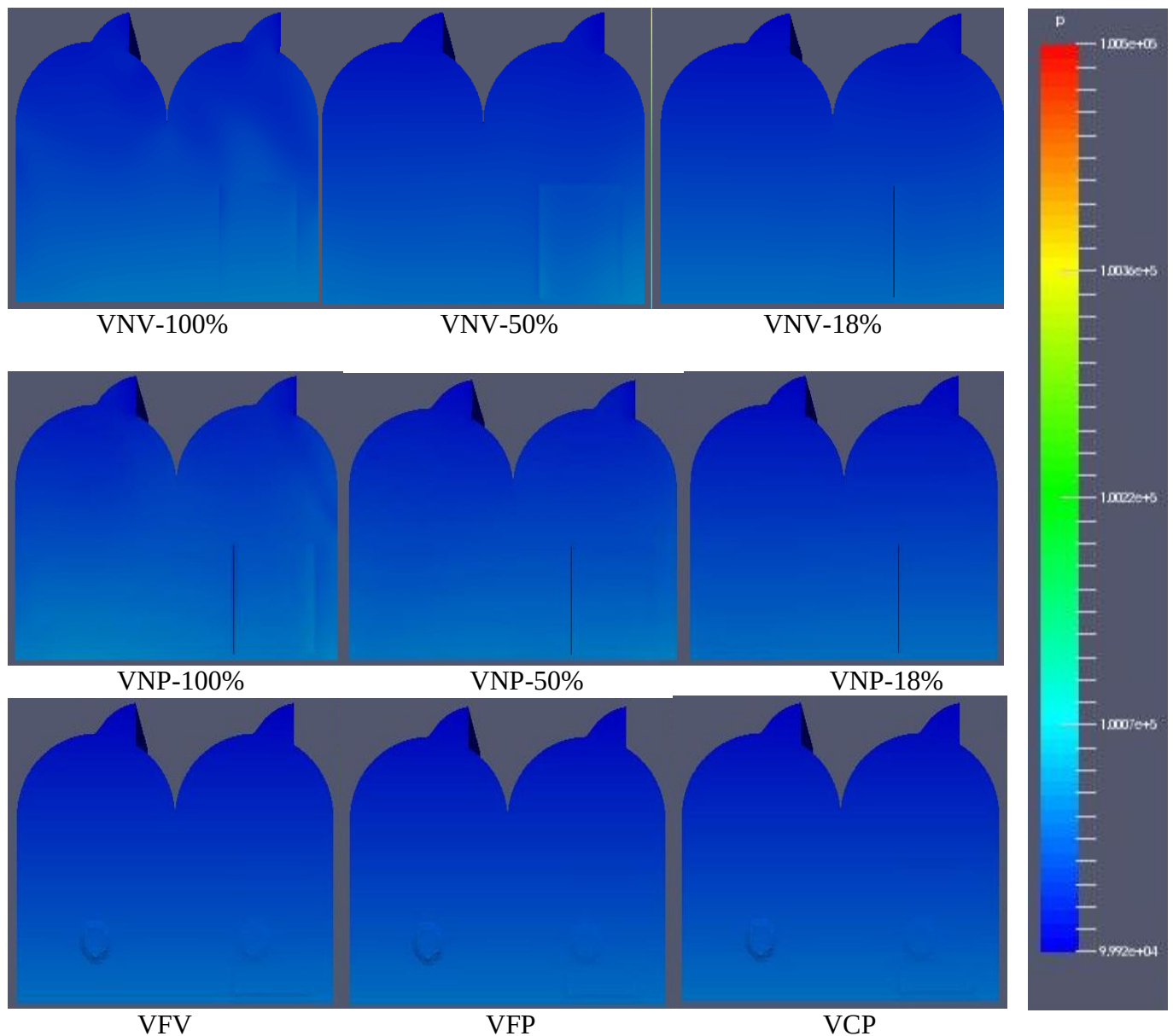


FIGURA 21. Representación de la distribución de la variable presión para las nueve simulaciones con su respectiva escala.

