



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

**POSGRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y
USO INTEGRAL DEL AGUA**

**MONITOREO 3D Y ANÁLISIS CFD DEL
AMBIENTE DE UN INVERNADERO CON
VENTILACIÓN NATURAL**

TESIS

**Que como requisito parcial para obtener el grado
de:**

**MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO
INTEGRAL DEL AGUA**



PRESENTA:

DIRECCIÓN GENERAL ACADÉMICA
DIRECCIÓN DE SERVICIOS ESCOLARES
COMITÉ DE EXÁMENES PROFESIONALES

JOSÉ EDUARDO ROSALES VICELIS

Bajo la supervisión de:

Dr. EFRÉN FITZ RODRÍGUEZ

Chapingo, Estado de México, enero de 2019

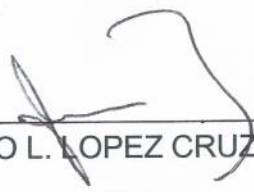


**MONITOREO 3D Y ANÁLISIS CFD DEL AMBIENTE DE UN INVERNADERO
CON VENTILACIÓN NATURAL**

Tesis realizada por **JOSE EDUARDO ROSALES VICELIS** bajo la supervisión del
Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial
para obtener el grado de:

MAESTRO EN INGENIERIA AGRICOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

DIRECTOR: 
Dr. EFRÉN FITZ RODRÍGUEZ

ASESOR: 
Dr. IRINEO L. LOPEZ CRUZ

ASESOR: 
Dr. JOSÉ ARMANDO RAMÍREZ ÁRIAS

DEDICATORIA

A **mi madre**, María Natalia, por todo su apoyo y sus sacrificios que realizó para hacer posible mi formación académica.

A **mi hermano**, Erick Jonathan, por ser mi mejor amigo y cómplice de este gran éxito.

A **la pareja de mi madre y gran amigo mío** Jorge, por todo el apoyo incondicional hacía mi familia y hacia mí.

A **mi novia**, Deyanira, por estar conmigo en todo momento, por motivarme, por ayudarme y por ser parte de este gran logro.

A **mis grandes amigos**, acompañarme en este camino de éxito y nunca dejar de creer en mí.

A **mis tíos y primos**, por su importante apoyo en todo momento.

A **mis padrinos**, Juana y Arnulfo, por motivarme y aconsejarme.

AGRADECIMIENTOS

A mi querida alma mater la Universidad Autónoma Chapingo y al Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua.

Al Dr. Efrén Fitz Rodríguez, por permitirme ser parte del equipo de trabajo del Laboratorio de Biosistemas y por incluirme en su proyecto de desarrollo de Invernaderos Sustentables para México. Por su valioso apoyo, asesoría, tiempo y conocimientos brindados para hacer posible este trabajo de tesis.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por su apoyo de beca para la realización de mis estudios de maestría.

A la Dirección General de Investigación y Posgrado de la UACH, por el financiamiento otorgado bajo la modalidad de Proyecto Convencional (#18175-C65) y Proyecto Estratégico Institucional (#18013-EI).

Con admiración y respeto a los profesores:

Dr. Irineo L. López Cruz, Dr. Armando Ramírez Arias

Al M.I. Orbelin Gutiérrez Hernández por su apoyo en la construcción de la red de sensores inalámbricos.

DATOS BIOGRÁFICOS DEL AUTOR

José Eduardo Rosales Vicelis nace el 13 de abril de 1994, en la Ciudad de México. Realizó sus estudios de primaria en la escuela Arturo J. Fuentes en San Pedro Hueyitentan, Cuautempan, Puebla. Los estudios de secundaria los realizó en la Secundaria Técnica N° 28 en Tetela de Ocampo, Puebla.

En 2009 realizó estudios de Preparatoria Agrícola en la Universidad Autónoma Chapingo. Posteriormente, en 2012 ingresa a la carrera de Ingeniería Mecánica Agrícola, en la misma institución. En 2013 libera su servicio militar, quedando registrado su liberación bajo la matrícula D-3927473. En el 2016 concluye los estudios de licenciatura, con el trabajo de investigación titulado *“Desarrollo de un sistema de monitoreo déficit de presión de vapor en cultivos de invernadero”*, graduándose con Mención Honorífica, finalizando esta etapa académica con el trámite de su cedula profesional 10879997. En el mismo año inicia estudios de Maestría en el Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, en la línea de investigación de Biosistemas, desarrollando el tema de investigación “Monitoreo 3D y análisis CFD de un invernadero con ventilación natural.

INDICE GENERAL

INDICE GENERAL.....	iv
INDICE DE FIGURAS	vi
INDICE DE CUADROS	ix
NOMENCLATURA	x
RESUMEN GENERAL	xii
ABSTRACT	xiii
1. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1. Objetivo General.....	3
1.2. Objetivos específicos.....	3
1.3. Estructura de la tesis	4
1.4. Literatura citada.....	4
2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	7
2.1. Red de sensores inalámbricos en invernaderos.....	7
2.2. Ventilación natural en invernaderos	18
2.3. Literatura Citada	27
3. RED DE SENSORES DISTRIBUIDOS PARA EL ANALISIS ESPACIAL DEL AMBIENTE DE UN INVERNADERO CON VENTILACIÓN NATURAL.	36
Resumen.....	36
3.1 Introducción	37
3.2. Materiales y Métodos	38
3.3. Resultados y Discusión	50
3.4. Conclusiones	61

3.5.	Literatura citada.....	62
4.	ANALISIS CFD DEL AMBIENTE DE UN INVERNADERO CON VENTILACION NATURAL UBICADO EN LA ZONA CENTRO DE MÉXICO	63
	Resumen.....	63
	Palabras clave	63
4.1	Introducción	64
4.2.	Materiales y Métodos	65
4.3.	Resultados y Discusión	75
4.4.	Conclusiones.....	89
4.5.	Literatura citada.....	91

INDICE DE FIGURAS

CAPITULO 3

Figura 3.1. Estructura y localización del sistema de monitoreo inalámbrica	38
Figura 3.2 Módulos componentes de los nodos de la WSN: a) Nodos Sensores; b) Nodo Receptor	39
Figura 3.3 Componentes esenciales del módulo de energía del nodo sensor	42
Figura 3.4. Nodo sensor de la red inalámbrica para monitoreo del clima de un invernadero	44
Figura 3.5 Comunicación inalámbrica entre los módulos de comunicación de los nodos que constituyen la WSN	45
Figura 3.6 Diagrama de flujo del funcionamiento del nodo receptor	46
Figura 3.7 Diagrama de flujo del funcionamiento del nodo sensor	46
Figura 3.8 Sensor alámbrico protegido e instalado en el invernadero	47
Figura 3.9 Ubicación de la WSN y Red de Sensores Alámbricos en el invernadero.	49
Figura 3.10 Configuraciones de ventilaciones para la evaluación del sistema de monitoreo.	49
Figura 3.11. Mediciones de la WSN para apertura Le50-Lo50-Ce0-Co0	51
Figura 3.12. Mediciones de la red alámbrica para la apertura Le50-Lo50-Ce0-Co0	51
Figura 3.13. Representación 3D e interpolación lineal de datos de mediciones para la apertura Le50-Lo50-Ce0-Co0 en diferentes tiempos: a) 10:25; b) 10:28; c) 10:31; 10:37.	52
Figura 3.14 Mediciones de la WSN para la apertura Le50-Lo50-Ce0-Co100	53
Figura 3.15 Mediciones de la red alámbrica para la apertura Le50-Co50-Ce0-Co100	53

Figura 3.16. Representación 3D e interpolación lineal de datos de mediciones para la apertura Le50-Lo50-Ce0-Co100 en diferentes tiempos: a) 10:16; b) 10:19; c) 10:22; 10:28.	54
Figura 3.17 Mediciones de la red WSN para la apertura Le25-Lo25-Ce0-Co50 ...	55
Figura 3.18. Mediciones de la red alámbrica para la apertura Le25-Lo25-Ce0-Co50	55
Figura 3.19 Representación 3D e interpolación lineal de datos de mediciones para la apertura Le25-Lo25-Ce0-Co50 en diferentes tiempos: a) 11:23; b) 11:26; c) 11:29; 11:35.	56
Figura 3.20 Mediciones de la red WSN para la apertura Ce25-Co0-Ce0-Co25....	57
Figura 3.21 Mediciones de la red alámbrica para la apertura Le25-Le0-Ce0-Co25	57
Figura 3.22. Representación 3D e interpolación lineal de datos de mediciones para la apertura Le25-Lo0-Ce0-Co50 en diferentes tiempos: a) 8:57; b) 9:00; c) 9:03; 9:09.	58
Figura 3.23. Mediciones de la red WSN para la apertura Le12.5-Lo12.5-Ce0-Co25	59
Figura 3.24 Mediciones de la red alámbrica para la apertura Le12.5-Lo12.5-Ce0-Co25	59
Figura 3.25 Representación 3D e interpolación lineal de datos de mediciones para la apertura Le12.5-Lo12.5-Ce0-Co25 en diferentes tiempos: a) 11:11; b) 11:14; c) 11:17; 11:23.	60
Figura 4.1. Dimensiones del invernadero experimental; (b) ubicación de sensores	66
Figura 4.2 Configuraciones de ventilación para simulaciones transitorias: (a). ST1 (b). ST2; (c). ST3.	68
Figura 4.3 Configuraciones de ventilación para simulaciones estacionarias: a) SE1; b) SE2; c) SE3; d) SE4; e) SE5; f) SE6; g) SE7; h) SE8.....	68
Figura 4.4 Geometría del dominio e invernadero y sus dimensiones.....	71
Figura 4.5 Mallado de las ventilas, invernadero y dominio computacional.....	72

Figura 4.6 Evaluación de la calidad del mallado a partir de los tamaños seleccionados	72
Figura 4.7 Perfiles transversales y longitudinal de temperatura del aire y de velocidad y dirección del viento para las configuraciones: a) Le75-Lo0-Ce0-Co0; b) Le50-Lo0-Ce0-Co0	76
Figura 4.8. Perfiles transversales y longitudinal de temperatura del aire y de velocidad y dirección del viento para las configuraciones: c) Le0-Lo25-Ce25-Co0; d) Le12.5-Lo12.5-Ce25-Co0	78
Figura 4.9 Perfiles transversales y longitudinal de temperatura del aire y de velocidad y dirección del viento para las simulaciones: e) Le25-Lo25-Ce50-Co0; f) Le50-Lo50-Ce100-Co0	80
Figura 4.10. Perfiles transversales y longitudinal de temperatura del aire y de velocidad y dirección del viento para las configuraciones: g) SE7 (Le50-Lo50-Ce50-Co50; h) SE8 (Le50-Lo50-Ce0-Co0).....	81
Figura 4.11 Evaluación de los modelos CFD, en estado estacionario, para cada configuración de ventilación.	82
Figura 4.12. Comportamiento de la temperatura del aire de los modelos CFD, en estado transitorio, para cada configuración de ventilación.....	86
Figura 4.13. Perfiles transversales centrales de temperatura del aire para los diferentes escenarios de velocidad y dirección del viento.....	88

INDICE DE CUADROS

Cuadro 2.1. Bluetooth en WSN aplicadas en invernaderos.	11
Cuadro 2.2. Tecnologías GSM aplicadas en invernaderos	13
Cuadro 2.3 WIFI en WSN aplicadas agricultura	15
Cuadro 2.4. Zigbee en WSN aplicadas en invernaderos	16
Cuadro 2.5 Investigaciones sobre el análisis de ventilación natural en invernaderos, mediante CFD	25
Cuadro 3.1 Consumo de corriente y voltaje de los principales módulos que constituyen el nodo sensor	41
Cuadro 3.2 Coordenadas de la ubicación de sensores en el invernadero	48
Cuadro 3.3. Nomenclatura de las configuraciones de ventilación.....	50
Cuadro 4.1 Configuraciones de ventilación utilizadas según el tipo de modelación	67
Cuadro 4.2 Propiedades termo-físicas de los materiales utilizados en la simulación	70
Cuadro 4.3 Evaluación del tamaño de los elementos para mallado del modelo ...	71
Cuadro 4.4 Condiciones de frontera del modelo	73
Cuadro 4.5 Variables de entrada para las simulaciones estacionarias.	73
Cuadro 4.6 Variables de entrada para las simulaciones transitorias.....	74
Cuadro 4.7 Evaluación de los modelos CFD, en estado estacionario, para cada configuración de ventilación.	84
Cuadro 4.8. Evaluación de los modelos CFD, en estado transitorio, para cada configuración de ventilación.	85
Cuadro 4.9. Resultados del efecto de la velocidad y dirección del viento.	87

NOMENCLATURA

A_r	Área de apertura de las ventanas cenitales m^2
A_s	Área de apertura de las ventanas laterales m^2
A_T	Área total de apertura de las ventilas m^2
C_d	Coeficiente de descarga (adimensional)
C_i	Concentración interna y externa del gas (ppm)
C_o	Concentración interna y externa del gas (ppm)
C_S	Coeficiente de presión estática del viento al nivel de la ventana lateral adimensional)
C_R	Coeficiente de presión estática del viento al nivel de la ventana cenital (adimensional).
C_w	Coeficiente de presión global del viento (adimensional),
DNS	Distributed Sensor Networks
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
GSM	Global System for Mobile communications
GPRS	General Packet Radio Service
h	Distancia vertical entre el punto medio de la ventana lateral y cenital m^3
M	Flujo másico del gas que ingresa al invernadero
N	Tasa de ventilación $m^3 s^{-1}$

Q_v	Tasa de ventilación vertical entre las ventila lateral y cenital $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$
Q_h	Tasa de ventilación horizontal $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$
<i>SIMPLE</i>	Semi-implicit method for pressure-linked
R^2	Coeficiente de Correlación
RMSE	Error medio cuadrado
T_o	Temperatura del aire exterior °C
T_i	Temperatura del aire interior °C
u	Velocidad del viento ms^{-1}
V	Volumen del invernadero m^3
WSN	Wireless Sensor Network
Φ	Variable de concentración en forma adimensional
Γ	Coeficiente de difusión
S_ϕ	Término fuente

RESUMEN GENERAL

Monitoreo 3D y análisis CFD del ambiente de un invernadero con ventilación natural

José Eduardo Rosales-Vicelis¹, Efrén Fitz-Rodríguez²

La mayoría de los invernaderos en México son de bajo a mediano nivel tecnológico, en donde predomina la ventilación natural como mecanismo de modificación del ambiente. Sin embargo, la operación de ésta es deficiente, resultando en condiciones ambientales no óptimas para los cultivos. Por lo tanto, se propone realizar el análisis del ambiente de un invernadero mono-bahía de 300 m², con ventilación natural. El análisis se realizó modelos numéricos de dinámica de fluidos computacional para diferentes configuraciones de ventilación y condiciones climáticas externas diversas. La configuración de las ventilas del invernadero incluye dos laterales (L_E , L_O) y dos cenitales (C_E , C_O). Esto resulta en una infinidad de condiciones ambientales, al aplicar diferentes combinaciones de porcentajes apertura para cada una de las ventilas. Por ejemplo, para la combinación de porcentaje de apertura L_{E50} - L_{O50} - C_{E0} - C_{O0} , se obtuvo una disminución de temperatura de 5 °C, y un gradiente vertical de 2 °C. En contraste, con la combinación L_{E50} - L_{O50} - C_{E50} - C_{O50} , se logró una reducción de 8.77 °C y un gradiente vertical de 1.38 °C. La velocidad y dirección del viento juegan un papel importante en implementar la combinación de aperturas correcta. Por ejemplo, para la combinación de aperturas L_{E75} - L_{O0} - C_{E0} - C_{O0} , cuando la dirección del viento es de Este-Oeste, a velocidades superiores a 2 ms⁻¹, la temperatura del aire desciende a más de 4 °C y genera un gradiente térmico de 1 °C. En contraste, a velocidades menores, la temperatura del aire disminuye únicamente 1 °C y el gradiente térmico es superior a 2 °C. Para evaluar las predicciones de los modelos CFD se diseñó e implementó un sistema inalámbrico de monitoreo tridimensional de temperatura del aire del invernadero.

Palabras clave: Análisis numérico, Dinámica de fluidos computacional, Red de sensores inalámbrica, Control ambiental en biosistemas.

¹Autor de tesis; ²Director de tesis

ABSTRACT

3D monitoring and CFD environment analysis of a naturally ventilated greenhouse

José Eduardo Rosales-Vicelis¹, Efrén Fitz-Rodríguez²

Most greenhouses in Mexico go from a low to a medium technological level, where natural ventilation is the predominant mechanism for environment manipulation. However, ventilation management is usually deficient, resulting in not optimal environmental conditions for the crops. Therefore, it is proposed to carry on an analysis of the environment of a 300 m² single-span greenhouse, equipped with natural ventilation. The analysis was performed with computational fluid dynamics for different ventilation configurations and diverse external climatic conditions. Greenhouse vent configuration includes two lateral (LE, LO) and two ridge (CE, CO). This results in an infinity of environmental conditions, when different percentage of aperture for each vent is applied. For example, for the combination of aperture percentage LE50-LO50-CE0-CO0, a 5 °C reduction of temperature was obtained, and 2 °C of vertical temperature gradient. In contrast, with the combination of LE50-LO50-CE50-CO50, a reduction of 8.77 °C was obtained, and a vertical gradient of 1.38 °C. Wind speed and direction play an important role for applying the proper opening combination. For example, for the combination of aperture LE50-LO50-CE0-CO0, with an East-West wind direction, at wind speeds higher than 2 ms⁻¹, results in temperature increments of up to 4 °C and vertical gradients of up to 1 °C. In contrast, at lower wind speeds, the air temperature decreases only 1 °C and the vertical gradient is higher than 2 °C. To validate the results of the simulations, a three-dimensional wireless monitoring system of the greenhouse environment (temperature and humidity of the air) was designed and implemented.

Keywords: Numerical analysis, Computational fluid dynamics, Wireless sensor network, Biosystems control environment.

¹Thesis author; ²Thesis Advisor

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

En México, SIAP-SAGARPA (2015) reporta que existe una superficie de agricultura protegida de 51,179.02 hectáreas, de las cuales 12,694.35 ha son de invernaderos, distribuidos en 24,156 unidades de producción. El 79.22 % de estas son invernaderos con superficie menor a 0.5 ha, 19.1 % son invernaderos con superficie entre 0.5 ha y 5.0 ha y solo el 1.67 % son invernaderos con superficies mayores a 5 ha. En cuestión tecnológica 9 de cada 10 invernaderos cuentan con tecnología básica y solo 1 de cada 10 cuentan con tecnología media o avanzada. Dado lo anterior, la mayoría de los invernaderos implementados en México son pasivos, sin calefacción, sin algún tipo de enfriamiento y con cultivos en suelo, en donde los factores ambientales (aéreo y radicular) difícilmente son controlados (Costa y Giacomelli 2005). La ventilación natural es la técnica más simple de control y homogenización eficiente del ambiente de los invernaderos. Esta forma de adecuación del ambiente en invernaderos resulta adecuada principalmente en la zona central de México, en donde las condiciones climáticas durante la mayor parte del año favorecen el enfriamiento a través de intercambios de aire por convección natural. Además, es una técnica relativamente económica, lo cual resulta ideal para invernaderos de baja y mediana tecnología.

Numerosas investigaciones se han realizado para estudiar el comportamiento de la ventilación natural bajo diferentes escenarios climáticos (Ganguly y Ghosh 2009, Bournet y Boulard 2010), tipos de invernadero (Boulard, Feuilloley et al. 1997, Lee, Lee et al. 2018), y configuraciones de ventilación (Bartzanas, Boulard et al. 2004, Kittas y Bartzanas 2007, Flores-Velazquez, Montero et al. 2014). Estas investigaciones se han realizado implementando al menos uno de los tres principales métodos o técnicas, incluyendo: modelación dinámica o mecanicista (Reyes-Rosas, Molina-Aiz et al. 2017), modelación numérica con dinámica de fluidos computacional (CFD) (Bartzanas y Kittas 2001), con técnicas de gases

trazadores (Baptista, Bailey et al. 1999) o combinando métodos (Hong, Lee et al. 2008). La selección de un método de estudio debe considerar que el ambiente de un invernadero es heterogéneo, donde los gradientes de temperatura y humedad relativa, tanto horizontales como verticales, pueden llegar a ser considerablemente grandes, dependiendo del diseño y de la configuración de los sistemas de ventilación. La heterogeneidad que se genera en el ambiente aéreo afecta directamente en la uniformidad del cultivo, no solo en el rendimiento por unidad de superficie, sino también en las diferentes tasas de los diferentes procesos fisiológicos, tasas de crecimiento, desarrollo y al final reflejados como diferentes calidades y cantidades de frutos. De la misma manera se generan problemas de aparición de plagas y enfermedades en las zonas del invernadero con temperaturas y niveles de humedad más favorables para estas (Molina-Aiz, 2010). La modelación basada en dinámica de fluidos computacional (CFD) permite estudiar espacialmente y con mayor detalle el efecto de la ventilación natural sobre el ambiente del invernadero, y de esta manera se puede utilizar esta caracterización para un mejor control y homogenización de variables climáticas.