Para la configuración de la simulación VFV se observa que la presión se mantiene mayor y es constante pero también se presenta caídas de presión no tan notorias como en las configuraciones antes descritas. Esto infiere que el aire del exterior que entra al invernadero desplaza el aire caliente del interior del invernadero, haciendo que adentro se mantenga ese confort para un buen desarrollo de las plantas. Es preciso decir que la simulación VFV en la cual presento la menor caída de presión fue la que mayor temperatura dentro del invernadero se observó.

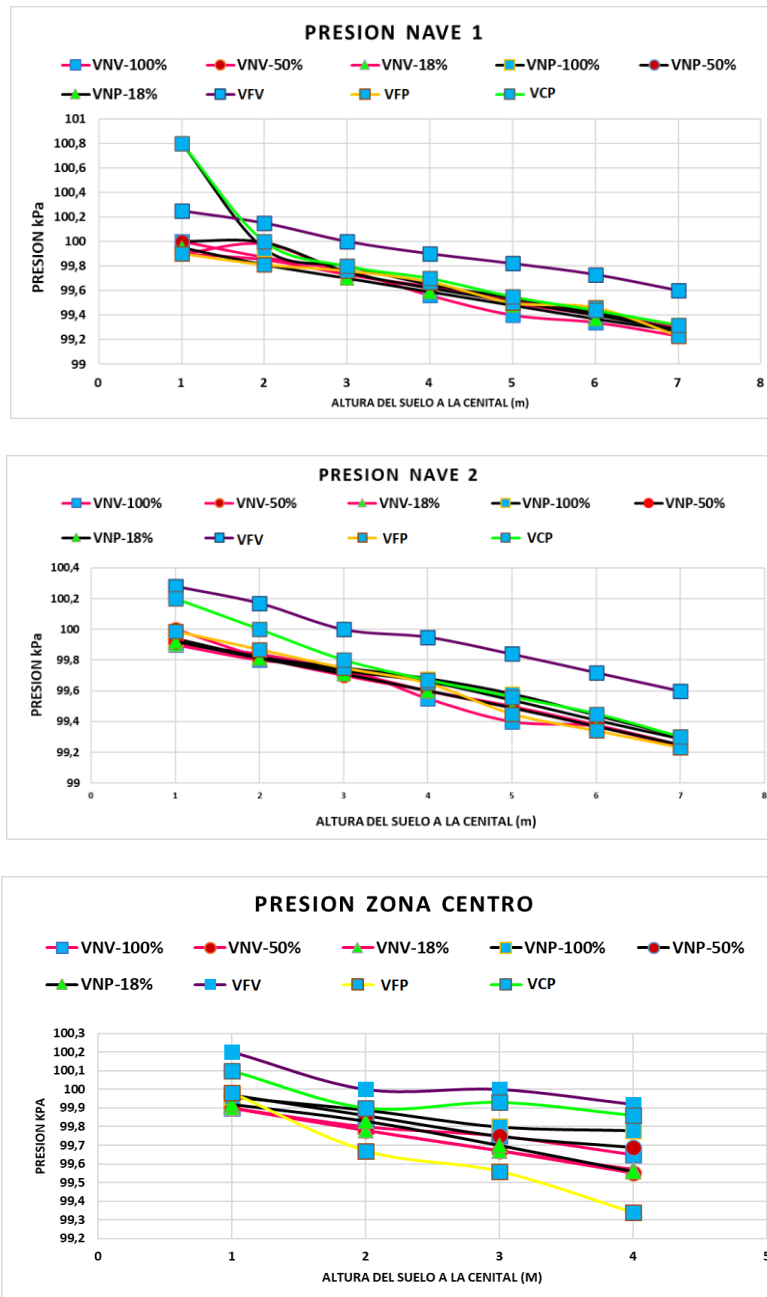


FIGURA 22. Graficas en el cual se muestra el comportamiento de la presión para las nueve simulaciones, en cada punto de evaluación de datos.