El monitoreo ambiental o climático es una herramienta importante, tanto para evaluación de modelos, como para caracterizar el comportamiento real del ambiente del invernadero. La complejidad de esta labor contribuye a un mejor conocimiento del comportamiento dinámico del ambiente; sin embargo, comúnmente, en muchas investigaciones solo se utiliza un sensor para cada variable climática en un punto fijo, caracterizando con esta información la dinámica de todo el sistema (Kaneda, Ibayashi et al., 2015). Este tipo de mediciones se denomina monitoreo puntual. Un monitoreo espacial solucionaría el problema de suposición de homogeneidad en el ambiente de los invernaderos. No obstante, existen pocas investigaciones que implementen redes de sensores distribuidos espacialmente para describir la heterogeneidad del clima en invernaderos en línea (Balendonck, 2010). Esto se debe, principalmente, al reto tanto económico, como técnico para el desarrollo de estos sistemas de monitoreo. A pesar de esto, el monitoreo distribuido o espacial es el indicado para estudiar los sistemas de ventilación natural a través de los modelos CFD y para la evaluación de estos.

Investigaciones realizadas con modelación CFD se han enfocado al estudio del efecto de alguna configuración de aperturas de ventilas sobre las tasas de ventilación. Enfocándose principalmente en la eficiencia de la ventilación, sin considerar la configuración de ventilas como una herramienta potencial para el control y homogenización del ambiente en invernaderos. Existen escasas investigaciones sobre ventilación natural en invernaderos para las condiciones climáticas del Centro de México, las realizadas no abordan la problemática del control y homogenización de temperatura del aire por medio de ventilación natural. Dado lo anterior, se plantea la hipótesis siguiente: el análisis de un mayor número de configuraciones de ventilas, posibilitará establecer la configuración de ventilación adecuada para controlar y homogenizar el ambiente de un invernadero, de una sola bahía, dependiendo las condiciones climáticas externas.

Por lo tanto, se propone realizar la modelación CFD del ambiente de un invernadero con ventilación natural y evaluarla mediante una red de sensores inalámbricos, previamente construidos, diferentes configuraciones de ventilación.

1.1. Objetivo General

- Analizar el ambiente de un invernadero con ventilación natural mediante un monitoreo 3D inalámbrico y modelación CFD.

1.2. Objetivos específicos

- Desarrollar un sistema de monitoreo inalámbrico de temperatura y humedad relativa del aire.
- Implementar modelos con CFD para el análisis del ambiente de un invernadero, bajo diferentes configuraciones de ventilación, y diferentes escenarios de clima exterior.
- Evaluar el efecto de la dirección y velocidad del viento sobre la eficiencia de ventilación en las configuraciones de ventilación seleccionadas.
- Evaluar la modelación CFD, utilizando mediciones experimentales con el sistema de monitoreo inalámbrico desarrollado.

- Desarrollar una base teórica para seleccionar la configuración de ventilación adecuada en el control de temperatura del aire de un invernadero, bajo diferentes escenarios de clima exterior.

1.3. Estructura de la tesis

La presente tesis está dividida en tres capítulos principales. El primer capítulo corresponde a la revisión del estado del arte del tema de investigación, dividido en dos partes: la primera parte corresponde importancia del monitoreo en invernaderos, las principales tecnologías inalámbricas en el desarrollo de sistemas de monitoreo inalámbricos para invernaderos, sus ventajas y desventajas; y la segunda parte corresponde a las principales técnicas y métodos de estudio de los sistemas de ventilación natural en invernaderos, destacando la modelación mecanicista o modelos dinámicos, modelos basados en CFD, y la técnica de gases trazadores. El segundo capítulo corresponde al desarrollo y evaluación de un sistema de monitoreo inalámbrico de temperatura y humedad relativa del aire para invernaderos, cuyas principales características son: bajo costo del nodo sensor, eficiencia en la transmisión de datos, alimentación del nodo sensor por celdas fotovoltaicas y nodo sensor aspirado. Finalmente, el tercer capítulo corresponde al desarrollo de un análisis CFD 3D de un invernadero con ventilación natural, destacando el efecto de la configuración de ventilas en la eficiencia de la ventilación del invernadero, así como el efecto de la velocidad y dirección del viento en el control y homogenización del ambiente del mismo modelo.

1.4. Literatura citada

- Balendonck, J., Van Os, E. A., Van der Schoor, R., Van Tuijl, B. A. J., & Keizer, L. C. P. (2010). Monitoring spatial and temporal distribution of temperature and relative humidity in greenhouses based on wireless sensor technology. In International Conference on Agricultural Engineering-AgEng (pp. 443-452).
- Baptista, F. J., Bailey, B. J., Randall, J. M., & Meneses, J. F. (1999). Greenhouse Ventilation Rate: Theory and Measurement with Tracer Gas Techniques. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 72(4), 363-374. doi:<https://doi.org/10.1006/jaer.1998.0381>

- Bartzanas, T., T. Boulard and C. Kittas (2004). Effect of Vent Arrangement on Windward Ventilation of a Tunnel Greenhouse. *Biosystems Engineering* 88(4): 479-490. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2003.10.006>.
- Bartzanas, T. and C. Kittas (2001). Optimisation of greenhouses ventilation performance with computational fluid dynamics. 2nd Southeastern Europe Fluent Users Group Meeting, Bucharest Romania, CD-ROM, Simtec Eds., Thessaloniki, Greece.
- Bournet, P.-E. and T. Boulard (2010). Effect of ventilator configuration on the distributed climate of greenhouses: A review of experimental and CFD studies. *Computers and Electronics in Agriculture* 74(2): 195-217. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compag.2010.08.007>.
- Costa, p.; giacomelli, G. A. Ensuring Success–Protected Horticulture: productivity based on levels of technology. *Productores de Hortalizas, The ABCs of Greenhouse Production Technological Considerations*, 2005, vol. 14, no 2, p. 48-53.
- Flores-Velazquez, J., Montero, J. I., Baeza, E. J., Lopez, J. C. J. I. J. o. A., & Engineering, B. (2014). Mechanical and natural ventilation systems in a greenhouse designed using computational fluid dynamics. *International Journal of Agricultural Biological Engineering*, 7(1), 1. doi: 10.3965/j.ijabe.20140701.001.
- Ganguly, A. and S. Ghosh (2009). Model development and experimental validation of a floriculture greeouse under natural ventilation. *Energy and Buildings* 41(5): 521-527. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.11.021>
- Hong, S. W., I. B. Lee, H. S. Hwang, I. H. Seo, J. P. Bitog, J. I. Yoo, K. S. Kim, S. H. Lee, K. W. Kim and N. K. Yoon (2008). Numerical Simulation of Ventilation Efficiencies of Naturally Ventilated Multi-Span Greenhouses in Korea. *Transactions of the ASABE* 51(4): 1417-1432. doi: 10.13031/2013.25235
- Kaneda, Y., H. Ibayashi, N. Oishi and H. Mineno (2015). Greenhouse environmental control system based on SW-SVR. *Procedia Computer Science*, 60: 860-869. doi:<https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.08.249>.
- Kittas, C., & Bartzanas, T. (2007). Greenhouse microclimate and dehumidification effectiveness under different ventilator configurations. *Building and Environment*, 42(10), 3774-3784. doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.06.020>.
- Lee, S.-y., I.-b. Lee and R.-w. Kim (2018). Evaluation of wind-driven natural ventilation of single-span greenhouses built on reclaimed coastal land.

- Molina-Aiz, F. (2010). Simulación y modelación de la ventilación en invernaderos de Almería mediante la utilización de dinámica de fluidos computacional . Tesis doctoral, Universidad de Almería, Almería, España.
- Molina-Aiz, F. D., Fatnassi, H., Boulard, T., Roy, J. C., & Valera, D. L. (2010). Comparison of finite element and finite volume methods for simulation of natural ventilation in greenhouses. *Computers and Electronics in Agriculture*, 72(2), 69-86. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compag.2010.03.002>
- Reyes-Rosas, A., Molina-Aiz, F. D., Valera, D. L., López, A., & Khamkure, S. (2017). Development of a single energy balance model for prediction of temperatures inside a naturally ventilated greenhouse with polypropylene soil mulch. *Computers and Electronics in Agriculture*, 142, 9-28. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.08.020>
- SIAP-SAGARPA (2015). "Atlas agroalimentario ".

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Red de sensores inalámbricos en invernaderos

4.1.1. Monitoreo en invernaderos.

Para la producción óptima de cultivos en invernaderos, se requiere del monitoreo continuo de variables de interés para la manipulación y control de procesos que garanticen una productividad óptima. Esta acción se justifica, dado que permite analizar y comprender de mejor manera, la relación planta-ambiente en el invernadero, y utilizar este conocimiento para maximizar la producción. Entonces, la labor del productor es conocer el estado físico desde el nivel de una hoja, una planta o todo el dosel vegetativo del cultivo. Sin embargo, este conocimiento solo se puede obtener a partir de mediciones (Hanan 1984). Es por eso que el monitoreo es una labor imprescindible para establecer las decisiones y estrategias de control convenientes para el manejo y producción del cultivo.

En los invernaderos constantemente se miden tres factores esenciales en la producción: 1) variables ambientales o de clima, tanto internos como externos (temperatura del aire, humedad relativa del aire, concentración de CO₂, radiación solar, déficit de presión de vapor, etc.), 2) variables de la planta (área foliar, temperatura de la planta, déficit de presión de vapor aire-planta etc.), y 3) variables del área radicular, ya sea en suelo o sustrato (pH, conductividad eléctrica del sustrato, humedad del medio, temperatura, etc.). Para efectuar estas mediciones, y relacionarlas con los procesos que se llevan a cabo en el invernadero, se requiere de instrumentos de medición que mantengan una calibración en determinadas condiciones y con la precisión deseada (Hanan 1984). La selección del tipo de instrumento se efectúa dependiendo de la aplicación, funcionamiento, precisión, exactitud y costo del instrumento. Anteriormente las mediciones de los instrumentos se registraban manualmente, ya que sus principios de funcionamiento se basaban en el cambio de propiedades físicas observables de los materiales que constituían

a dichos instrumentos. Sin embargo, con los recientes desarrollos tecnológicos, la mayoría de los instrumentos de medición transforman las variables medidas en señales eléctricas. Este tipo de instrumentos se le conocen como transductores (sensores). Para aumentar la comprensión de los distintos fenómenos físicos, químicos o fisiológicos en y alrededor del invernadero se requiere de una medición continua de un número creciente de variables, lo cual implica el uso de sensores, conectados a un sistema automático de adquisición de datos (datalogger). Muchos sensores existentes tienen que ser modificados o se deben desarrollar nuevos dispositivos para satisfacer estos nuevos requerimientos (Gieling 1998).

La complejidad del monitoreo se realiza dependiendo del objetivo que se haya definido, en el análisis del ambiente de los invernaderos y del nivel tecnológico del mismo. Generalmente, los productores de cultivos en invernaderos de baja y mediana tecnología monitorean estos factores de manera puntual, considerando la producción del cultivo y el ambiente del invernadero de manera homogénea, evitando así mayores costos de inversión. Para fines de investigación y de estudio del ambiente en invernaderos y para fines comerciales de alto nivel tecnológico, se realiza un monitoreo espacial de estas variables, donde el objetivo es obtener una mejor comprensión del comportamiento dinámico de los factores ambientales y de la respuesta de las plantas a estos, y posteriormente analizar o entender de mejor forma los procesos físicos y fisiológicos que se desarrollan en el biosistema.

Un monitoreo eficiente se caracteriza por una alta frecuencia y densidad de mediciones en el invernadero, de manera que el monitoreo espacial es el más eficiente e indicado para incorporarlo en los sistemas de control de clima en invernaderos; los cuales brindan un control climático más eficiente, debido a que dentro del invernadero las condiciones del cultivo, como el clima y el suelo, no dependen de los factores externos naturales; así, las implementaciones son más fáciles que en aplicaciones a campo abierto. (Ruiz-Garcia, et al. 2009). La desventaja del monitoreo espacial, al momento de incorporarlo a un sistema de control, es la gran cantidad de información que debe procesar el sistema en “tiempo

real”, para la toma de decisiones; por lo que, este tipo de sistemas, requieren de microprocesadores o computadoras de gran capacidad de procesamiento.

El monitoreo espacial comenzó con el concepto de red de sensores distribuidos (DNS), el cual se definió como el conjunto de nodos sensores, elementos de procesamiento y redes de comunicación interconectados entre sí (Iyengar et al., 1994). Bajo este concepto, los nodos sensores estaban directamente conectados a los elementos de procesamiento. La función de los elementos de procesamiento era recibir la información proveniente de los nodos sensores y de comunicarse con otros elementos de procesamiento por medio de una red de comunicación por cable. Un ejemplo de DNS en invernaderos es el desarrollado por Serodio, Cunha et al. (1997); el cual se conecta de forma jerárquica para formar una topología tipo árbol. Sus estaciones de red de nivel inferior, designadas por esclavos, estaban dedicadas a la adquisición de datos, mientras que las de nivel superior, denominados maestros, eran responsables del control de las comunicaciones. Ambas redes utilizan un bus CAN para la transferencia de datos. La evaluación de esta red de sensores, con velocidades de transmisión que variaban de 40 Kbits/s a 1 Mbits/s, fueron eficientes en las comunicaciones, sin errores para longitudes de cable de 1,100 m a 40 m, respectivamente.

Este tipo de monitoreo distribuido representa un alto costo económico en el cableado y en la instalación de los sensores, aumentando aún más para aplicaciones de grandes superficies de producción. Sin embargo, con el desarrollo tecnológico en comunicaciones inalámbricas, sensores digitales, microprocesadores y microcontroladores, se ha llevado la aplicación de la red de sensores inalámbrico (WNS, por sus siglas en inglés) al monitoreo del medio ambiente en invernaderos (Aqeel ur, et al. 2014). Se ha demostrado que esta aplicación es una forma alternativa de reemplazar el método convencional para monitorear el ambiente de los invernaderos. También se ha demostrado que estos enfoques pueden mejorar el rendimiento del sistema, proporcionando un método conveniente y eficiente mientras se cumplen con los requisitos funcionales (Othman y Shazali 2012).

4.1.2. Monitoreo inalámbrico en invernaderos.

Una red de sensores inalámbricos (WSN, por sus siglas en inglés) es un sistema compuesto de nodos maestros y nodos sensores multifuncionales de bajo costo, bajo consumo de energía, pequeños en tamaño y se comunican sin problemas en cortas distancias (Akyildiz, Su et al. 2002). Los nodos sensores están constituidos por 5 módulos esenciales: módulo de adquisición de datos (sensores), módulo de comunicación (transceptores de radiofrecuencia (RF)), módulo de procesamiento de datos (microcontroladores), módulo de almacenamiento de datos (memorias externas) y módulo de energía (fuentes de alimentación) (Wang, Zhang et al. 2006, Zhu, Song et al. 2011, Aqeel ur, Abbasi et al. 2014).

La estructura de las WSN ha sido la misma desde su creación, con la diferencia más significativa, incluye los dispositivos que conforman los diferentes módulos, principalmente los tipos de comunicación inalámbrica por radiofrecuencia. Las primeras WSN aplicadas en invernaderos utilizaban dispositivos emisores y receptores de radiofrecuencia y su aplicación era particular. Una de estas es la red inalámbrica solar de adquisición de datos de Morais, Cunha et al. (1996), la cual contemplaba seis estaciones inalámbricas de adquisición de datos, energizadas solarmente, las cuales medían temperatura del aire, humedad del aire, radiación solar y humedad del suelo, dentro y fuera de un invernadero. Dichas estaciones estaban vinculadas a una estación base por transmisores de radiofrecuencia y receptores de bajo consumo energético. Dicha WSN se utilizaba únicamente para propósitos de monitoreo. Otra investigación llevada a cabo por Serôdio, Cunha et al. (1998), consistió en un sistema distribuido de adquisición de datos y control para un sistema computarizado, que proporciona a los invernaderos un control óptimo de las condiciones ambientales. El sistema incluye tres subsistemas: 1) red inalámbrica de adquisición de datos, vinculadas entre sí con computadoras de supervisión mediante radiofrecuencia, 2) red alámbrica de actuadores, vinculadas con la computadora central vía interfaz cableada (RS-232) y 3) computadora central, con acceso a internet vía Ethernet. Esta WSN se desarrolló para monitorear y analizar el ambiente de un invernadero. Desde las primeras aplicaciones de WSN en invernaderos, diferentes sistemas se han desarrollado utilizando diferentes

tecnologías inalámbricas basadas en radiofrecuencia, las cuales han cambiado debido a los avances tecnológicos propios de este tipo de comunicación. Las principales tecnologías inalámbricas, basadas en radiofrecuencia, que han sido utilizadas para el monitoreo de variables climáticas en invernaderos son: Bluetooth, GSM/GPRS, WiFi y Zigbee.

2.1.1.1. *Bluetooth*

La tecnología bluetooth (Cuadro 2.1) es un tipo de comunicación inalámbrica por radiofrecuencia, basada en el protocolo estándar IEEE 802.15.1, el cual define una comunicación en una red alámbrica de área personal (WPAN) utilizando una frecuencia de 2.4 GHz, banda ISM (banda sin licencia y gratuita) (Ojha, Misra et al. 2015).

Cuadro 2.1. Bluetooth en WSN aplicadas en invernaderos.

N° de investigación	Autor/es	Descripción de la investigación
1	Liu y Ying (2003)	Sistema de monitoreo y control conformado por una WSN, cuyos nodos enviaban sus mediciones a un sistema de control central, a través de una comunicación bluetooth punto a punto.
2	Kim. et al. (2008)	Sistema de riego basado en WSN, donde la humedad y la temperatura del suelo, la información meteorológica y la posición de los rociadores se monitorearon de forma remota utilizando las tecnologías Bluetooth y GPS.
3	Kim y Evans (2009)	WSN para control de riego por aspersión a través Bluetooth, donde continuamente se monitorea la ubicación geográfica de una máquina de riego autopropulsada, para decidir el tiempo de irrigación dependiendo su ubicación.

A pesar de que este tipo de comunicación es de mediano consumo energético, bajo costo, velocidad de datos considerable, tiene ciertas desventajas, como por ejemplo: rango de operación limitado a unos pocos metros (8–10 m), retraso de acceso para dispositivos que comparten un solo bluetooth, y la interferencia también es un problema cuando se utiliza esta tecnología (Purnima y R. N. Reddy 2012, Aqeel ur, Abbasi et al. 2014, Ojha, Misra et al. 2015). Este tipo de comunicación, debido a las características descritas, se ha utilizado en aplicaciones de monitoreo y control de riego, debido a que esta actividad se efectúa en determinadas ocasiones del día. En últimos años no se han desarrollado investigaciones con WSN que incorporen bluetooth en los nodos sensores, sino que se ha utilizado para transferir la información almacenada a teléfonos móviles que contienen esta misma tecnología.

2.1.1.2. GSM/GPRS/3G/4G

El Sistema Global para Comunicaciones Móviles (GSM, por sus siglas en inglés, Global System for Mobile communications) es el estándar europeo para comunicaciones móviles desarrollado por el Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones (ETSI). Adoptado inicialmente a Europa, y después al resto del mundo; mientras que el Servicio general de Radio por Paquetes (GPRS) surge como una extensión de datos del estándar de telefonía móvil GSM para obtener una alta velocidad de transmisión y ejecución de aplicaciones de datos desde sus terminales móviles (Ghribi et al., 2000). Las extensiones 3G y 4G (tercera y cuarta generación de tecnología de comunicación móvil, respectivamente), son tecnologías que evolucionaron del GPRS para aumentar la velocidad de transferencia de datos del sistema GSM. La velocidad de transferencia cada una de estas tecnologías de comunicación varía notablemente: la red GSM permite una velocidad máxima de 14.4 kbit/s, la red GPRS aumenta la velocidad de transferencia hasta 170 kbit/s y la red 3G logra aumentarla hasta los 2 mbits/s (Ghribi et al., 2000); finalmente, la más reciente red 4G, logra una velocidad de transferencia de datos de 100 Mbits/s a 1 Gbits/s (Ojha, Misra et al. 2015). La aplicación de estas tecnologías se ha incrementado en los últimos años, debidos al amplio rango de

comunicación en que operan, ya que los dispositivos que integran esta tecnología pueden comunicarse en toda el área de servicio GSM.

Cuadro 2.2. Tecnologías GSM aplicadas en invernaderos

N° de investigación	Autor/es	Descripción de la investigación
1	Liu y Ying (2003)	Sistema de monitoreo distribuido de variables climáticas, conformado por una estación central y estaciones base, incorporando módulos GSM en cada estación como modulo principal.
2	Liu, Meng et al. (2007)	Sistema de monitoreo distribuido de temperatura, luz y la humedad del suelo, conformado por nodos sensores, nodo receptor, y una estación base. La red GSM se utiliza para comunicar la estación base y el nodo receptor.
3	Jin, Jingling et al. (2007)	Diseño de un sistema de monitoreo y control remoto para invernaderos a gran escala, conformado por estaciones base y una estación central, comunicados entre sí mediante módulos GSM. El sistema también se puede comunicar con teléfonos celulares.
4	Li,Xiu-Hong, et al.(2010)	Sistema de monitoreo distribuido de temperatura y humedad del aire, y humedad del suelo, conformado por nodos sensores, estación base y un centro de datos. Incorporaba módulos GSM y GPRS para comunicar la estación base con el centro de datos y con teléfonos móviles.

5	Huang, Bian et al. (2011)	Sistema de monitoreo puntual para la medición de temperatura y humedad del aire, y CO ₂ . El sistema consta únicamente de un emisor, el cual incorpora un módulo GSM para enviar las mediciones a un celular y/o computadora
6	Fei-qing, Lin-gong et al. (2012)	Sistema de monitoreo puntual para la medición de temperatura y humedad del aire. El sistema consta de un emisor, el cual incorpora un módulo GSM para enviar las mediciones a un sistema de control.