DISCUSIÓN

Según Bojacá en 2009, afirma que en los invernaderos colombianos está tomando relevancia que en días calurosos donde se presentan altas radiaciones es necesario evacuar las altas temperaturas producidas en el interior donde se llegan a alcanzar temperaturas cercanas a los 45°C, valores de temperatura que según Sato et al 2000, ocasionan un déficit en el normal desarrollo del cultivo. Por otro lado, según la FAO (1988) citado por Nisen et al 1998, para cultivos bajo invernadero y a campo abierto afirma que existe una temperatura máxima y mínima biológica en las cuales se pueden desarrollar las plantas, el cual para el cultivo del tomate presenta valores de temperatura óptimos entre los 26 y 30°C. De lo anterior, se infiere que para el invernadero batimental de dos naves propuesto para su ejecución en la granja experimental de la Universidad Surcolombiana, donde se alcanzan temperaturas ambientales máximas promedio de 35°C en la zona de ubicación del invernadero, es necesario implementar un sistema de ventilación, ya sea natural o forzada para asistir el cultivo. En este trabajo las simulaciones y los resultados mostraron que, manteniendo una ventilación natural con un 100% y 50% de apertura de ventana (configuración VNP-100% y VNP-50%) se logran alcanzar las temperaturas dentro del rango aceptable para el cultivo del tomate. Igualmente, la configuración de ventilación forzada-Natural (VCP) arrojó que hasta una altura máxima de 2 metros se alcanzan temperaturas cercanas a los 30°C valor que se encuentra en el límite permitido, pero recordemos que las simulaciones siempre asumen las condiciones más desfavorables posibles, por tanto, podemos decir que la configuración VCP es adecuada para la producción de Tomate también. De acuerdo con los resultados obtenidos y en las gráficas de distribución de temperatura en la zona central del invernadero se presentan temperaturas relativamente iguales al ambiente tal como se demuestra en la investigación realizada por Velásquez et al., 2015, donde se analizó el diseño de un sistema de ventilación forzada para un invernadero cenital usando CFD que muestra un comportamiento igual al encontrado en este estudio.

Según los resultados obtenidos por Flores et al, 2014, encontraron una reducción de velocidades del aire debido a la resistencia del cultivo en el proceso de ventilación. Sin embargo, la apertura de ventanas incrementa los flujos de aire en la zona de cultivo entre 1 y 2 metros de altura. En este estudio se encontraron resultados que están en concordancia con los expuestos anteriormente, esto es, para las configuraciones de ventilación natural con diferentes porcentajes de apertura de ventanas y con el invernadero lleno de plantas (VNP-100%, VNP-50% y VNP-18%), se presentaron mayores velocidades para las alturas comprendidas entre 1 y 2 metros al compararlas con los resultados encontrados en las simulaciones de las configuraciones de ventilación natural con diferentes porcentajes de apertura e invernadero vacío (VNV-100%, VNV-50%, VNV-18%), al comparar las magnitudes de la velocidad a las mismas alturas, se nota una disminución de dicha magnitud para las configuraciones VNP en relación a las VNV, esto atribuido principalmente a la resistencia aerodinámica del cultivo. También se comprobó que a medida que tenemos más aperturas de ventanas los niveles de la velocidad del viento aumentan en todas las simulaciones tanto con plantas como sin plantas, verificando lo encontrado en la literatura.

Afirma Baptista et al., 2001, que una de las principales ventajas de la ventilación natural es la reducción de costos de operación de un invernadero, ya que no requiere de una energía artificial para el funcionamiento, se infiere que a partir de esta afirmación y después de los resultados obtenidos en las simulaciones de ventilación natural con plantas (VNP-100%, VNP-50% y VNP-18%) se debe aprovechar la buena magnitud de la velocidad del viento que los datos climáticos

proporcionados por el IDEAM predicen en el lugar donde estará ubicado el invernadero. Según Teitel et al., 1998, un incremento en el área de ventilación genera un efecto positivo en la ventilación general de los invernaderos, por lo que se recomienda instalar mayores áreas de ventilación en invernaderos altos o de gran volumen, ya que son menos susceptibles a cambios bruscos de temperatura. El aumento de las áreas de ventilación toma cada vez más importancia, debido al uso de mallas anti insectos de baja porosidad en las ventanas del invernadero y al comparar los resultados de las simulaciones realizadas con porcentajes de áreas menores (18% y 50%) con las mayores áreas de ventilación (100%) para los casos de ventilación natural se demostró que los valores de magnitud de velocidad, renovación de aire y temperatura dentro del invernadero, es esencial aumentar las áreas de ventilación para mantener el normal desarrollo del cultivo.

En toda la revisión bibliográfica del tema de simulación de invernaderos utilizando la dinámica de fluidos computacional no se encontraron estudios donde se utilice el ecosistema FreeCAD, Openfoam, Paraview, para desarrollar la geometría, el modelo computacional y procesar los resultados. La mayoría de estos estudios usan ecosistemas licenciados que conllevan altos costos como por ejemplo ANSYS, ABAQUS, COSMOS, etc. Una de las principales ventajas encontradas en usar el ecosistema que usamos es que son softwares libres y de código abierto (free and open source) lo que no limita a ninguna persona, grupo de investigación o universidad, en su uso por cuestiones económicas. En contra posición se tiene que, al momento de realizar un modelo bajo este ecosistema se encuentra con pocos recursos en la web que nos permitan solventar problemas o nos guíen a la hora de construir el modelo computacional.

CONCLUSIONES

De acuerdo al análisis numérico del invernadero baticenital de dos naves diseñado para la granja experimental de la Universidad Surcolombiana utilizando la dinámica de fluidos computacional, las condiciones climáticas de la zona de estudio y con las condiciones de contorno del modelo, se determinó que entre mayor sean las ventanas (mayor área) más se reducen los gradientes de temperatura al interior del invernadero, siendo más notorio para el modelo computacional que contempla ventilación natural con plantas. Demostrándose que las simulaciones numéricas mediante CFD, son una herramienta de diseño con gran potencial de uso para sistemas de ventilación con aplicaciones en agricultura protegida. Además, nos permite evaluar mejoras en la ventilación (bienestar de las plantas) para aquellos invernaderos que están en diseño y para los que se encuentran instalados y se pretenda realizar o proponer cambios geométricos. Finalmente, se muestra que, en zonas de climas cálidos, se pueden implementar los invernaderos que buscan aumentar la productividad de los cultivos y así obtener mayores rendimientos para el productor, incluso sin necesitar ventilación forzada.

Los resultados de las simulaciones para la configuración de ventilación natural con plantas y sin plantas (vacío) con aperturas de ventanas al 100% presenta una distribución uniforme de la magnitud de la velocidad en la zona de influencia de las plantas, de tal manera que el calor en dicha zona es removido por la masa de aire fresco que entra por la ventana y desplaza la masa de aire caliente hacia las ventanas cenitales creando un ambiente ideal para el normal desarrollo del cultivo. Se puede evidenciar a través de los resultados que, en la configuración con ventilación forzada con plantas, donde se cierran las ventanas laterales y solo se ventila con los ventiladores