Este tipo de tecnología inalámbrica, a pesar de que presenta un amplio rango de comunicación, aún presenta algunas desventajas considerables, por lo que comúnmente se utiliza en WSN como complemento para enviar notificaciones del estado del sistema, ya sea para el monitoreo y control del riego o para monitorear variables ambientales. Debido a esto, en invernaderos, este tipo de tecnologías se utiliza más frecuentemente para el monitoreo puntual, integrándose a los sistemas de monitoreo remoto.

2.1.1.3. *WiFi*

La tecnología inalámbrica WiFi es un de red inalámbrica de área local (WLAN) estándar utilizada para el intercambio de información o comunicación a la red de Internet de forma inalámbrica basada en la familia de estándares IEEE 802.11. Caracterizada por su amplio rango de operación (20 - 100 m), una velocidad de transmisión de datos de 2–54 Mbps, frecuencia de 2.4 GHz de banda ISM, pero con alto costo y consumo energético (Aqeel ur, et al. 2014, Ojha, et al. 2015). Debido a estas características la aplicación para el desarrollo de nodos en WSN es escasa, las pocas aplicaciones agrícolas han sido para cultivos en campo abierto.

Cuadro 2.3 WIFI en WSN aplicadas agricultura

N° de investigación	Autor/es	Descripción de la investigación
1	Anastasi, Farruggia et al. (2009)	Sistema de monitoreo distribuido de temperatura del aire, humedad relativa y luz para viñedos, donde la tecnología WiFi se incorpora en los nodos receptores que envían las mediciones de los nodos, a un servidor.
2	Mendez, Yunus et al. (2012)	Sistema de monitoreo distribuido de temperatura y humedad para entornos agrícolas, basado en nodos sensores que incorporan módulos WiFi, los cuales envían las mediciones a un servidor central
3	He, Jianlun et al.(2011)	Sistema de apoyo a la toma de decisiones de fertilización optima mediante WSN basados en el protocolo IEEE 802.11 (WiFi). Los sensores se utilizaron para medir variables climáticas y del suelo y fueron enviadas a un servidor de internet utilizando módulos WiFi.

Como esta tecnología maneja velocidades de datos muy altas, implica una alta potencia y el consumo de energía es mayor que en otras alternativas. Por lo tanto, no es ideal para aplicaciones de adquisición de datos que necesitan funcionar sin interrupciones (Morais, Fernandes et al. 2008, López-Martínez, Blanco-Claraco et al. 2018). Generalmente la aplicación de esta tecnología ha sido como complemento en el desarrollo de WSN, principalmente para comunicar el nodo maestro con el servidor de internet.

2.1.1.4. Zigbee

Otro tipo de comunicación inalámbrica por radiofrecuencia, muy utilizado en las WSN, es la tecnología Zigbee, que está basada en el estándar de comunicación IEEE 802.15.4, la cual transmite datos a velocidades bajas de 20–40 kbps y 250 kbps a frecuencias de 868/915 MHz y 2.4 GHz (bandas ISM), respectivamente (Ojha, Misra et al. 2015).

Cuadro 2.4. Zigbee en WSN aplicadas en invernaderos

N° de investigación	Autor/es	Descripción de la investigación
1	Zhu, Zhong et al. (2006)	Sistema de red de sensores inalámbricos para medición de temperatura del aire, humedad relativa e intensidad de luz en invernaderos, conformado por nodos, puertas de acceso y un servidor.
2	Zhang, Yang et al. (2007)	Sistema de monitoreo y control de invernaderos conformado por nodos sensores y nodos actuadores para el monitoreo y control de temperatura y humedad del aire y luz.
3	Zhou, Yang et al. (2007)	Sistema de monitoreo y control para la gestión de invernaderos conformado por nodos sensores, nodos actuadores, enrutadores y controladores embebidos para el monitoreo y control de variables climáticas internas y externas al invernadero, y variables del sustrato.
4	López Riquelme, Soto et al. (2009)	Sistema monitoreo inalámbrico de variables climáticas, conductividad eléctrica y temperatura del agua para riego, humedad, conductividad, salinidad y temperatura del sustrato conformador

		por nodos sensores, puertas de acceso, repetidores y estación base.
5	Vox, Losito et al. (2014)	Sistema de monitoreo inalámbrico innovador para medir parámetros climáticos y diámetro de fruto, conformado por nodos sensores, nodos enrutadores, nodos centrales y módulo de colección de datos
6	Ferentinos, Katsoulas et al. (2017)	Sistema de monitoreo distribuido utilizando un WSN en un invernadero comercial para la medición de temperatura del aire, humedad relativa, radiación solar, y temperatura de la hoja, conformado por nodo sensores.

Esta tecnología se caracteriza por su bajo costo, bajo consumo energético, baja velocidad de transmisión de datos, alta confiabilidad y seguridad. (Yu, Cui et al. 2009). Estas ventajas, junto a su variable rango de comunicación hacen de esta tecnología la preferida y la más prometedora sobre otras tecnologías para el desarrollo de WSN (Wang, Zhang et al. 2006, Aqeel ur, Abbasi et al. 2014).

Las primeras aplicaciones de esta tecnología se centraban en sensores y control automático para el sector industrial, edificios inteligentes, monitoreo de ambientes domésticos y atención médica; sin embargo, la automatización de la agricultura también fue un campo aplicable recomendado (Zhou, Yang et al. 2007). Estas primeras aplicaciones únicamente involucraban monitoreo de variables climáticas, sin embargo, se empezaron a considerar otras variables como las del suelo y riego.

En más recientes desarrollos, se ha incorporado el monitoreo de variables de cultivo, como temperatura de la hoja, para el cálculo del déficit de presión de vapor (Rosales Vicelis, 2016), condensación en la superficie de la hoja y transpiración o el diámetro del fruto, para determinar la variación del diámetro de los frutos del cultivo bajo invernadero.

2.2. Ventilación natural en invernaderos

La ventilación natural es una técnica sencilla que se utiliza para la modificación de temperatura del aire, contenido de humedad y la concentración de CO₂, en el ambiente de los invernaderos, influyendo directamente en el crecimiento y desarrollo de los cultivos (Boulard y Draoui 1995, Bartzanas, Boulard et al. 2004). Esta técnica se define como el intercambio de aire que se produce en respuesta dos fuerzas impulsoras principales: la primera por efecto del viento (producto de la generación de un campo de presión alrededor de las ventilas), y la segunda por efecto de las variaciones de temperatura o llamado efecto chimenea (producto de la distribución vertical de la presión y que está vinculada al gradiente de densidad del aire entre dentro y fuera del invernadero), las cuales son creadas y mantenidas por la energía solar, las fuentes de calor internas y/o viento y las transferencias consecutivas de calor y masa que se producen principalmente a través de las ventilas (Boulard, Meneses et al. 1996, Haxaire, Boulard et al. 2000, Bournet y Boulard 2010).

El análisis de la ventilación natural se ha estudiado, fundamentalmente de tres maneras, incluyendo: 1) con modelos matemáticos mecanicistas y con monitoreo puntual; 2) con la caracterización por medio de gases trazadores y 3) con modelación numérica (CFD) y monitoreo espacial.

4.1.3. Modelación mecanicista de la ventilación natural en invernaderos.

Los primeros estudios de las fuerzas impulsoras de la ventilación natural (efecto del viento y efecto chimenea) fueron realizados, a partir de modelos de balance de energía en edificios, los cuales posteriormente se aplicaron a construcciones agrícolas y pecuarias. La base teórica para la modelación mecanicista de este proceso es la aplicación de la ecuación de Bernoulli para determinar la velocidad del aire, a partir de la diferencia de presiones (Boulard, Meneses et al. 1996). Aplicando la ecuación de Bernoulli, Bruce (1978) publicó la base teórica para entender el proceso convección natural a través de aperturas y aplicarlo a la ventilación de construcciones pecuarias; y posteriormente Bruce (1982) estableció

un modelo de tasa de ventilación, considerando únicamente el efecto chimenea, dado las fuerzas térmicas de flotabilidad de una construcción pecuaria.

Kittas, Boulard et al. (1997) retomaron las investigaciones sobre ventilación aplicada a invernaderos y propusieron un modelo mecanicista para determinar las tasas de ventilación de un invernadero con ventilas laterales y cenitales, considerando la flotabilidad térmica y el efecto del viento. Proponen el modelo de tasa de ventilación total del invernadero como la siguiente suma vectorial:

$$Q = \sqrt{Q_v^2 + Q_h^2}$$

Donde Q_v es la tasa de ventilación vertical entre las ventila lateral y cenital y Q_h es la tasa de ventilación horizontal.

La tasa de ventilación horizontal Q_h fue definida por la siguiente expresión:

$$Q_h = \frac{A_T}{2} C_d C_w u$$

Donde C_d es el coeficiente de descarga (adimensional), C_w es el coeficiente de presión global del viento (adimensional), u es la velocidad del viento (ms^{-1}), A_T es el área total de apertura de las ventilas (m^2):

$$A_T = A_r + A_s$$

Donde A_r es el área de apertura de las ventanas cenitales (m^2) y A_s es el área de apertura de las ventanas laterales (m^2).

La tasa de ventilación vertical Q_v quedó definida, mediante la siguiente expresión:

$$Q_v = C_d \frac{A_r * A_s}{A_r^2 + A_s^2} \left(2g \frac{T_{i1} - T_o}{T_o} h + K u^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

Donde g es la aceleración de la gravedad (ms^{-2}), T_o es la temperatura del aire exterior ($^{\circ}\text{C}$), T_i es la temperatura del aire interior ($^{\circ}\text{C}$), h es la distancia vertical entre el punto medio de la ventana lateral y cenital (m), y asumiendo:

$$K = C_s - C_R$$

Donde C_S coeficiente de presión estática del viento al nivel de la ventana lateral (adimensional) y C_R coeficiente de presión estática del viento al nivel de la ventana cenital (adimensional).

Sin embargo, después de realizar mediciones y experimentos, simplificaron su modelo, al percibir que el coeficiente K , estadísticamente, no era significativo, por lo que, finalmente, el modelo quedó definido de la siguiente manera (Kittas, Boulard et al. 1997, Roy, Boulard et al. 2002):

$$Q_v = C_d \left(2g \frac{T_{ii} - T_o}{T_o} \left(\frac{(A_r + A_s)^2}{A_r^2 + A_s^2} \right) + \left(\frac{A_r + A_s}{2} \right)^2 C_w u^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

4.1.4. Determinación de tasas de ventilación por el método de gases trazadores

Desde que iniciaron las investigaciones sobre el intercambio de aire en los invernaderos, a mediados de los años cincuenta del siglo pasado, se han utilizado diferentes técnicas para medir la infiltración (intercambio de aire con ventilas cerradas) y las tasas de ventilación (intercambio de aire con ventilas abiertas) de una manera más o menos directa. Las técnicas de gases trazadores, inicialmente, fue una de las más empleadas (Fernández y Bailey 1992). Esta técnica está basada en la inyección de un componente natural o artificial, llamado gas trazador, al interior del invernadero, para posteriormente realizar un balance de masa de este gas, asumiendo distribución uniforme del gas en el invernadero (Boulard y Draoui 1995, Baptista, Bailey et al. 1999). Los gases, a utilizar, en esta técnica deben cumplir ciertas propiedades como seguridad, no reactividad, insensibilidad, singularidad y mensurabilidad (Sherman 1990). Los gases trazadores más utilizados son: hexafluoruro de azufre (SF_6), metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), hidrógeno (H_2), óxido nitroso (N_2O), argón 41 y criptón 85. Sin embargo, el CO_2 y N_2O han sido los más utilizados en invernaderos, siendo empleado el N_2O en invernaderos con cultivos, esto con la finalidad de no afectar las mediciones de las concentraciones del gas con los procesos de fotosíntesis y respiración de las plantas (Boulard y Draoui 1995, Baptista, Bailey et al. 1999). En función del suministro o inyección del gas trazador al invernadero, se han definido dos métodos

principales: método estático o de inyección continua y método dinámico o de decaimiento. Independientemente del método a elegir, durante el experimento se deben medir las siguientes variables de interés: temperatura del aire interior y exterior, velocidad y dirección del viento, concentración interior y exterior del gas trazador y la apertura de la ventilas.

2.2.1.1. *Método de inyección continúa.*

El método estático se caracteriza por el suministro a una tasa constante del gas trazador, hasta que se alcanza una concentración de equilibrio. Durante la inyección del gas, se debe monitorear continuamente las variables de interés y la tasa de inyección del gas trazador. Después de obtener las mediciones se calcula la tasa de ventilación a partir de la siguiente expresión (Baptista, Bailey et al. 1999, Roy, Boulard et al. 2002):

$$G = \frac{M}{[C_i(t_1) - C_o(t_1)]} - \frac{V}{(t_2 - t_1)} L \left[\frac{C_i(t_2) - C_o(t_2)}{C_i(t_1) - C_o(t_1)} \right]$$

donde M es el flujo másico del gas que ingresa al invernadero, C_i y C_o son la concentración interna y externa de gas, V es el volumen del invernadero, t_1 y t_2 son mediciones secuenciales.

Este método ofrece ciertas ventajas dado que proporciona información continua, y se puede cubrir un rango de velocidad y dirección del viento durante una medición, por lo que se considera el ideal para el monitoreo automatizado. Sin embargo, dado que es muy preciso, también requiere de una mayor instrumentación (Baptista, Bailey et al. 1999, Roy, Boulard et al. 2002). Debido a este requerimiento, la mayoría de las investigaciones publicadas utilizan otros métodos, ya que son menos costosos en cuestión de monitoreo.

2.2.1.2. *Método de decaimiento*

El método dinámico o de decaimiento consiste en inyectar y distribuir el gas uniformemente a una concentración determinada, posteriormente detener el suministro y observar su decaimiento a lo largo del tiempo. Cuando la concentración ha disminuido a 80-90% del valor inicial, se inyecta nuevamente el gas y se mide

otra disminución (Kittas, Draoui et al. 1995, Baptista, Bailey et al. 1999). Durante la inyección se mide únicamente la concentración del gas (con la finalidad de apreciar el momento para interrumpir el suministro), durante la disminución, se miden las variables de interés y se mide la concentración del gas dentro y fuera del invernadero. Después de obtener las mediciones se calcula la tasa de ventilación, utilizando el procedimiento realizado por Bailey, Graves et al. (1993):

- 1) El logaritmo natural de $(C_i - C_o)$ son graficados en función del tiempo (C_i y C_o son la concentración interna y externa de gas).
- 2) Se selecciona un período de tiempo t durante el cual $\ln(C_i - C_o)$ disminuye linealmente.
- 3) Una regresión lineal se ajusta a los valores de $\ln(C_i - C_o)$ durante este período:

$$\ln(C_i - C_o) = a + N$$

donde N es la tasa de ventilación en los cambios de aire por hora y a es una constante. Esto es negativo porque la concentración del gas disminuye durante la medición. Para obtener la tasa de ventilación en m^3s^{-1} se utiliza la siguiente expresión:

$$n = \frac{N * V}{3600} \quad (\text{m}^3 \text{ s}^{-1})$$

- 4) Se obtienen los valores medios para la velocidad del viento, la dirección del viento y la temperatura interna y externa, durante el período de tiempo seleccionado.

4.1.5. Modelación numérica con CFD de la ventilación natural en invernaderos

La dinámica de fluidos computacional (CFD, por sus siglas en inglés), es una rama de la mecánica de fluidos que implementa algoritmos y análisis numérico para resolver problemas que involucran el flujo de fluidos y la transferencia de calor (Espinal-Montes, López-Cruz et al. 2015), dichas soluciones se obtienen a través de simulaciones computacionales. CFD se considera una potente herramienta de

simulación que utiliza computadoras y matemáticas aplicadas para modelar situaciones de flujo de fluidos para la predicción de la transferencia de calor, masa y momento en el diseño óptimo en procesos industriales (Xia y Sun 2002). Para llevar a cabo un análisis CFD, primeramente, se plantea el problema y se usa principios fundamentales de la física para expresarlo matemáticamente. Posteriormente por medio de códigos de CFD se incorporan estos principios en algoritmos preestablecidos y finalmente se resuelven los modelos por aproximaciones numéricas y los resultados se inspeccionan e interpretan (Xia y Sun 2002). Versteeg y Malalasekera (2007) señalan que estos códigos de CFD deben estar estructurados para abordar problemas de flujo de fluido ingresando parámetros de problemas y examinando los resultados. Por lo que, todos los códigos contienen tres elementos principales: (i) preprocesador; ii) solucionador; iii) postprocesador.

- i. El procesador define la geometría de la región de interés, genera el mallado de la geometría, selecciona de los fenómenos físicos a modelar y define las propiedades del fluido y las condiciones de frontera.
- ii. El solucionador integra las ecuaciones de control del flujo de fluidos en todos los volúmenes de control del dominio, discretizan o convierten las ecuaciones integrales resultantes en un sistema de ecuaciones algebraicas y finalmente soluciona las ecuaciones algebraicas mediante un método iterativo.
- iii. El postprocesador permite visualizar los resultados obtenidos en el solucionado a través de diferentes herramientas de visualización de datos, tales como gráficos de superficies 2D y 3D, gráficos vectoriales, gráficos de contorno y seguimiento de partículas.

Actualmente existe una gran cantidad de softwares de CFD, tanto comerciales, como de código abiertos. De estos, los más importantes son: ANSYS FLUENT, el software comercial más utilizado por las empresas por la comunidad científica, y OpenFOAM, el software gratuito de código abierto más utilizado por investigadores (Rojas-Sola, et al. 2016). Sin embargo, a nivel comercial y de investigación, los más

utilizados son los comerciales, debido a que estos incorporan algoritmos más robustos, eficientes y útiles para resolver problemas más complejos.

El software CFD utiliza solucionadores iterativos para discretizar y resolver las ecuaciones que gobiernan los fenómenos de estudio de fluidos. El solucionador segregado SIMPLE (Método Semi-Implícito para Ecuaciones Vinculadas a Presión), ideado por (Patankar y Spalding 1972), es utilizado por muchos paquetes comerciales, incluyendo ANSYS Fluent. El método SIMPLE determina el campo de presión indirectamente, cerrando las ecuaciones de momento discretizadas con las ecuaciones de continuidad de una manera secuencial (Norton y Sun 2006). Dado que CFD se empezó a aplicar a problemas más complejos, se desarrollaron nuevos solucionadores, basados en presión, más robustos y eficientes que el método SIMPLE, tal es el caso del solucionador acoplado, el indicado para flujos con una fuerte interferencia entre las variables como la combustión o la convección natural (Yoon y Park 2008).

Originalmente esta herramienta se empleó, potencialmente, en diversos procesos y áreas industriales y no industriales: aerodinámica de aviones, ingeniería eléctrica y electrónica, ingeniería ambiental, ingeniería biomédica, meteorología, etc., lo que condujo a la aplicación de ésta en el área de biosistemas, específicamente en construcciones pecuarias y en invernaderos.

En invernaderos se ha aplicado para analizar sistemas de ventilación, calefacción, humificación, gradientes térmicos diurnos y nocturnos, etc. Por ejemplo, Okushima, Sase et al. (1989) fueron los primeros en aplicar CFD para diseñar la ventilación natural. Su modelo CFD en 3D predijo la distribución del flujo de aire, la temperatura, la humedad y la concentración de CO_2 en diversas condiciones del invernadero (configuraciones y disposiciones de las aberturas del ventilador, las plantas y las condiciones meteorológicas). Mistriotis, Bot et al. (1997) y Mistriotis, Jong et al. (1997) se dieron cuenta de estas primeras aplicaciones de CFD, y utilizaron esta herramienta para analizar el flujo de aire interno, comprender las características estructurales de la ventilación y analizar la eficiencia de los sistemas de ventilación. A medida que se desarrollaban nuevas investigaciones, los modelos desarrollados

fueron más complejos, ya que analizaban diferentes modelos de turbulencia, modelos empíricos de plantas, modelos de transpiración de cultivo, mallas para el análisis de velocidad y dirección del viento y análisis del efecto de la configuración de las ventilas en el ambiente del invernadero (Norton, Sun et al. 2007).

Los primeros estudios sobre el efecto de la configuración de ventilación en el ambiente del invernaderos fueron realizados por (Bartzanas y Kittas, 2001, Bartzanas, Boulard et al., 2004), quienes analizaron 5 configuraciones distintas de ventilación para un invernadero de una sola bahía, equipado con una ventila cenital, 2 laterales enrollables y 2 laterales tipo puerta pivotante, con cultivo de jitomate. Después de analizar el perfil de temperaturas, obtener la tasa de ventilación para la configuración de aperturas, y evaluar los modelos, concluyeron que la configuración más eficiente fue la compuesta por la ventila cenital completamente abierta y las dos ventanas laterales enrollables completamente abiertas. Kacira, Sase et al. (2004) también investigaron el efecto de la presencia de las plantas y de las configuraciones de ventilación en las tasas de ventilación de un invernadero de vidrio de dos bahías equipado con dos ventanas laterales y cuatro ventanas cenitales (2 por cada bahía). El cultivo fue modelado como medio poroso, después de obtener las simulaciones para cada configuración de ventilación, concluyeron que las tasas máximas de ventilación del invernadero se lograron cuando las ventilas laterales y cenitales estaban completamente abiertos. Las más recientes investigaciones sobre la ventilación natural en invernadero se resumen en el Cuadro 2.5.

Cuadro 2.5 Investigaciones sobre el análisis de ventilación natural en invernaderos, mediante CFD

N° de investigación	Autor/es	Descripción de la investigación
1	(Santolini, Pulvirenti et al.)	Análisis CFD de la influencia de las pantallas de sombreado en la ventilación natural del invernadero

2	(Lee, Lee et al.)	Evaluación de la ventilación natural en invernaderos ubicados en zonas costeras, mediante CFD y técnica del gas trazador.
3	(He, Wang et al.)	Análisis CFD y optimización de la ventilación natural de un invernadero solar pasivo (tipo chino) con paredes traseras removibles
4	(Silva, Cordeiro Júnior et al.)	Modelación CFD y comparación entre la ventilación natural y la ventilación indirecta (mediante intercambiadores de calor en el suelo) de un invernadero mono bahía.
5	(Espinoza, López et al.)	Evaluar, mediante CFD, los efectos de la configuración de ventilas en el patrón de flujo aire en un invernadero mediterráneo de 3 bahías.
6	(Benni, Tassinari et al.)	Estudio, mediante CFD, de 3 configuraciones de ventilación natural de un invernadero italiano, con fines de control de temperatura del aire (enfriamiento) en verano.
7	(Teitel y Wenger)	Determinación de las tasas de ventilación de un invernadero mono bahía, utilizando tres métodos: CFD, gas trazador y diferencia de presiones.
8	(Flores-Velázquez, López-Cruz et al.)	Análisis de temperatura y flujo de aire, mediante CFD de un invernadero de 10 naves, a partir de la modelación de 4 diferentes combinaciones de apertura de ventanas laterales y cenitales.
9	(Fidaros, Baxevanou et al.)	Simulación CFD transitoria del comportamiento térmico de un invernadero con ventilación natural en un día solar, se modela el cultivo como medio poroso;
10	(Teitel, Ziskind et al.)	Estudio CFD del efecto de la dirección del viento sobre las tasas de ventilación, en un invernadero de 4 bahías ventilado con 3 ventilas cenitales.

11	(Romero-Gomez, L. Lopez-Cruz et al.)	Analizar numéricamente, CFD, el efecto de la velocidad del viento en las tasas de ventilación de un invernadero de 3 bahías, equipado con ventanas cenitales y laterales.
12	(Hong, Lee et al.)	Análisis de las eficiencias de ventilación de diversos invernadero típicos de Corea, bajo diferentes configuraciones de ventilas y direcciones del viento, mediante CFD y técnica de decaimiento del gas trazador

2.3. Literatura Citada

- Akyildiz, I. F., W. Su, Y. Sankarasubramaniam and E. Cayirci (2002). Wireless sensor networks: a survey. *Computer Networks* 38(4): 393-422. doi:[https://doi.org/10.1016/S1389-1286\(01\)00302-4](https://doi.org/10.1016/S1389-1286(01)00302-4)
- Anastasi, G., O. Farruggia, G. L. Re and M. Ortolani (2009). Monitoring High-Quality Wine Production using Wireless Sensor Networks. 2009 42nd Hawaii International Conference on System Sciences. doi: 10.1109/HICSS.2009.313
- Aqeel ur, R., A. Z. Abbasi, N. Islam and Z. A. Shaikh (2014). A review of wireless sensors and networks' applications in agriculture. *Computer Standards & Interfaces* 36(2): 263-270. doi:<https://doi.org/10.1016/j.csi.2011.03.004>
- Bailey, B., C. Graves and K. Cockshull (1993). Influence of wind speed and direction on the natural ventilation of a single span glasshouse. *Acta Horticulturae* on special issue of the International Workshop on Cooling Systems for Greenhouse. Tel Aviv.
- Baptista, F. J., Bailey, B. J., Randall, J. M., & Meneses, J. F. (1999). Greenhouse Ventilation Rate: Theory and Measurement with Tracer Gas Techniques. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 72(4), 363-374. doi:<https://doi.org/10.1006/jaer.1998.0381>
- Bartzanas, T. and C. Kittas (2001). Optimisation of greenhouses ventilation performance with computational fluid dynamics. 2nd Southeastern Europe Fluent Users Group Meeting, Bucharest Romania, CD-ROM, Simtec Eds., Thessaloniki, Greece.

- Bartzanas, T., T. Boulard and C. Kittas (2004). Effect of Vent Arrangement on Windward Ventilation of a Tunnel Greenhouse. *Biosystems Engineering* 88(4): 479-490. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2003.10.006>
- Benni, S., P. Tassinari, F. Bonora, A. Barbaresi and D. Torreggiani (2016). Efficacy of greenhouse natural ventilation: Environmental monitoring and CFD simulations of a study case. *Energy and Buildings* 125: 276-286. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.05.014>
- Boulard, T. and B. Draoui (1995). Natural Ventilation of a Greenhouse with Continuous Roof Vents: Measurements and Data Analysis. *Journal of Agricultural Engineering Research* 61(1): 27-35. doi:<https://doi.org/10.1006/jaer.1995.1027>
- Boulard, T., J. F. Meneses, M. Mermier and G. Papadakis (1996). The mechanisms involved in the natural ventilation of greenhouses. *Agricultural and Forest Meteorology* 79(1): 61-77. doi: [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(95\)02266-X](https://doi.org/10.1016/0168-1923(95)02266-X)
- Bournet, P.-E. y T. Boulard (2010). Effect of ventilator configuration on the distributed climate of greenhouses: A review of experimental and CFD studies. *Computers and Electronics in Agriculture* 74(2): 195-217. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compag.2010.08.007>
- Bruce, J. M. (1978). Natural convection through openings and its application to cattle building ventilation. *Journal of Agricultural Engineering Research* 23(2): 151-167. doi: [https://doi.org/10.1016/0021-8634\(78\)90046-X](https://doi.org/10.1016/0021-8634(78)90046-X)
- Bruce, J. M. (1982). Ventilation of a Model Livestock Building by Thermal Buoyancy. *Transactions of the ASAE* 25(6): 1724-1726. doi: 10.13031/2013.33796
- Espinal-Montes, V., I. L. López-Cruz, A. Rojano-Aguilar, E. Romantchik-Kriuchova and A. Ramírez-Arias (2015). Determinación de los gradientes térmicos nocturnos en un invernadero usando dinámica de fluidos computacional. *Agrociencia* 49: 233-247.
- Espinoza, K., A. López, D. L. Valera, F. D. Molina-Aiz, J. A. Torres and A. Peña (2017). Effects of ventilator configuration on the flow pattern of a naturally-ventilated three-span Mediterranean greenhouse. *Biosystems Engineering* 164: 13-30. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.10.001>
- Fei-qing, W., L. Lin-gong, M. Xiu-shui, Q. Jun and H. Xian-tu (2012). Development of Wireless Monitor System on Greenhouse Environment Based on GSM. *Future Control and Automation*, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg. doi: 10.1007/978-3-642-31006-5_44

- Ferentinos, K. P., N. Katsoulas, A. Tzounis, T. Bartzanas and C. Kittas (2017). Wireless sensor networks for greenhouse climate and plant condition assessment. *Biosystems Engineering* 153: 70-81. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.11.005>
- Fernández, J. E. and B. J. Bailey (1992). Measurement and prediction of greenhouse ventilation rates. *Agricultural and Forest Meteorology* 58(3): 229-245. doi:[https://doi.org/10.1016/0168-1923\(92\)90063-A](https://doi.org/10.1016/0168-1923(92)90063-A)
- Flores-Velázquez, J., I. López-Cruz, E. Mejía-Sáenz and J. J. A. Montero-Camacho (2014). Climate performance evaluation of a greenhouse in central México using computational fluid dynamics (CFD). *Agrociencia* 48(2): 131-146.
- Fidaros, D. K., C. A. Baxevanou, T. Bartzanas and C. Kittas (2010). Numerical simulation of thermal behavior of a ventilated arc greenhouse during a solar day. *Renewable Energy* 35(7): 1380-1386. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.11.013>
- Ghribi, B., & Logrippo, L. (2000). Understanding GPRS: the GSM packet radio service. *Computer Networks*, 34(5), 763-779. doi:[https://doi.org/10.1016/S1389-1286\(00\)00127-4](https://doi.org/10.1016/S1389-1286(00)00127-4)
- Gieling, T. H. (1998). SENSORS AND MEASUREMENT, A REVIEW, International Society for Horticultural Science (ISHS), Leuven, Belgium. doi:10.17660/ActaHortic.1998.421.1
- Hanan, J. J. (1984). Plant environmental measurement. California, Bookmakers Guild
- Haxaire, R., T. Boulard and M. Mermier (2000). Greenhouse natural ventilation by wind forces. International Society for Horticultural Science (ISHS), Leuven, Belgium. doi:10.17660/ActaHortic.2000.534.2
- He, X., J. Wang, S. Guo, J. Zhang, B. Wei, J. Sun and S. Shu (2018). Ventilation optimization of solar greenhouse with removable back walls based on CFD. *Computers and Electronics in Agriculture* 149: 16-25. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.10.001>
- He, J., Wang, J., He, D., Dong, J., & Wang, Y. (2011). The design and implementation of an integrated optimal fertilization decision support system. *Mathematical and Computer Modelling*, 54(3), 1167-1174. doi:<https://doi.org/10.1016/j.mcm.2010.11.050>
- Hong, S. W., I. B. Lee, H. S. Hwang, I. H. Seo, J. P. Bitog, J. I. Yoo, K. S. Kim, S. H. Lee, K. W. Kim and N. K. Yoon (2008). Numerical Simulation of Ventilation

- Efficiencies of Naturally Ventilated Multi-Span Greenhouses in Korea. Transactions of the ASABE 51(4): 1417-1432. doi:10.13031/2013.25235
- Huang, H., H. Bian, S. Zhu and J. Jin (2011). A Greenhouse Remote Monitoring System Based on GSM. 2011 International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering. doi:10.1109/ICIII.2011.231
- Iyengar, S. S., Jayasimha, D. N., & Nadig, D. (1994). A versatile architecture for the distributed sensor integration problem. IEEE Transactions on Computers, 43(2), 175-185. doi:10.1109/12.262122
- Jin, S., S. Jingling, H. Qiuyan, W. Shengde and Y. Yan (2007). A Remote Measurement and Control System for Greenhouse Based on GSM-SMS. 2007 8th International Conference on Electronic Measurement and Instruments. doi:10.1109/icemi.2007.4350806
- Kacira, M., S. Sase and L. Okushima (2004). Optimization of vent configuration by evaluating greenhouse and plant canopy ventilation rates under wind-induced ventilation. Transactions of the ASAE 47(6): 2059-2067. doi:10.13031/2013.17803
- Kim, Y., R. G. Evans and W. M. Iversen (2008). "Remote Sensing and Control of an Irrigation System Using a Distributed Wireless Sensor Network." IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement 57(7): 1379-1387. doi:10.1109/TIM.2008.917198
- Kim, Y., & Evans, R. G. (2009). Software design for wireless sensor-based site-specific irrigation. Computers and Electronics in Agriculture, 66(2), 159-165. doi:https://doi.org/10.1016/j.compag.2009.01.007
- Kittas, C., T. Boulard and G. Papadakis (1997). Natural ventilation of a greenhouse with ridge and side openings: sensitivity to temperature and wind effects. Transactions of the ASAE 40(2): 415-425. doi:10.13031/2013.2126
- Kittas, C., B. Draoui and T. Boulard (1995). Quantification du taux d'aération d'une serre à ouvrant continu en toiture. Agricultural and Forest Meteorology 77(1): 95-111. doi:https://doi.org/10.1016/0168-1923(95)02232-M
- Lee, S.-y., I.-b. Lee and R.-w. Kim (2018). Evaluation of wind-driven natural ventilation of single-span greenhouses built on reclaimed coastal land. Biosystems Engineering 171: 120-142. doi:https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.04.015

- Li, X.-h., X. Cheng, K. Yan and P. Gong (2010). A Monitoring System for Vegetable Greenhouses based on a Wireless Sensor Network. *Sensors* 10(10): 8963. doi:10.3390/s101008963
- Liu, G. and Y. Ying (2003). Application of Bluetooth technology in greenhouse environment, monitor and control. *J. Zhejiang Univ., Agric. Life Sci* 29(1): 329-334.
- Liu, H., Z. Meng and S. Cui (2007). A Wireless Sensor Network Prototype for Environmental Monitoring in Greenhouses. 2007 International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. doi:10.1109/WICOM.2007.584
- López-Martínez, J., J. L. Blanco-Claraco, J. Pérez-Alonso and Á. J. Callejón-Ferre (2018). Distributed network for measuring climatic parameters in heterogeneous environments: Application in a greenhouse. *Computers and Electronics in Agriculture* 145: 105-121. doi:https://doi.org/10.1016/j.compag.2007.12.004
- López Riquelme, J. A., F. Soto, J. Suardíaz, P. Sánchez, A. Iborra and J. A. Vera (2009). Wireless Sensor Networks for precision horticulture in Southern Spain. *Computers and Electronics in Agriculture* 68(1): 25-35. doi:https://doi.org/10.1016/j.compag.2009.04.006
- Ojha, T., S. Misra and N. S. Raghuwanshi (2015). Wireless sensor networks for agriculture: The state-of-the-art in practice and future challenges. *Computers and Electronics in Agriculture* 118: 66-84. doi: https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.302
- Othman, M. F. and K. Shazali (2012). Wireless Sensor Network Applications: A Study in Environment Monitoring System. *Procedia Engineering* 41: 1204-1210. doi:https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.302
- Patankar, S. V. and D. B. Spalding (1972). A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 15(10): 1787-1806. doi:https://doi.org/10.1016/0017-9310(72)90054-3
- Purnima, P. and S. R. N. Reddy (2012). Design of Remote Monitoring and Control System with Automatic Irrigation System using GSM-Bluetooth. *International Journal of Computer Applications* 47(12):6-13. doi: 10.5120/7238-9355
- Mendez, G. R., M. A. M. Yunus and S. C. Mukhopadhyay (2012). A WiFi based smart wireless sensor network for monitoring an agricultural environment.

- Mistriotis, A., G. P. A. Bot, P. Picuno and G. Scarascia-Mugnozza (1997). Analysis of the efficiency of greenhouse ventilation using computational fluid dynamics. *Agricultural and Forest Meteorology* 85(3): 217-228. doi:[https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(96\)02400-8](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(96)02400-8).
- Mistriotis, A., T. d. Jong, M. Wagemans and G. P. A. Bot (1997). Computational Fluid Dynamics (CFD) as a tool for the analysis of ventilation and indoor microclimate in agricultural buildings. *Netherlands Journal of Agricultural Science* 45: 81-96. doi:[https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)44447-8](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)44447-8)
- Morais, R., J. B. Cunha, M. Cordeiro, C. Serodio, P. Salgado and C. Couto (1996). Solar data acquisition wireless network for agricultural applications. *Proceedings of 19th Convention of Electrical and Electronics Engineers in Israel*. doi:10.1109/EEIS.1996.567032
- Morais, R., M. A. Fernandes, S. G. Matos, C. Serôdio, P. J. S. G. Ferreira and M. J. C. S. Reis (2008). A ZigBee multi-powered wireless acquisition device for remote sensing applications in precision viticulture. *Computers and Electronics in Agriculture* 62(2): 94-106. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compag.2007.12.004>
- Norton, T. and D.-W. Sun (2006). Computational fluid dynamics (CFD) – an effective and efficient design and analysis tool for the food industry: A review. *Trends in Food Science & Technology* 17(11): 600-620. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2006.05.004>
- Norton, T., D.-W. Sun, J. Grant, R. Fallon and V. Dodd (2007). Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the modelling and design of ventilation systems in the agricultural industry: A review. *Bioresource Technology* 98(12): 2386-2414. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.11.025>
- Okushima, L., S. Sase and M. Nara (1989). A support system for natural ventilation design of greenhouses based on computational aerodynamics, *International Society for Horticultural Science (ISHS)*, Leuven, Belgium. doi:10.17660/ActaHortic.1989.248.13
- Rojas-Sola, J. I., C. García-Baena and M. J. Hermoso-Orzáez (2016). A review of the computational fluid dynamics simulation software: advantages, disadvantages and main applications. *Journal of Magnetohydrodynamics and Plasma Research* 21(4): 417-424.

- Romero-Gomez, P., I. L. Lopez-Cruz and C. Y. Choi (2008). Analysis of greenhouse natural ventilation under the environmental conditions of Central Mexico. *Transactions of the ASABE* 51(5): 1753-1761. doi:10.13031/2013.25309
- Rosales Vicelis, J. E. (2016). Desarrollo de un sistema de monitoreo de déficit de presión de vapor en cultivos de invernadero. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.
- Roy, J. C., T. Boulard, C. Kittas and S. Wang (2002). PA—Precision Agriculture: Convective and Ventilation Transfers in Greenhouses, Part 1: the Greenhouse considered as a Perfectly Stirred Tank. *Biosystems Engineering* 83(1): 1-20. doi:https://doi.org/10.1006/bioe.2002.0107
- Ruiz-Garcia, L., L. Lunadei, P. Barreiro and J. I. Robla (2009). A review of wireless sensor technologies and applications in agriculture and food industry: state of the art and current trends. *Sensors (Basel, Switzerland)* 9(6): 4728-4750. doi:https://doi.org/10.3390/s90604728.
- Santolini, E., B. Pulvirenti, S. Benni, L. Barbaresi, D. Torreggiani and P. Tassinari (2018). Numerical study of wind-driven natural ventilation in a greenhouse with screens. *Computers and Electronics in Agriculture* 149: 41-53. doi:https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.09.027
- Serodio, C., J. B. Cunha, M. Cordeiro, A. Valente, R. Morais, P. Salgado and C. Couto (1997). MNet-DACS: multi-level network data acquisition and control system. *ISIE '97 Proceeding of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics*. doi:10.1109/ISIE.1997.651787
- Serodio, C., J. B. Cunha, R. Morais, C. Couto and J. Monteiro (1998). A Network for Agricultural Management Systems: The Communications and Control Platforms. *IFAC Proceedings Volumes* 31(12): 319-324. doi:https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)36084-6.
- Sherman, M. H. (1990). Tracer-gas techniques for measuring ventilation in a single zone. *Building and Environment* 25(4): 365-374. doi:https://doi.org/10.1016/0360-1323(90)90010-O
- Silva, R. C. d., J. J. F. Cordeiro Júnior, H. Pandorfi, R. B. Vigoderis and C. Guiselini (2017). Simulation of ventilation systems in a protected environment using computational fluid dynamics. *Engenharia Agrícola* 37: 414-425. doi:http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v37n3p414-425/2017
- Teitel, M. and E. Wenger (2014). Air exchange and ventilation efficiencies of a monospan greenhouse with one inflow and one outflow through longitudinal

- side openings. *Biosystems Engineering* 119: 98-107. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2013.11.001>
- Teitel, M., G. Ziskind, O. Liran, V. Dubovsky and R. Letan (2008). Effect of wind direction on greenhouse ventilation rate, airflow patterns and temperature distributions. *Biosystems Engineering* 101(3): 351-369. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2008.09.004>
- Versteeg, H. K. and W. Malalasekera (2007). An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method, Pearson Education.
- Vox, G., P. Losito, F. Valente, R. Consoletti, G. Scarascia-Mugnozza, E. Schettini, C. Marzocca and F. Corsi (2014). A wireless telecommunications network for real-time monitoring of greenhouse microclimate. *Journal of Agricultural Engineering* 45(2):70-79. doi:10.4081/jae.2014.237.
- Wang, N., N. Zhang and M. Wang (2006). Wireless sensors in agriculture and food industry—Recent development and future perspective. *Computers and Electronics in Agriculture* 50(1): 1-14. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compag.2005.09.003>
- Yoon, C. and J. H. Park (2008). Development of a CFD model for the CANDU-6 moderator analysis using a coupled solver. *Annals of Nuclear Energy* 35(6): 1041-1049. doi:<https://doi.org/10.1016/j.anucene.2007.11.013>
- Yu, C., Cui, Y., Zhang, L., & Yang, S. (2009, 24-26 Sept. 2009). ZigBee Wireless Sensor Network in Environmental Monitoring Applications. Paper presented at the 2009 5th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. doi:10.1109/WICOM.2009.5304242
- Xia, B. and D.-W. Sun (2002). Applications of computational fluid dynamics (cf) in the food industry: a review. *Computers and Electronics in Agriculture* 34(1): 5-24. doi:[https://doi.org/10.1016/S0168-1699\(01\)00177-6](https://doi.org/10.1016/S0168-1699(01)00177-6)
- Zhang, Q., X.-l. Yang, Y.-m. Zhou, L.-r. Wang and X.-s. Guo (2007). A wireless solution for greenhouse monitoring and control system based on ZigBee technology. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A* 8(10): 1584-1587. doi:10.1631/jzus.2007.A1584
- Zhou, Y., X. Yang, X. Guo, M. Zhou and L. Wang (2007). A Design of Greenhouse Monitoring & Control System Based on ZigBee Wireless Sensor Network. 2007 International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. doi:10.1109/WICOM.2007.638

- Zhu, Y., J. Song and F. Dong (2011). Applications of wireless sensor network in the agriculture environment monitoring. *Procedia Engineering* 16: 608-614. doi:<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.08.1131>
- Zhu, Y., X. Zhong and J. Shi (2006). The design of wireless sensor network system based on zigbee technology for greenhouse. *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing. doi:10.1088/1742-6596/48/1/223

3. RED DE SENSORES DISTRIBUIDOS PARA EL ANALISIS ESPACIAL DEL AMBIENTE DE UN INVERNADERO CON VENTILACIÓN NATURAL.

3. WIRELESS NETWORK SENSORS FOR THE SPATIAL ANALYSIS OF THE ENVIRONMENT OF A NATURALLY VENTILATED GREENHOUSE

José Eduardo Rosales Vicelis¹; Efrén Fitz Rodríguez^{1*};

¹Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo.
Carretera México-Texcoco, km 38.5, Chapingo, Estado de México, C. P. 56230, México.