frontales y el extractor posterior, se presentan temperaturas cercanas a los 30°C, en la zona de influencia de las plantas, esto es, entre 1 y 2 metros de altura. Esto indica que, no es suficiente solo con la ventilación forzada diseñada, lo cual refleja que las capacidades de los ventiladores (caudal = velocidad x Área) es insuficiente para extraer el calor en dicha zona, por tal razón la temperatura aumenta dentro del invernadero.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda validar el modelo numérico realizado en este proyecto de grado, una vez se construya el invernadero, esto es, medir temperaturas y velocidades en las secciones indicadas en el modelo y comparar directamente.
- Probar otros modelos de turbulencia diferentes al k- ω SST, por ejemplo, k- ϵ y comparar los resultados obtenidos.
- Evaluar el tipo de material usado en la cubierta del invernadero, y buscar una mejoría en las condiciones para el cultivo. Es decir, evaluar el microclima que se genera en el interior.
- Para futuros modelos computacionales con el invernadero a desarrollarse en la granja de la Universidad Surcolombiana se pueden emplear modificaciones en las geometrías de las ventanas cenitales y probar el comportamiento de las variables climáticas dentro del invernadero.
- Se recomienda para un futuro trabajo tener en cuenta la densidad de siembra del cultivo de tomate bajo invernadero que oscila entre los 2,2 y 2,5 plantas/m², así mismo tener equipos con mejor capacidad computacional para tener resultados más precisos a la realidad.

REFERENCIAS

Rodríguez, CEA, & Velázquez, JF (2019). Simulación CFD de transferencia de calor y masa para control climático en invernaderos. En Transferencia de calor y masa: avances en aplicaciones científicas y tecnológicas. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.86322>

Díaz, DC, Bojacá, CR y Schrevens, E. (2016, noviembre). Modelado de la idoneidad del invernadero de plástico tradicional para la producción de tomate en las regiones de Colombia. En Simposios internacionales sobre horticultura tropical y templada-ISTTH2016 1205 (págs. 857-864). <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2018.1205.109>

Bournet, PE (2013, octubre). Evaluación del clima del invernadero usando CFD: un enfoque en los problemas de humedad del aire. En Simposio Internacional sobre Nuevas Tecnologías para el Control Ambiental, Ahorro de Energía y Producción de Cultivos en Invernadero y Planta 1037 (pp. 971-985). <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2014.1037.129>

Ali, HM, Moustafa, S. y El-Mansy, H. (1990). Un diseño de invernadero eficiente para climas cálidos. Conversión y gestión de energía, 30 (4), 433-437. [https://doi.org/10.1016/0196-8904\(90\)90044-Y](https://doi.org/10.1016/0196-8904(90)90044-Y)

Senhaji, A., Mouqallid, M. y Majdoubi, H. (2019). Estudio asistido por CFD del efecto de las aberturas de ventilación de invernaderos de múltiples capillas en la circulación del flujo de aire interior y los patrones de microclima. Revista abierta de dinámica de fluidos, 9 (2), 119-139. <https://doi.org/10.4236/ojfd.2019.92009>

Villagrán, EA, Romero, EJB y Bojacá, CR (2019). Análisis CFD transitorio de la ventilación natural de tres tipos de invernaderos utilizados para la producción agrícola en un clima tropical de montaña. Ingeniería de Biosistemas, 188, 288-304. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.10.026>

Villagrán Munar, E. A., Jaramillo Noreña, J. E., Rodríguez Roa, O. A., León Pacheco, R. I. & Yacomelo Hernández, M. J. (2021). Invernadero bioclimático y modular para clima cálido: diseño, construcción, operación y mantenimiento. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria -agrosavia; Fontagro. <https://doi.org/10.21930/agrosavia.manual.7404890>

Villagrán M., E.A., Bojacá, C.R. (2017). Simulación con base en la técnica dinámica de fluidos computacional (CFD), para el Diseño y optimización de la ventilación natural en los invernaderos de flores de corte en la sabana de Bogotá. Centro de Innovación de la Floricultura Colombiana (Ceniflores) ISBN: 978-958-98993-6-6

Flores-Velázquez, J., & Villarreal-Guerrero, F. (2015). Diseño de un sistema de ventilación forzada para un invernadero cenital usando CFD. Revista mexicana de ciencias agrícolas, 6(2), 303-316.