Resumen

El monitoreo climático en invernaderos es una labor esencial para el manejo adecuado de cultivos. El monitoreo climático puntual considera, erróneamente, el ambiente del invernadero como homogéneo, lo cual es relevante para aquellas investigaciones que determinan la eficiencia de los sistemas de ventilación natural, enfriamiento y calefacción en invernaderos. Una mejora a este tipo de monitoreo, es el monitoreo distribuido o espacial; el cual aporta información precisa del ambiente interno del invernadero para la utilización de los principales sistemas de control del clima. Por lo tanto, se desarrolló un sistema de monitoreo distribuido, basado en una red de sensores inalámbricos (WSN) y en una red de sensores alámbricos, ambas de bajo costo, para la temperatura del aire. La WSN desarrollada consta de 10 nodos sensores y un nodo receptor; los nodos sensores fueron energizados mediante celdas solares; se estableció una comunicación por radiofrecuencia; la información que recibe el nodo receptor es enviada a un servidor de internet a través de un módulo WiFi, mientras que la red de sensores alámbricos consta de 10 sensores conectados mediante cables de red a un datalogger de bajo costo. El sistema fue evaluado durante la apertura de ventilas de un invernadero, con la finalidad de analizar la distribución y comportamiento de la temperatura del aire y evaluar la eficiencia de la ventilación. Los resultados de la evaluación del sistema indicaron que la WSN funciona sin errores en la comunicación nodos-receptor, y por ende sin pérdida de datos; sin embargo, el principal problema que presenta es la alimentación energética de los nodos sensores, ya que solo puede ser utilizado por algunas horas. Esta evaluación nos permitió exponer la heterogeneidad de la temperatura del aire en el invernadero antes y después de la apertura de ventilas del invernadero.

Palabras clave: Red de Sensores Inalámbrica, Monitoreo de invernaderos, Software y Hardware libre, Internet de las cosas.

3.1 Introducción

El monitoreo del ambiente en los invernaderos es una tarea esencial que todo productor debe realizar para conocer las condiciones donde se desarrolla el cultivo. A partir del monitoreo del ambiente se establecen las estrategias de control necesarias para optimizar el rendimiento del cultivo. Una simplificación que se realiza en los invernaderos es que el ambiente es uniforme espacialmente, lo cual no ocurre dado que se presentan gradientes de los factores climáticos (temperatura del aire, humedad relativa, déficit de presión de vapor) que pueden ser de gran magnitud. Estos gradientes ambientales se ven reflejados en la uniformidad en la producción tanto en cantidad como en la calidad. Al mismo tiempo también se generando problemas de plagas y enfermedades en las zonas del invernadero que tienen temperaturas y niveles de humedad menos favorables (Molina-Aiz, Fatnassi et al. 2010). Este tipo de monitoreo se realiza a través de una distribución espacial de sensores al interior del invernadero, lo cual, anteriormente, representaba la instalación de una compleja red de cables de alimentación y comunicación con un registrador de datos principal. Sin embargo, con el desarrollo de tecnologías inalámbricas y su incorporación en el sector agropecuario, se han propuesto una gran cantidad de sistemas monitoreo basado tecnologías inalámbricas. Después de la incorporación de estas tecnologías, el diseño de una red de sensores inalámbricos ha conllevado a la solución de nuevos retos tecnológicos como tolerancia a fallas; escalabilidad; costos de producción; ambiente operativo; topología de red de sensores; restricciones de hardware; medios de transmisión; y consumo de energía (Akyildiz, Su et al. 2002). Con el avance tecnológico, estos problemas se han venido solventando por diferentes empresas de tecnologías inalámbricas. Actualmente las tecnologías de comunicación inalámbricas, que incluyen: ZigBee, Wifi, Bluetooth, GPRS/3G/4G y WiMAX, son algunas de las que se han aplicado en la agricultura. Cada una con su respectivo protocolo de comunicación estándar, plataforma de procesamiento y parámetros como rango, frecuencia, costo, consumo de energía, seguridad, etc. (Ojha, Misra et al. 2015). En este tipo de aplicaciones, la tecnología ZigBee ha sido la más utilizada sobre otras tecnologías para el desarrollo de la red de sensores inalámbricos debido a su bajo

costo y bajo consumo energético (Aqeel ur, Abbasi et al. 2014). A pesar de esto, actualmente, existen otras tecnologías de características similares al ZigBee, en cuanto a velocidad de envío de datos, frecuencia y rango, como son los transceptores NRF24L01, que son de costo y consumo energético menor al de la tecnología ZigBee. Sin embargo, la seguridad de esta tecnología está restringida a únicamente 5 bytes, comparado con los 16 bytes de la tecnología ZigBee, característica que no es tan relevante dada su aplicación en medianas y bajas unidades productivas. El objetivo de esta investigación es diseñar una arquitectura de red inalámbrica para el monitoreo de temperatura y humedad relativa en el aire, de bajo costo, basado en tecnología por radiofrecuencia y energéticamente autosuficiente para pequeñas y medianas unidades productivas.

3.2. Materiales y Métodos

3.2.1. Red de Sensores Inalámbricos

El sistema de monitoreo inalámbrico (Figura 3.1) está constituido principalmente por un conjunto de dispositivos electrónicos denominados nodos. Estos nodos comunicados entre sí comprenden la red de sensores inalámbricos (WSN, por sus siglas en inglés). La WSN se comunica con una computadora a través de internet, para que finalmente los datos de la WSN sean almacenados en una plataforma abierta de internet de las cosas (IoT, por sus siglas en inglés).

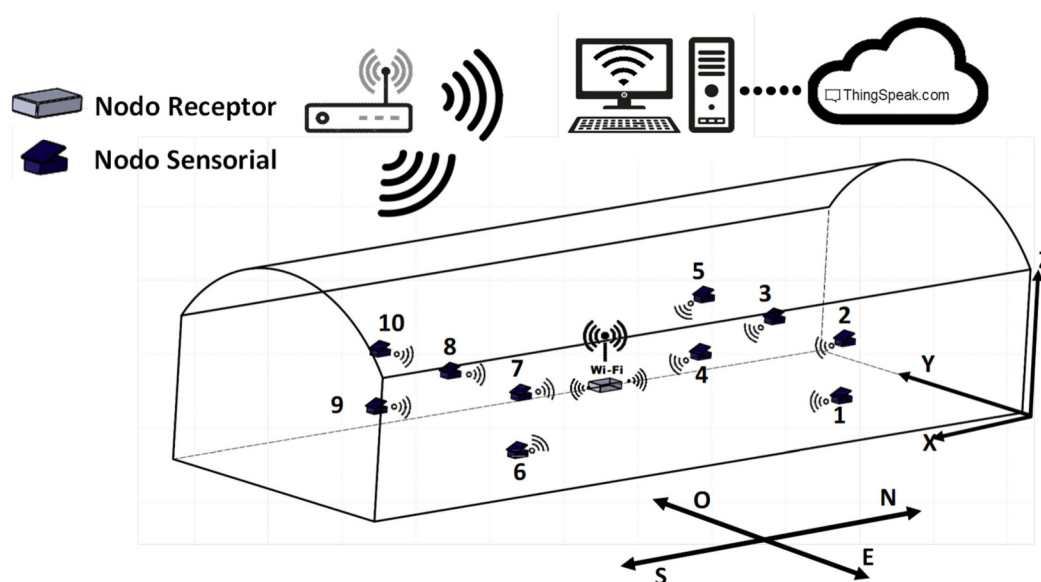


Figura 3.1. Estructura y localización del sistema de monitoreo inalámbrico

La WSN está constituida por 11 dispositivos denominados nodos. De los cuales se definieron dos tipos de nodos: 10 nodos sensores y 1 nodo maestro.

3.2.1.1. Nodo Sensor

Las funciones de este dispositivo incluyen: medir, calcular, almacenar, sincronizar y comunicar. Para llevar a cabo cada una de estas tareas, hace uso de varios módulos, incluyendo: módulo de comunicación, módulo de adquisición de datos, módulo de procesamiento, módulo de energía, módulo de almacenamiento, modulo reloj en tiempo real y un ventilador (Figura 3.2). La incorporación de un ventilador al sistema, se realizó con la finalidad generar un flujo de aire sobre el elemento sensor y evitar el problema del calentamiento de los sensores por radiación y conducción de los componentes electrónicos. Esto es uno de los principales fuentes de error en las mediciones de la temperatura del aire y debe abordarse (Anderson y Baumgartner 1998).

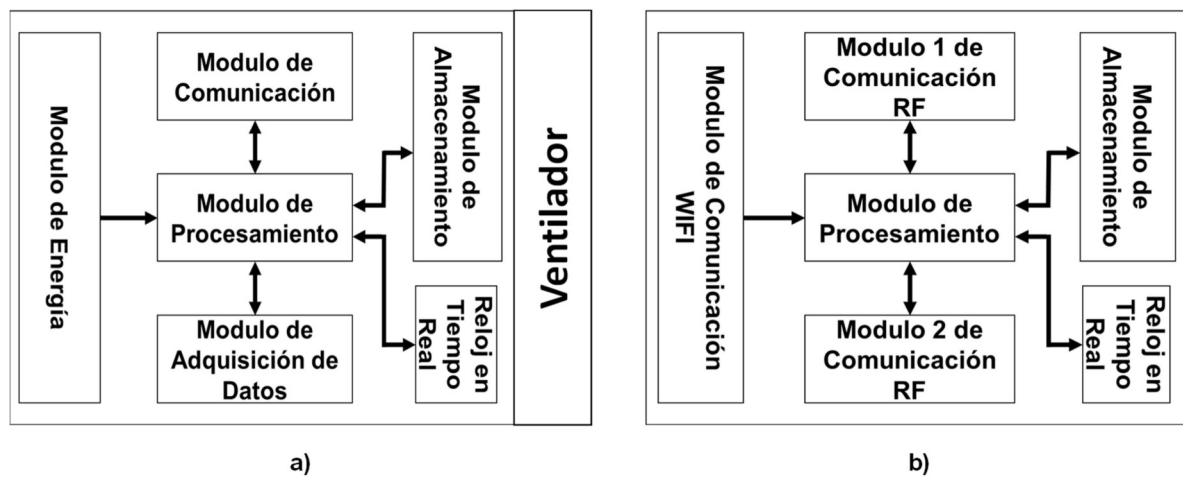


Figura 3.2 Módulos componentes de los nodos de la WSN: a) Nodos Sensores; b) Nodo Receptor

3.2.1.2. Módulo de comunicación RF

El módulo de comunicación se compone por un transceptor nRF24L01 (Nordic Semiconductor, Trondheim, Norway). El transceptor es un módulo de radiofrecuencia cuya banda de operación ISM (Industrial, Científica, Medica) es de 2.4GHz, con una velocidad de transferencia de datos de hasta 2 Mbps, consumo energético de operación ultra bajo, acelerador de protocolo de comunicación por

hardware Enhanced ShockBurst™, función MultiCeiver™ que permite establecer comunicación con hasta 6 canales de datos en paralelo y con direcciones únicas, rango de suministro de voltaje de 1.9 a 3.6V DC y únicamente puede ser operado y configurado por un MCU (microcontrolador) a través del protocolo de comunicación SPI (Serial Peripheral Interface).

3.2.1.3. Módulo de adquisición de datos

El módulo de adquisición de datos consta de un sensor de temperatura y humedad relativa DHT22 (Guangzhou Aosong Electronics Co., Ltd., Guangzhou Huangpu District, China). Este sensor es del tipo capacitivo, con salida digital a través de un solo cable (un solo paquete de datos para temperatura y humedad relativa), de bajo consumo energético, distancia de transmisión de datos hasta 100 m, señal digital calibrada, rango de suministro de voltaje de 3.3 a 5.5 V DC, operado mediante un MCU a través del protocolo de comunicación serial.

3.2.1.4. Módulo de procesamiento

El módulo de procesamiento consta de una placa de desarrollo de hardware y software libre Arduino Nano (Arduino™, Turin, Italia) y la cual está basado en el microcontrolador ATmega328P. La placa de desarrollo se caracteriza por su tamaño compacto, bajo consumo energético y fácil manera de programación (cable Mini USB), opera con un voltaje de 5 V, el cual puede ser alimentado a través de su conexión USB Mini-B, o directamente en sus pines de alimentación de la placa, cuenta con 14 salidas/entradas digitales y 8 analógicas, frecuencia de trabajo de 16 MHz y Memoria Flash de 32 KB.

3.2.1.5. Módulo de energía

El módulo de energía lo forman una serie de dispositivos conectados entre sí, con el objetivo particular de recolectar la suficiente energía proveniente del sol, para almacenarla en una batería, la cual alimentará el módulo de procesamiento. Los dispositivos que comprenden este módulo son: celda fotovoltaica, controlador de carga para baterías de Litio, batería de litio y un elevador de voltaje DC (Figura 3.3). La celda fotovoltaica del módulo de energía se eligió de acuerdo con las

necesidades energéticas de los diferentes módulos que constituyen el nodo sensor. De acuerdo con el consumo total del sistema (Cuadro 3.1), se eligió la celda solar con un mayor suministro de corriente. En base a lo anterior, se eligió una celda de 5 V @ 280 mA, la cual permite suministrar una corriente máxima de 280 mA bajo radiación directa.

Cuadro 3.1 Consumo de corriente y voltaje de los principales módulos que constituyen el nodo sensor

Modulo	Voltaje (V)	Corriente máxima (mA)
Comunicación RF	3.3	14
Procesamiento	5.0	35
Adquisición de datos	5.0	2
Almacenamiento de datos	3.3	200
Reloj RTC	3.3	1
Energía	5.0	1
Ventilador	5.0	200
Total	5.0	453

El módulo de carga (Figura3.3) funciona con dos modalidades de operación, incluyendo: 1) la celda solar, bajo condiciones ideales de radiación solar directa, suministra un voltaje de 5 V @ 280 mA; dicho voltaje y amperaje permite recargar la batería de litio 18650 de 3.7 V y 2000 mAh y 2) cuando el sistema está en funcionamiento, se utiliza la energía almacenada en la batería, la cual pasa a través del controlador de carga y después a través del elevador de voltaje, cuya función es elevar a 5V el voltaje recibido, el voltaje de salida es suministrado al microcontrolador a través de un cable USB-MINI B.

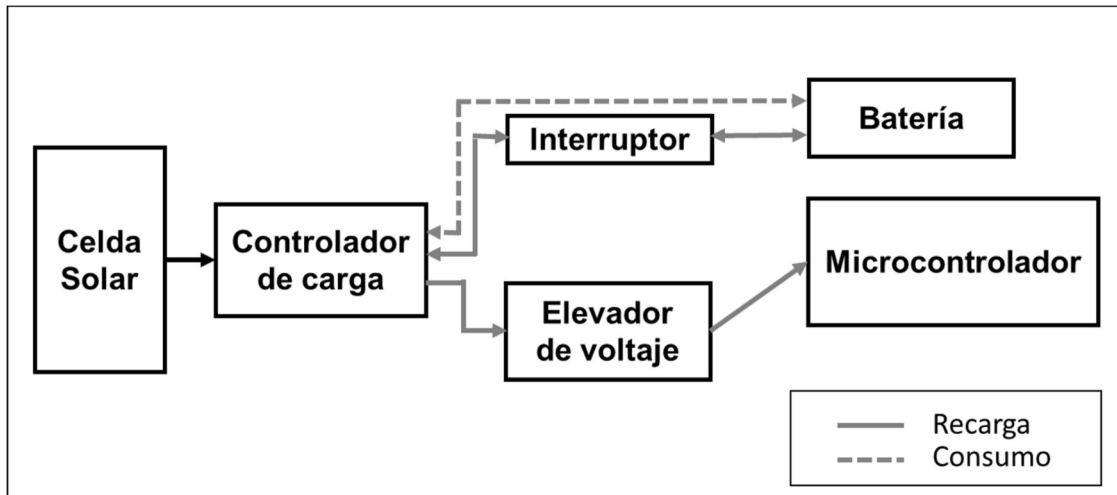


Figura 3.3 Componentes esenciales del módulo de energía del nodo sensor

Bajo las características antes mencionadas se espera un tiempo de trabajo, sin exposición a radiación solar y con batería recargada totalmente, de 4.41 horas: bajo condiciones de radiación solar directa, se espera obtener 11.56 horas de trabajo.

3.2.1.6. Módulo de almacenamiento micro SD

El módulo de almacenamiento externo se compone de un mini módulo micro SD, (Shenzhen LC Technology Co., Ltd., cd, China). Este se caracteriza por su tamaño pequeño (18 x 18 x 11 mm), interfaz de tarjeta micro SD emergente integrada, alimentado con un voltaje de 3.3 V y únicamente puede ser operado y configurado por un MCU (microcontrolador Arduino AVR ARM) a través del protocolo de comunicación SPI.

3.2.1.7. Módulo de reloj de tiempo real

Este módulo incluye un mini reloj RTC DS3231 (Shenzhen Xiangyangwei Electronics Co., Ltd., China), y se utiliza para establecer la frecuencia de mediciones del sensor de temperatura. El módulo, de dimensiones 14x16x12 mm, se programa con un microcontrolador, a través del protocolo de comunicación I²C y alimentándolo con 3.3 V, bajo consumo de energía (<1mA), incorpora una batería externa CR1220 que mantiene el horario programado cuando se interrumpe la alimentación del microcontrolador.

3.2.1.2. Nodo Receptor

Este dispositivo tiene como función solicitar, recibir, almacenar y enviar a un servidor de internet la información del ambiente (temperatura y humedad relativa), proveniente de cada nodo sensor. Para llevar a cabo estas funciones, este nodo se compone de 5 módulos principales: dos módulos de comunicación RF, módulo de comunicación WiFi, módulo de almacenamiento y módulo de medición de tiempo real. Los módulos de comunicación están constituidos, al igual que el módulo de comunicación del nodo sensor por el transceptor nrf24l901.

3.2.1.3. Módulo de comunicación WiFi

Este módulo contiene el dispositivo ESP-01, basado en el chip esp8266, una diminuta plataforma de conectividad WiFi (Espressif Systems, Pte. Ltd. Shanghai, China), cuyas características principales son las siguientes: voltaje de alimentación de 3.3 V, protocolo 802.11 b/g/n, incorpora sensor de temperatura, soporte del protocolo TCP/IP, CPU de 32 bits para aplicaciones como procesador, y puede ser operado por un MCU, a través de una conexión Serial (UART).

3.2.1.4. Módulo de almacenamiento SD

El módulo de almacenamiento externo para este nodo está constituido por la tarjeta SD, (Shenzhen LC Technology Co., Ltd., China). Módulo de dimensiones 5 x 1.3 x 3.4 cm, que incorpora un regulador de tensión para ser alimentado con un voltaje de 3.3 V o 5, diseñado con interfaz de comunicación doble (SDIO y SPI) para ser operado y configurado por un MCU (microcontrolador Arduino AVR ARM),

3.2.1.5. Módulo de procesamiento

El módulo de procesamiento consta de una placa de desarrollo de hardware Arduino UNO (ArduinoTM, Turin, Italia), y la cual está basado en el microcontrolador ATmega328P. La placa de desarrollo se caracteriza por su utilidad y versatilidad para el desarrollo de circuitos electrónicos; alimentación a través del conector USB (5 V), conector de alimentación DC (7-12 V) o pines de alimentación de la placa (7-12 V); placa con 14 salidas/entradas digitales y 6 analógicas, velocidad 16 MHz y Memoria Flash de 32 KB.

3.2.1.6. *Modulo reloj de tiempo real.*

Este módulo lo comprende el reloj DS3231 for Arduino (Kuongshun Electronic Company, China), de dimensiones 37.5 x 22 x 15 mm, el cual está basado en el circuito integrado DS3231 de alta precisión. El modulo se programa con un microcontrolador, a través del protocolo de comunicación I2C y alimentándolo con 5 V, incorpora un soporte para batería CR203, también incluida.



Figura 3.4. Nodo sensor de la red inalámbrica para monitoreo del clima de un invernadero

3.2.1.3. **Comunicación inalámbrica.**

Para poder establecer la comunicación entre el nodo receptor y los nodos sensores, el nodo receptor utiliza los dos transceptores NRF24L01 como dispositivos maestros. Cada maestro se comunica con 5 nodos sensores, a través de sus respectivos transceptores NRF24L01, que funcionan como dispositivos esclavos. Para establecer la comunicación dual, el maestro se comunica con cada esclavo a través de dos canales de comunicación, uno de escritura y otro de lectura, diferenciados por entre sí por direcciones de 5 bytes de longitud (Figura 3.5).