Rojano, F., Flores-Velázquez, J., Villarreal-Guerrero, F., & Rojano, A. (2013, octubre). Dinámica de las condiciones climáticas en un invernadero: dos localidades de México. En Simposio Internacional sobre Nuevas Tecnologías para el Control Ambiental, Ahorro de Energía y Producción de Cultivos en Invernadero y Planta 1037 (pp. 955-962). <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2014.1037.127>

Hong, SW, Lee, IB, Hwang, HS, Seo, IH, Bitog, JP, Yoo, JI, Kim, KS, Lee, SH, Kim, KW y Yoon, NK (2008) Simulación numérica de eficiencias de ventilación de ventilación natural Invernaderos de varios tramos en Corea. Transacciones de la ASABE, 51, 1417-1432. <https://doi.org/10.13031/2013.25235>

Bournet, PE, OuldKhaoua, SA y Boulard, T. (2007) Predicción numérica del efecto de los arreglos de ventilación en la ventilación y la transferencia de energía en una casa de vidrio de varios vanos utilizando un modelo de radiación banda. Ingeniería de Biosistemas, 98, 224-234. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2007.06.007>

Rodríguez, CEA, & Velázquez, JF (2019). Simulación CFD de transferencia de calor y masa para control climático en invernaderos. En Transferencia de calor y masa: avances en aplicaciones científicas y tecnológicas. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.86322>

ASOJUNCAL. (s.f). Portal oficial de la Asociacion de Usuarios del Distrito de Riego y Adecuación de Tierras a Mediana Escala El Juncal, Palermo-Huila. <http://asojuncal.blogspot.com/2009/07/ubicacion.html>

IDEAM. (s.f). Consulta y Descarga de Datos Hidrometeorológicos. <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>

FreeCAD. (s.f). FreeCAD modelador paramétrico 3D. <https://www.freecadweb.org/>

Frei, W. (2018). Which Turbulence Model Should I Choose for My CFD Application? 2017. URL. <https://www.comsol.com/blogs/which-turbulence-model-should-choose-cfd-application/>

Flores-Velázquez, J., López-Cruz, I. L., Mejía-Sáenz, E., & Montero-Camacho, J. I. (2014). Evaluación del desempeño climático de un invernadero Batocenital del centro de México mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD). *Agrociencia*, 48(2), 131-146.

Villagrán Munar, E. A. (2016). Diseño y evaluación climática de un invernadero para condiciones de clima intertropical de montaña. *Ingeniería Agrícola*.

Villagrán Munar, .E.A., Bojacá C.R. (2017). Simulación con base en la técnica Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), para el diseño y optimización de la ventilación natural de los invernaderos de flores de corte en la Sabana de Bogotá. P, 39-40.

Aftab, S. M. A., Mohd Rafie, A. S., Razak, N. A., & Ahmad, K. A. (2016). Turbulence model selection for low Reynolds number flows. *PloS one*, 11(4), e0153755 <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0153755>

Montero Camacho, J. I., Antón Vallejo, M. A., & Muñoz Odina, P. (2002). Refrigeración de invernaderos I: Ventilación natural.

Montero J. I., Muñoz P., Sánchez-Guerrero M. C., Medrano E., Piscia D., & Lorenzo P. (2013). Pantallas sombreadoras para la mejora del clima nocturno de invernaderos sin calefacción. *Revista Española de Investigación Agraria*, 11 (1), 32-46. <https://doi.org/10.5424/sjar/2013111-411-11>

Flores-Velázquez, J., López-Cruz, I. L., Mejía-Sáenz, E., & Montero-Camacho, J. I. (2014). Evaluación del desempeño climático de un invernadero Batocenital del centro de México mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD). *Agrociencia*, 48(2), 131-146.

Bojacá Aldana, CR (2009). Enfoques genéricos de modelado para la evaluación técnica de la sostenibilidad a nivel de campo para sistemas agrícolas en los trópicos altoandinos.