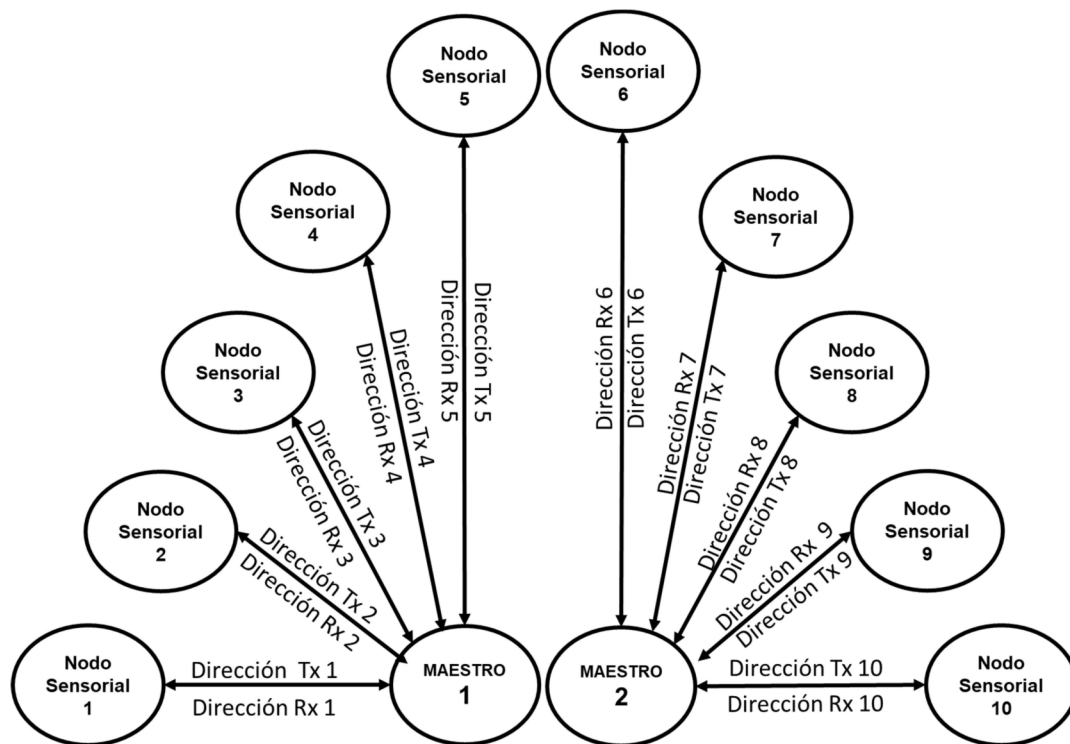


Figura 3.5 Comunicación inalámbrica entre los módulos de comunicación de los nodos que constituyen la WSN

El protocolo de comunicación (Figura 3.5) comienza cuando el maestro, en cada inicio de minuto, realiza la petición de información a cada uno de los esclavos a través de la dirección de escritura. Cada nodo sensor recibe esta petición, lee su correspondiente, y envía la información (temperatura y humedad relativa) requerida al maestro, a través del canal de lectura. Después de realizar la petición, el nodo maestro se encarga de esperar la información enviada por el nodo sensor y registrarla. Una vez que recibe la información de todos los nodos sensores, se almacena dicha información en la memoria SD, y envía dicha información al servidor de internet por medio del módulo WiFi.

El nodo sensor (Figura 3.6), a través del módulo de procesamiento, solicita la información de temperatura y humedad relativa del aire al sensor DHT22, a una frecuencia de muestreo de 10 segundos, registrando y guardando esta información solicitada en la memoria MicroSD.

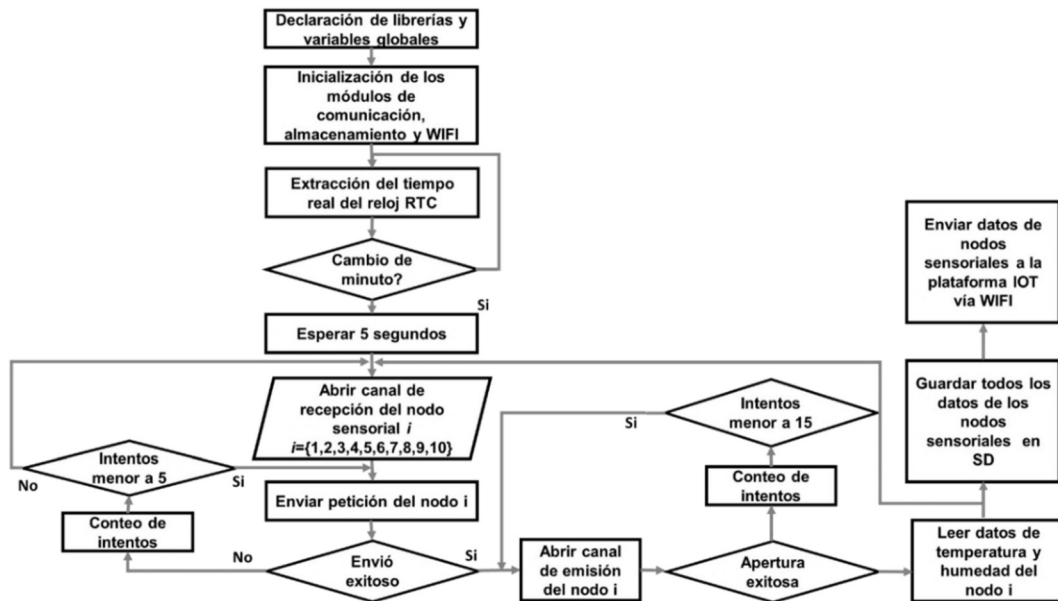


Figura 3.6 Diagrama de flujo del funcionamiento del nodo receptor

Cada inicio de minuto, el nodo sensor promedia los valores registrados y está información la almacena en otro archivo de la MicroSD; posteriormente espera la petición del nodo receptor para establecer la comunicación inalámbrica; el intercambio de información se realiza en menos de 10 segundos, para después continuar con la medición de las variables climáticas.

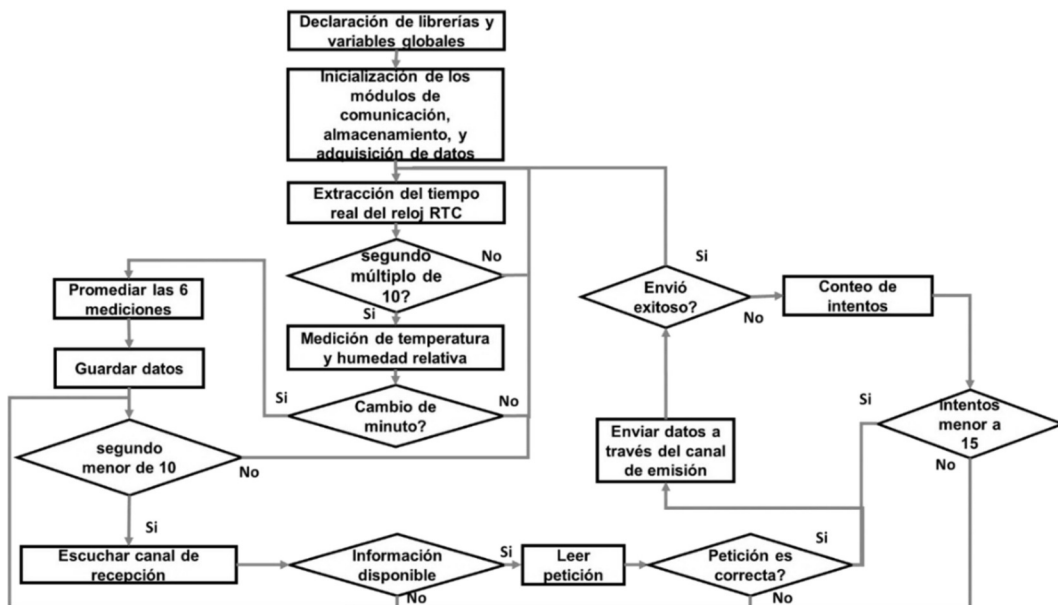


Figura 3.7 Diagrama de flujo del funcionamiento del nodo sensor

3.2.2. Red de Sensores Alámbricos

La red de sensores alámbrica está compuesta de 10 sensores de temperatura DHT22; cada sensor fue colocado en un tubo de PBC de 2 pulgadas de diámetro y 40 cm de longitud. El tubo fue protegido de la radiación solar con papel aluminio, se le acopló un filtro de aire en uno de sus extremos, para proteger al sensor de partículas de polvo y se le acopló un ventilador de 5V, para aspirar los sensores y eliminar errores en la medición (Figura 3.8).

Esta red fue colocada sobre el plano transversal central del invernadero y los sensores fueron conectados a un datalogger basado en el microcontrolador ARDUINO MEGA 2560. Esta red de sensores alámbricos y la WSN fueron colocados a diferentes puntos del invernadero (Cuadro 3.2) con la finalidad de monitorear y caracterizar la distribución de temperatura del aire y definir la homogenización del ambiente en el invernadero.



Figura 3.8 Sensor alámbrico protegido e instalado en el invernadero

Cuadro 3.2 Coordenadas de la ubicación de sensores en el invernadero

Red de sensores	Sensor	Ubicación		
		Y(m)	X (m)	Z (m)
Alámbrica	S1	1.5	15	1
	S2	1.5	15	3
	S3	1.5	15	5
	S4	5	15	1
	S5	5	15	3
	S6	5	15	5
	S7	8.5	15	1
	S8	8.5	15	3
	S9	8.5	15	5
	S10	5	15	6.6
WSN	N1	1.5	7.5	1
	N2	1.5	7.5	3
	N3	5	7.5	3
	N4	8.5	7.5	1
	N5	8.5	7.5	3
	N6	1.5	22.5	1
	N7	1.5	22.5	3
	N8	5	22.5	3
	N9	8.5	22.5	1
	N10	8.5	22.5	3

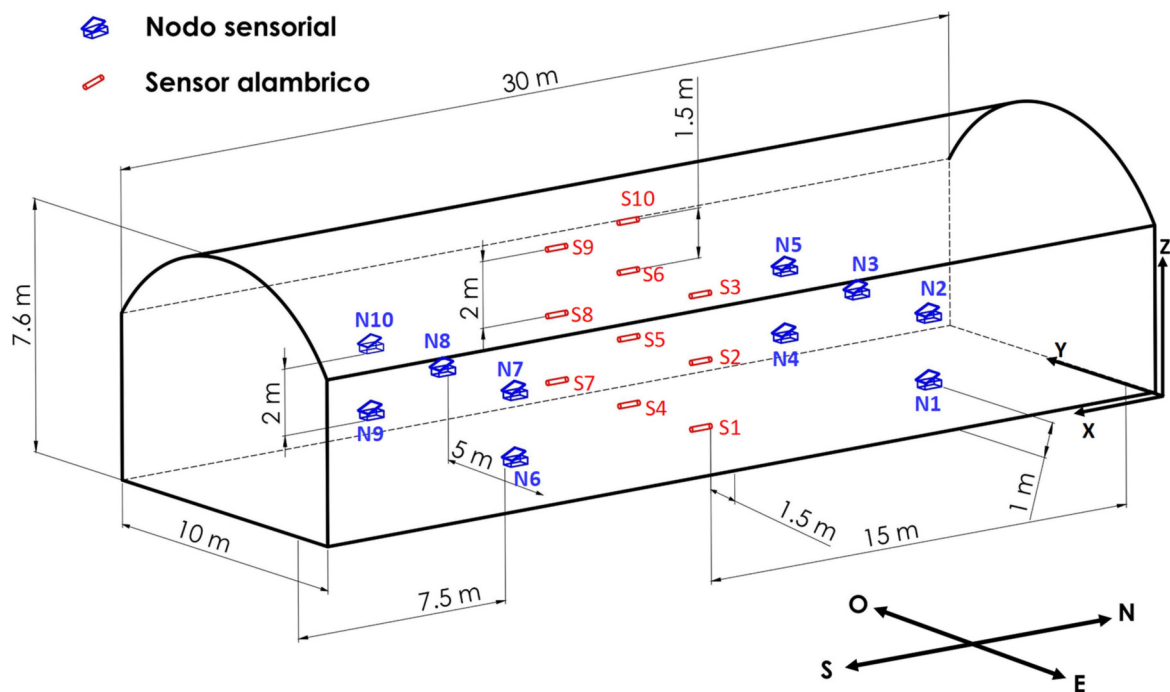


Figura 3.9 Ubicación de la WSN y Red de Sensores Alámbricos en el invernadero.

3.2.3. Evaluación del sistema y análisis de la temperatura del aire

El sistema de monitoreo se evaluó mientras se realizaron experimentos con diferentes configuraciones de la ventilación natural del invernadero. Para evaluar este sistema se realizaron 5 experimentos de ventilación, cada experimento, con una respectiva configuración de ventilación, utilizando una determinada nomenclatura (Cuadro 3.2).

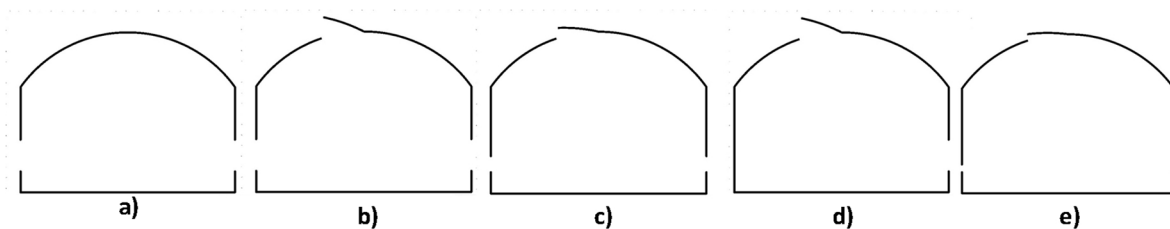


Figura 3.10 Configuraciones de ventilaciones para la evaluación del sistema de monitoreo.

Cuadro 3.3. Nomenclatura de las configuraciones de ventilación

Configuración	Descripción	Nomenclatura
a)	Ventilas laterales al 75%;	Le50-Lo50-Ce0-Co0
b)	Ventilas Laterales al 50 % y Ventila Cenital Oeste al 100%;	Le50-Lo50-Ce0-Co100
c)	Ventilas Laterales al 25% y Ventila Cenital Oeste al 50%;	Le25-Lo25-Ce0-Co50
d)	Ventila Lateral Este al 25% y Ventila Cenital Oeste al 25%	Le25-Lo0-Ce0-Co25
e)	Ventilas Laterales al 12.5% y Ventila Cenital Oeste al 25%.	Le12.5-Lo12.5-Ce0-Co25

3.3. Resultados y Discusión

En cada experimento realizado se verificó la comunicación inalámbrica entre el nodo receptor y los nodos sensores. Los datos recibidos por el nodo receptor fueron almacenados en un dispositivo de almacenamiento USB y enviado a un servidor de internet. La comunicación establecida no presenta pérdida de información o datos medidos; sin embargo, dado que el nodo sensor hace uso del ventilador, se genera un alto consumo de energía, originando que los dispositivos solo puedan ser utilizados durante un tiempo no mayor a 3 horas con carga completa. Los datos registrados, tanto por la WSN y la red alámbrica de sensores fueron graficados para analizar el comportamiento de la temperatura del aire antes y después de la apertura de ventilas.

3.4.1. Apertura Le50-Lo50-Ce0-Co0

Los datos proporcionados por la WSN (Figura 3.11) muestran una serie de datos que se van estabilizando durante los primeros minutos de encendido del sistema, dicho comportamiento se debe a que sensor está aspirado, lo que permite que en este tiempo realice las correcciones de exactitud y no se presente problemas de mediciones erróneas; dicho comportamiento no ocurre en la red de sensores alámbricos, los cuales presentan mediciones uniformes. Antes de la apertura de

ventilas, existe un pequeño gradiente de alrededor de 2 °C, el cual aumenta después de la apertura. Esto se debe básicamente a la configuración de ventilas, ya que existe una disminución importante de temperatura, sin embargo esto solo ocurre en las zonas bajas del invernadero (Figura 3.13), específicamente a la altura de la apertura de ventilas.

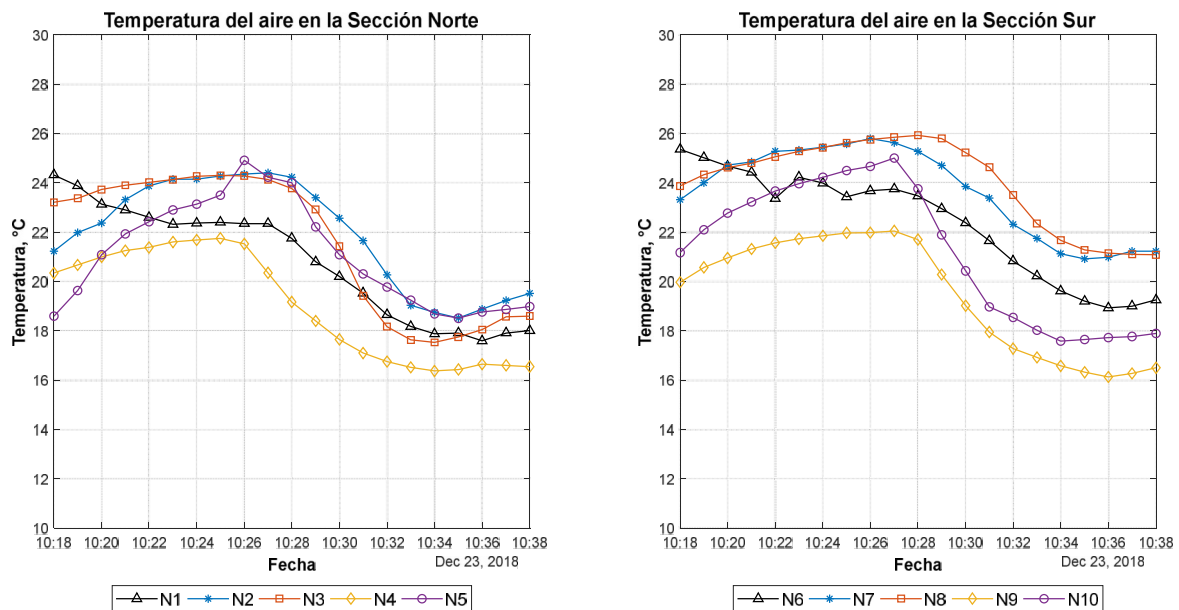


Figura 3.11. Mediciones de la WSN para apertura Le50-Lo50-Ce0-Co0

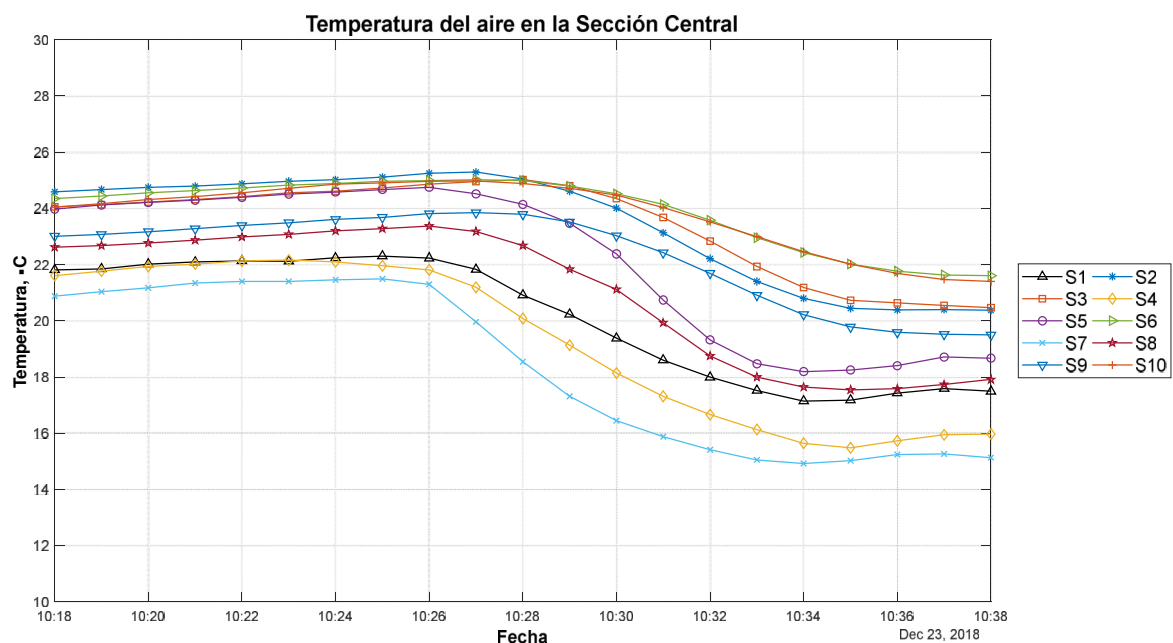


Figura 3.12. Mediciones de la red alámbrica para la apertura Le50-Lo50-Ce0-Co0

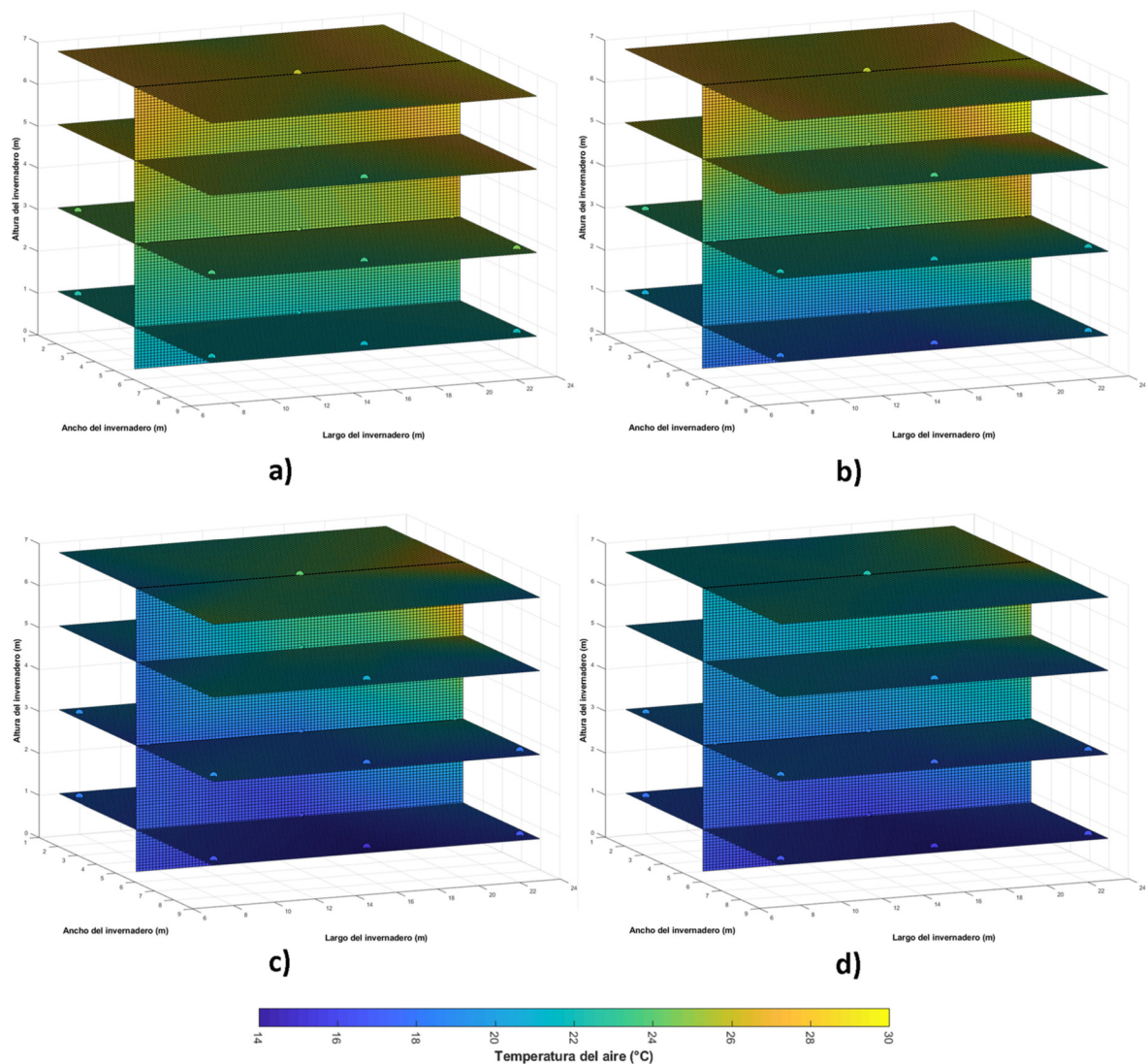


Figura 3.13. Representación 3D e interpolación lineal de datos de mediciones para la apertura Le50-Lo50-Ce0-Co0 en diferentes tiempos: a) 10:25; b) 10:28; c) 10:31; 10:37.

3.4.2. Apertura Le50-Lo50-Ce0-Co100

Para esta configuración, el gradiente vertical de temperatura de 3°C se conserva después de la apertura de ventilas; sin embargo, el gradiente horizontal, de alrededor de 1°C , se logra eliminar durante la apertura de ventilas. Esto se debe básicamente a la configuración de ventilas, ya que existe una disminución importante de temperatura en todas las regiones del invernadero.

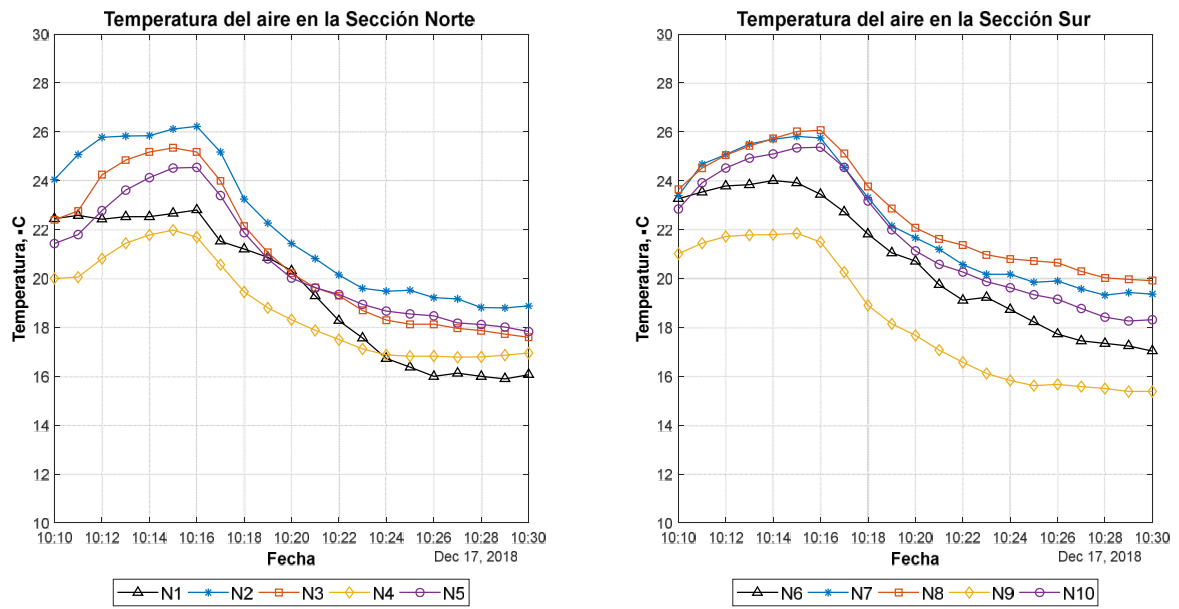


Figura 3.14 Mediciones de la WSN para la apertura Le50-Lo50-Ce0-Co100

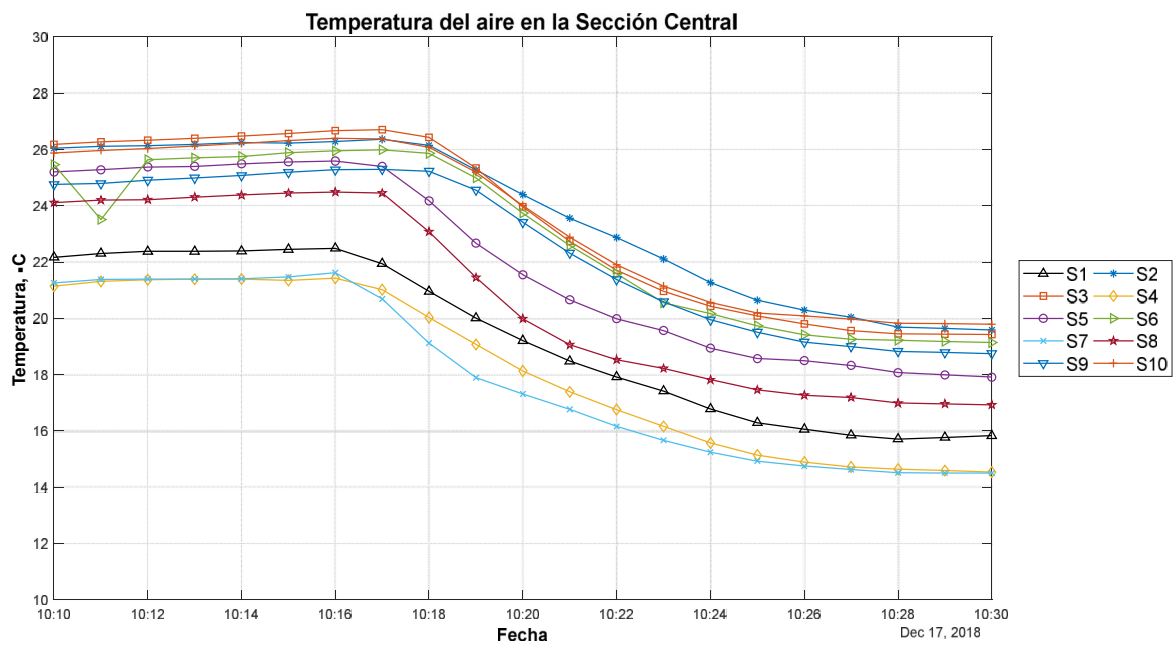


Figura 3.15 Mediciones de la red alámbrica para la apertura Le50-Co50-Ce0-Co100

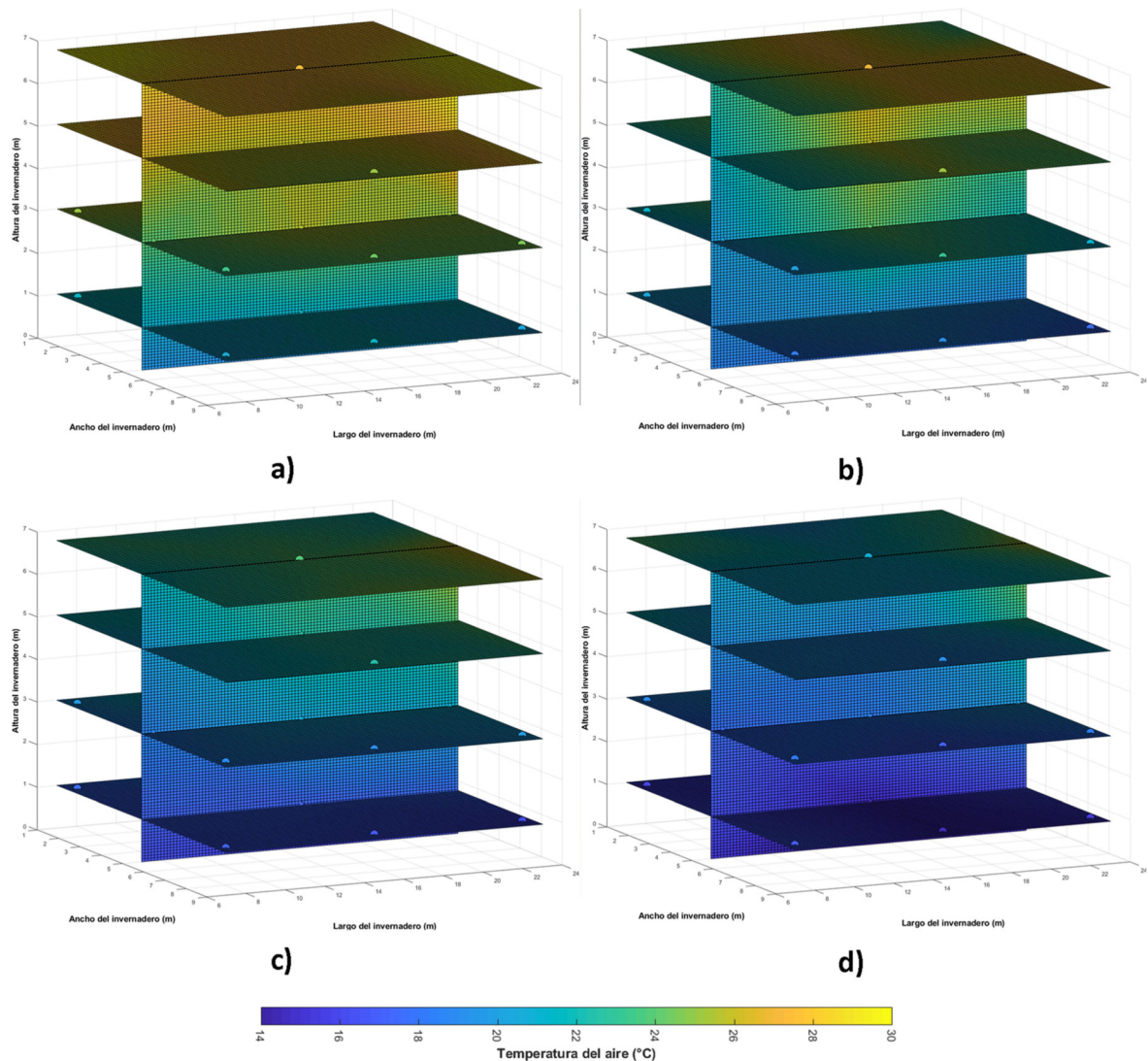


Figura 3.16. Representación 3D e interpolación lineal de datos de mediciones para la apertura Le50-Lo50-Ce0-Co100 en diferentes tiempos: a) 10:16; b) 10:19; c) 10:22; 10:28.

3.4.3. Apertura Le25-Lo25-Ce0-Co50

Esta apertura de ventilas permite corregir, ligeramente, los gradientes vertical y horizontal de temperatura del aire después de la apertura, al descender en 1 °C dichos gradientes. Este comportamiento, también depende de la velocidad y dirección del viento, ya que ambos permitieron un descenso similar de temperatura, pero en cuanto a homogenización del clima, esta configuración permitió disminuir dichos gradientes.

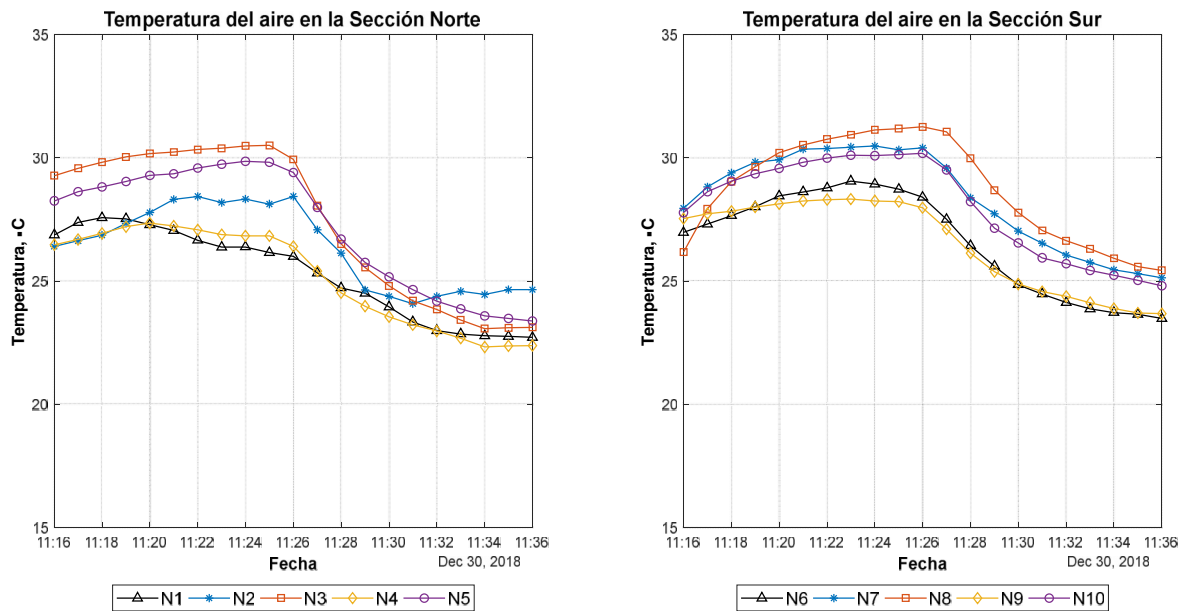


Figura 3.17 Mediciones de la red WSN para la apertura Le25-Lo25-Ce0-Co50

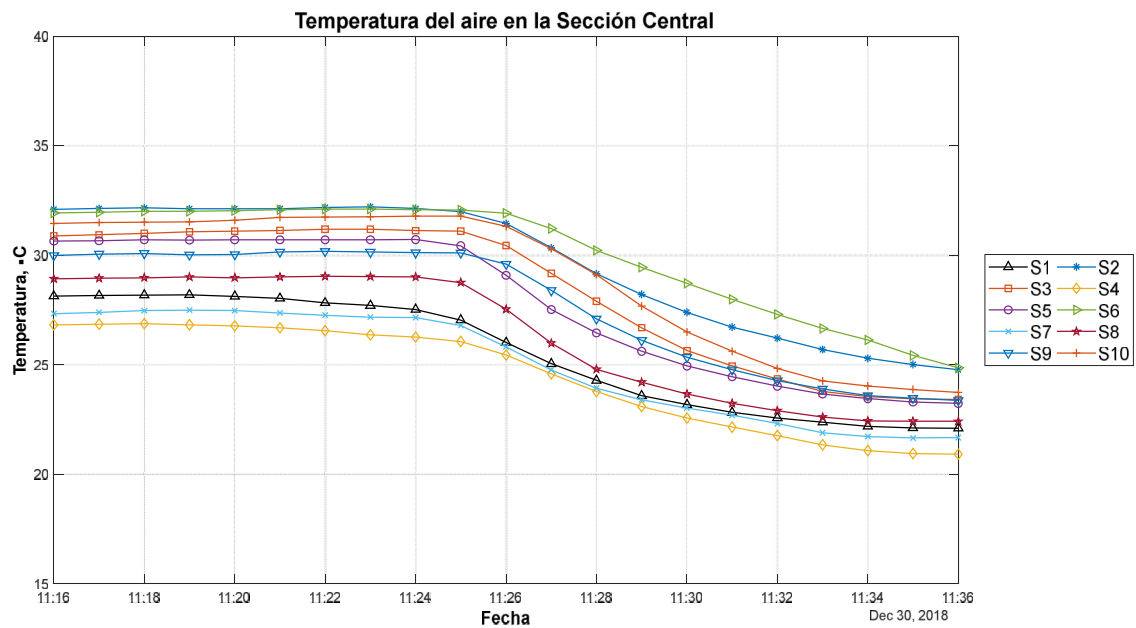


Figura 3.18. Mediciones de la red alámbrica para la apertura Le25-Lo25-Ce0-Co50

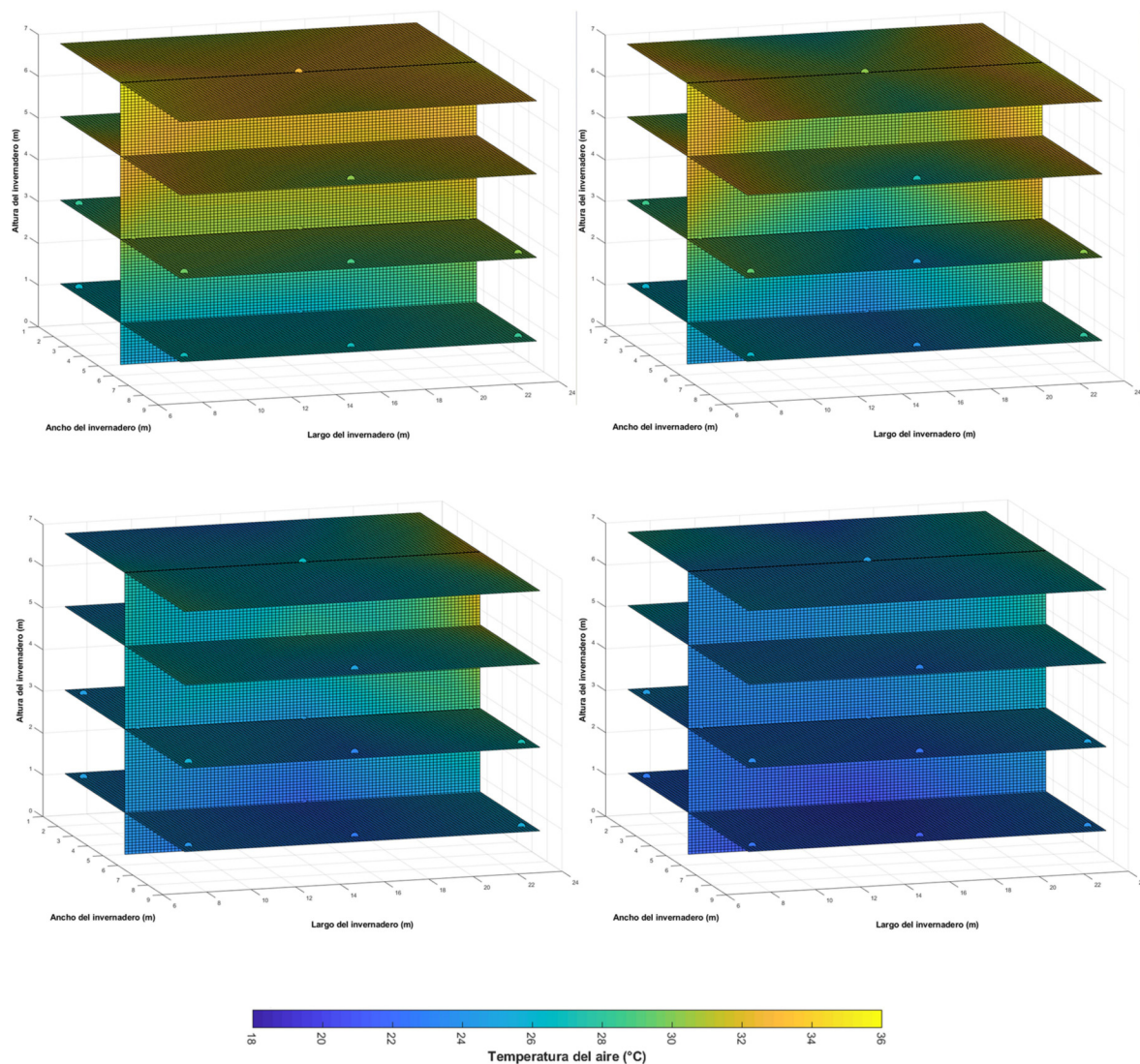


Figura 3.19 Representación 3D e interpolación lineal de datos de mediciones para la apertura Le25-Lo25-Ce0-Co50 en diferentes tiempos: a) 11:23; b) 11:26; c) 11:29; 11:35.