Sato, S., Peet, MM y Thomas, JF (2000). Los factores fisiológicos limitan el cuajado del tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) bajo estrés por calor crónico y leve. *Planta, célula y medio ambiente*, 23 (7), 719-726. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2000.00589.x>

Teitel, M., & Shklyar, A. (1998). Pressure drop across insect-proof screens. *Transactions of the ASAE*, 41(6), 1829.

Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. Groupe des cultures horticoles. (1988). Cultures protegées en climat méditerranéen. FAO (Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture).

Briceño. (sf). Control de clima: herramienta en el manejo de invernaderos para producción de flores de corte. Grupo de Investigación-Universidad Nacional de Colombia. [https://www.metroflorcolombia.com/rev/art/HERRAMIENTA%20EN%20EL%20MANEJO%20DE%20INVERNADEROS%20PARA%20\(INVERCA\).pdf](https://www.metroflorcolombia.com/rev/art/HERRAMIENTA%20EN%20EL%20MANEJO%20DE%20INVERNADEROS%20PARA%20(INVERCA).pdf). Recuperado el 20 de octubre del 2022.

Barraza, F. V., Fischer, G., & Cardona, C. E. (2004). Estudio del proceso de crecimiento del cultivo del tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) en el Valle del Sinú medio, Colombia. *Agronomía Colombiana*, 22(1), 81-90.

Fornaris, G. J. (2007). Características de la planta. Conjunto Tecnológico para la producción de tomate: Tipo *Lycopersicon esculentum* Mill.

Granell Ruiz, R. (2014). Análisis del flujo ambiental y propuesta metodológica para simulaciones CFD aplicadas a la ventilación natural de invernaderos (Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València). <https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/37194>

Villagrán-Munar, E. A., & Bojacá-Aldana, C. R. (2019). Simulación del microclima en un invernadero usado para la producción de rosas bajo condiciones de clima intertropical. *Chilean journal of agricultural & animal sciences*, 35(2), 137-150. <https://doi.org/10.4067/s0719-38902019005000308>

Prado Hernández, J. V., Rojano Aguilar, A., León Mojarro, B. D., Carrillo García, M., Ibáñez Castillo, L., Ángeles Montiel, V., López Cruz, I. (2013). Simulación del movimiento del aire en un invernadero tipo venlo. *Terra Latinoamericana*, 31(4), 325-337.

Baeza, E., Montero, J. I., Pérez-Parra, J., Bailey, B. J., López, J. C., & Gázquez, J. C. (2014). Avances en el estudio de la ventilación natural. *Documentos Técnicos*, (7) (págs. 8-9).

Kriuchkova, E. R., Canteñs, G. D. J. L., & Rodríguez, E. F. DESARROLLOS DE INGENIERÍA AGRÍCOLA EN AMÉRICA LATINA. (págs. 91-92).

Contreras M., E. y Sánchez del C., F. 2012. Enfriamiento de invernaderos. VII curso de especialización y 1er diplomado en horticultura protegida. Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco de Mora, México.

Baptista, FJ, Bailey, BJ y Meneses, JF (2001). Ventilación natural de invernaderos. Comparación de tasas de ventilación medidas y predichas.

Allen, G. R., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (2006). Estudio FAO Riego y drenaje 56. Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Serie Cuadernos Técnicos. Roma, Italia. FAO. (Página 21).

Bogotá C.D.C.(2015) Manual de Tomate p 19-21.

Fuentes Freixanet, V. A., & Rodríguez Viqueira, M. (2004). Ventilación natural: cálculos básicos para arquitectura. Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, Rectoría de Unidad, Coordinación de Extensión Universitaria. (Pag 68)

Pérez Grajales, M., & Castro Brindis, R. (2011). Jitomate en invernadero, Universidad Autónoma Chapingo. (Pag 102-103).