3.4.4. Apertura Ce50-Co0-Ce0-Co50

Antes de la apertura de ventilas, existe un pequeño gradiente de alrededor de 2 °C, el cual aumenta después de la apertura. Esto se debe básicamente a la configuración de ventilas, ya que existe una disminución importante de temperatura, sin embargo esto solo ocurre en las zonas bajas del invernadero (Figura 3.13), específicamente a la altura de la apertura de ventilas.

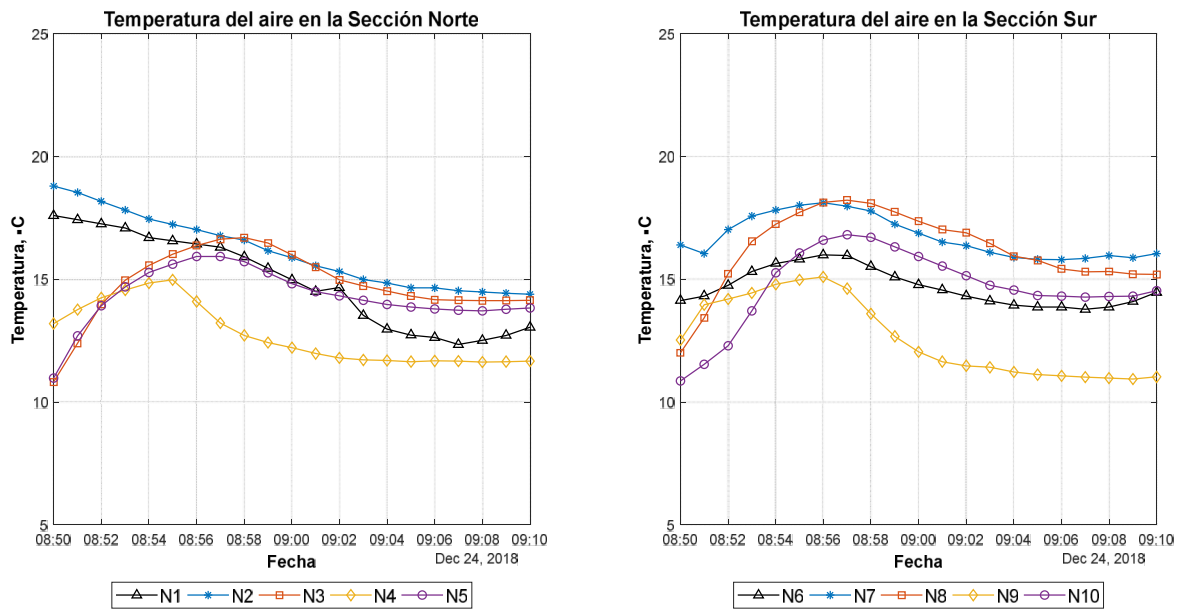


Figura 3.20 Mediciones de la red WSN para la apertura Ce25-Co0-Ce0-Co25

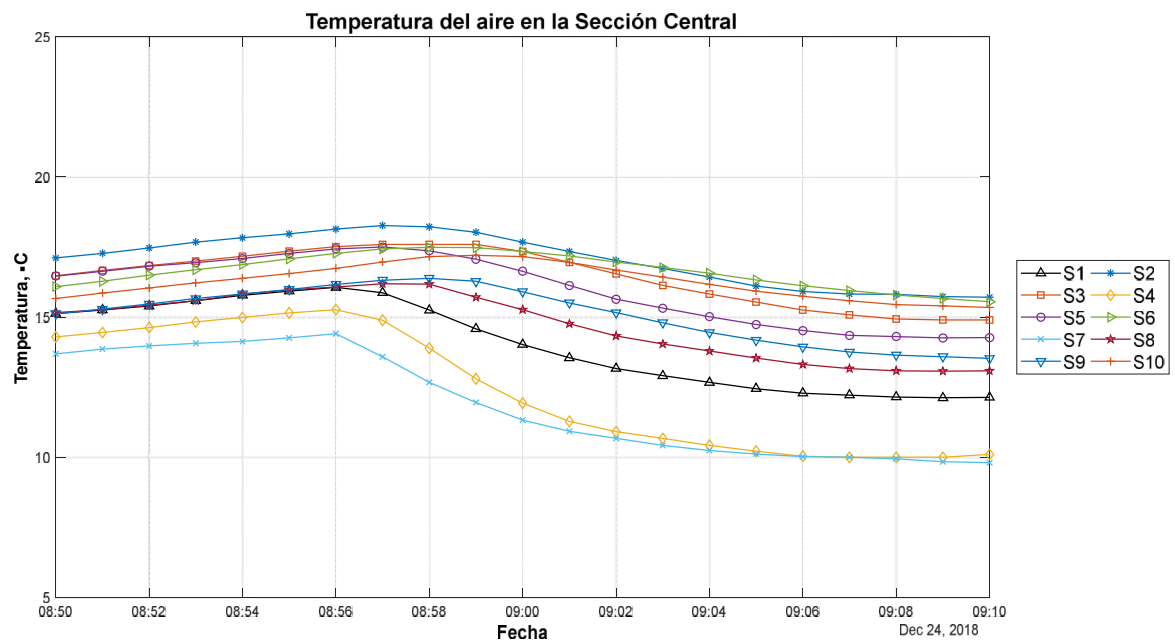


Figura 3.21 Mediciones de la red alámbrica para la apertura Le25-Le0-Ce0-Co25

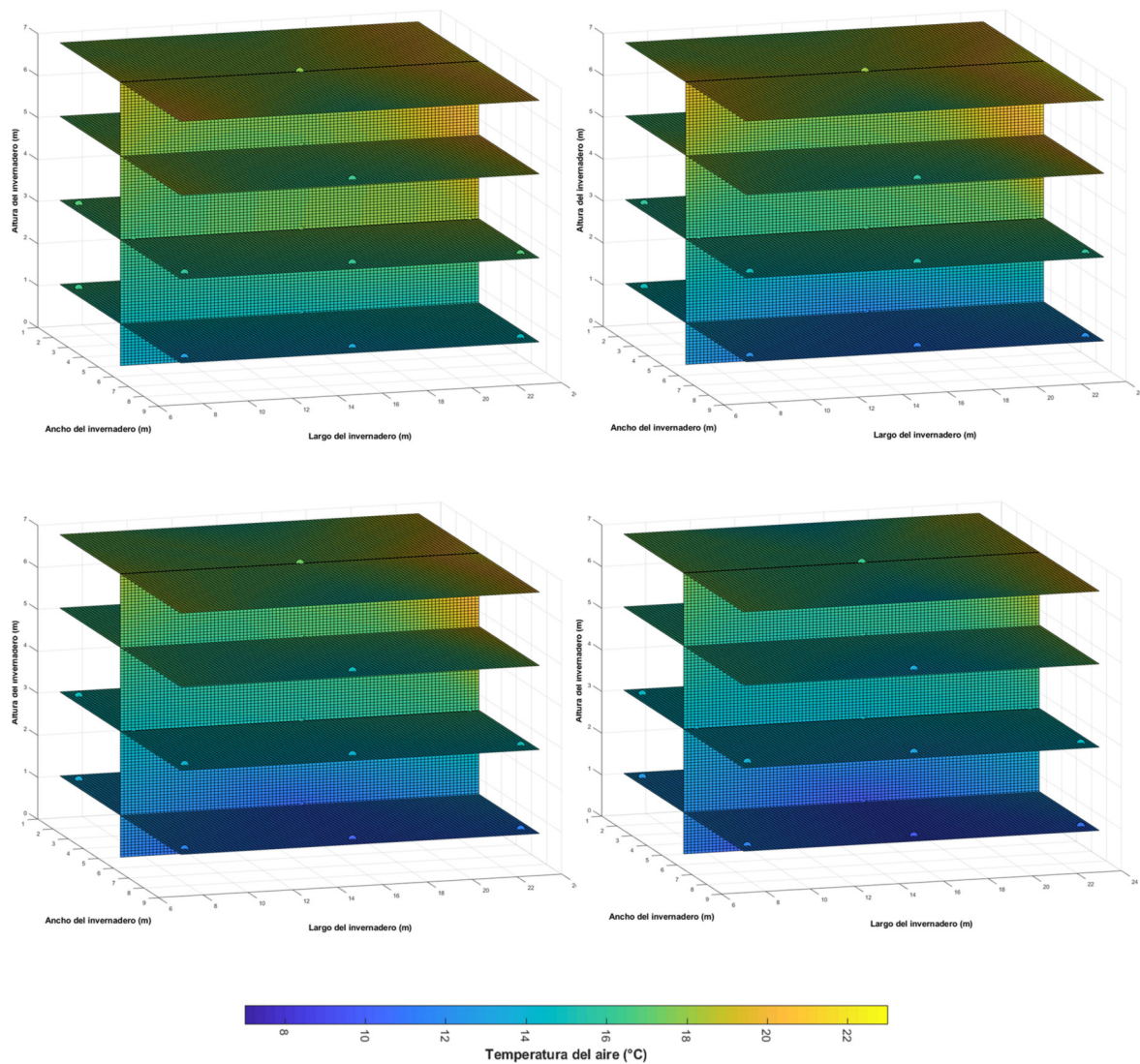


Figura 3.22. Representación 3D e interpolación lineal de datos de mediciones para la apertura Le25-Lo0-Ce0-Co50 en diferentes tiempos: a) 8:57; b) 9:00; c) 9:03; 9:09.

3.4.5. Apertura Le12.5-Lo12.5-Ce0-Co25

Esta última apertura permitió un descenso importante de temperatura del aire, sin embargo, también ocasiono un incremento del gradiente vertical temperatura del aire (quedando un gradiente de 8° entre las regiones alta y baja del invernadero), conservando el gradiente horizontal (8° entre las regiones norte y sur del invernadero) antes de la apertura de ventilas

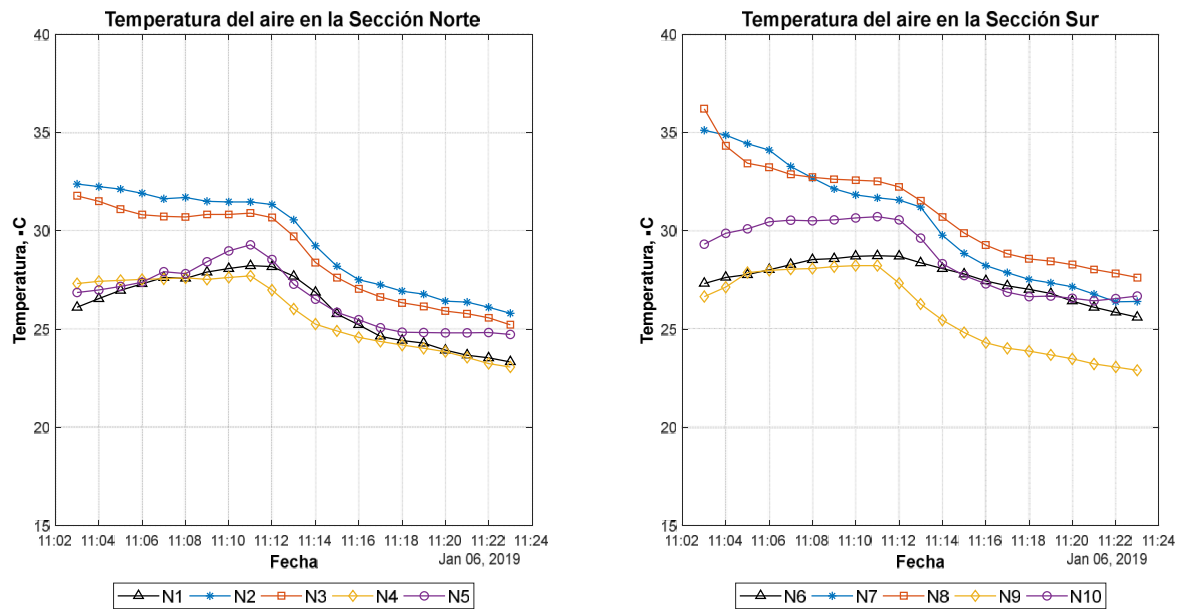


Figura 3.23. Mediciones de la red WSN para la apertura Le12.5-Lo12.5-Ce0-Co25

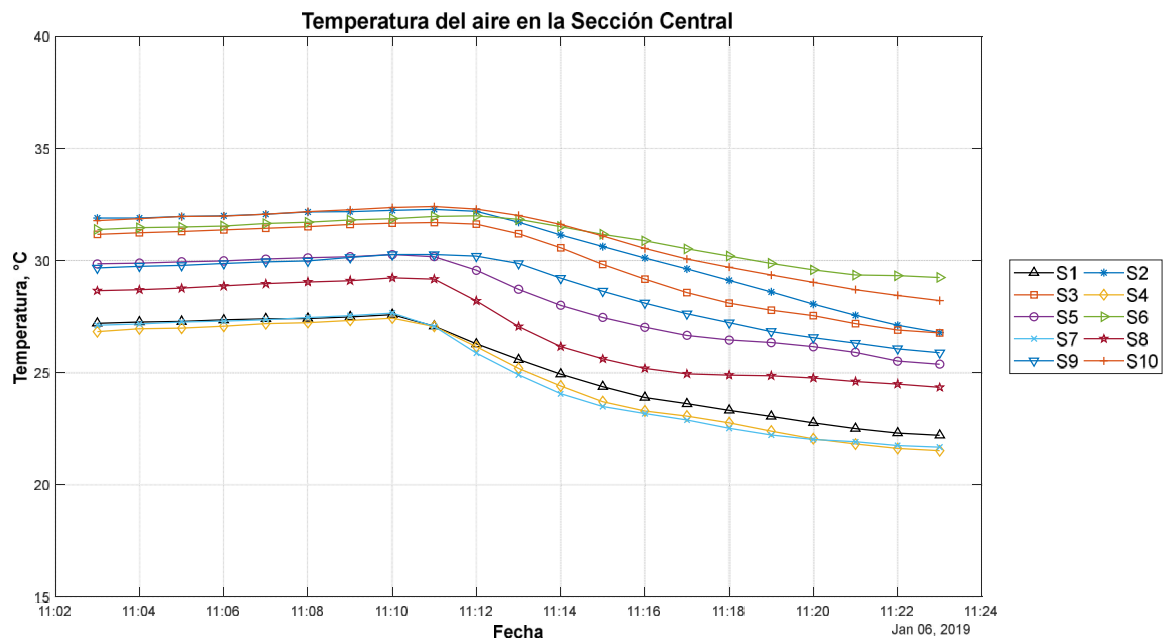


Figura 3.24 Mediciones de la red alámbrica para la apertura Le12.5-Lo12.5-Ce0-Co25

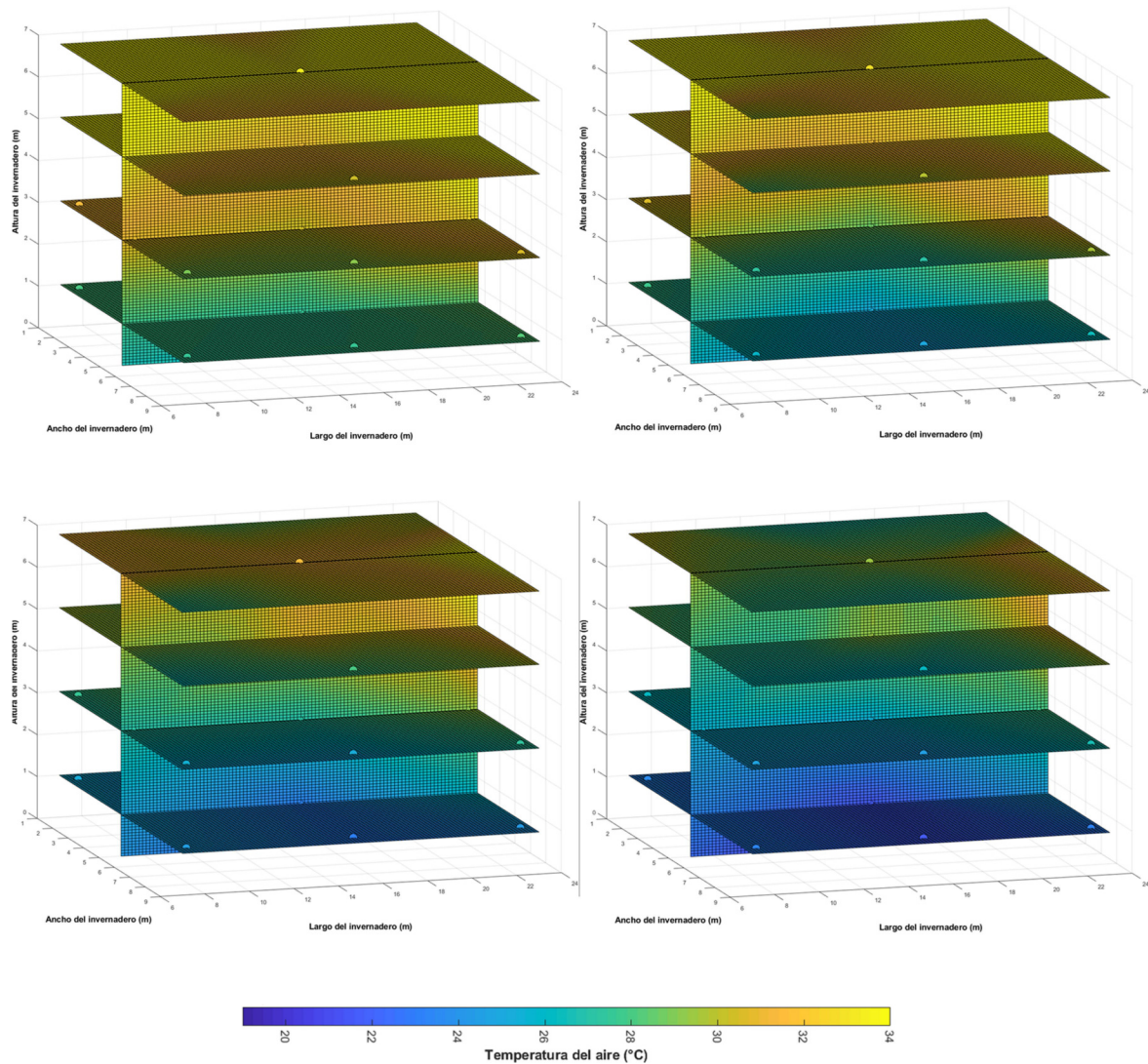


Figura 3.25 Representación 3D e interpolación lineal de datos de mediciones para la apertura Le12.5-Lo12.5-Ce0-Co25 en diferentes tiempos: a) 11:11; b) 11:14; c) 11:17; d) 11:23.

La solución inalámbrica, en conjunto con la red alámbrica ofrece una perspectiva más profunda del comportamiento de temperatura del aire en invernaderos. A partir de estas mediciones se comprobó que el clima al interior no puede ser considerado como homogéneo, lo cual puede ser un problema, principalmente, para cultivos cuya producción requieran alturas consideradas, generando heterogeneidad en la producción del cultivo

3.4. Conclusiones

La WSN desarrollada soluciona el problema de la comunicación a través de cables, ya que, durante las pruebas realizadas, no se presentaron problemas de pérdida de datos. Sin embargo, el principal inconveniente del sistema es el tiempo limitado de monitoreo, ya que el sistema solo funciona en línea hasta 3 horas. Una solución inmediata a este problema es modificar el módulo de energía, cambiando la batería a una cuyo almacenamiento sobrepase los 10000 mA y adquirir una celda fotovoltaica que brinde una corriente de al menos 1000 mAh, para que el sistema se recargue diariamente, mientras proporciona la corriente de funcionamiento del sistema. Sin embargo, a pesar que de esta solución resuelve esta problemática, el principal inconveniente de este sistema, es la disponibilidad de radiación solar, ya que el funcionamiento del sistema está limitada a este factor. Otra solución disponible es el de adquirir otro ventilador que consuma menos corriente; sin embargo, esta solución debe considerar la velocidad del aire de aspiración para no tener problemas exactitud en las mediciones de los nodos.

La red alámbrica de sensores no presenta la problemática de la medición ininterrumpida, dado que su alimentación cableada, asegura su funcionamiento constante. Sin embargo, una problemática encontrada, es la frecuencia de muestreo del sistema, ya que el sistema cuenta únicamente con un microcontrolador para los 10 sensores de temperatura, lo cual ocasiona que el sistema dependa del tiempo mínimo de adquisición de datos de cada sensor, dicho tiempo se multiplica por 10 para volver a medir dichas variables; problemática que no presenta la WSN dado que cada nodo sensor presenta su propio microcontrolador

El análisis de los resultados de los experimentos de ventilación, muestran que la temperatura del ambiente del invernadero no es homogénea, generándose gradientes, tanto horizontales como verticales, siendo más pronunciados, en magnitud, estos últimos. Esta problemática se debe, principalmente, a los materiales que constituyen las paredes de invernadero: policarbonato para la pared norte y polietileno para la pared sur, y a la densidad del aire que disminuye con el aumento de temperatura, ocasionando que los volúmenes de aire menos denso se

concentren en el techo del invernadero. Sin embargo, estos gradientes de temperaturas se corrigen ligeramente durante la apertura de ventilas, esto debido a las renovaciones de aire.

3.5. Literatura citada

Akyildiz, I. F., W. Su, Y. Sankarasubramaniam and E. Cayirci (2002). "Wireless sensor networks: a survey." *Computer Networks* 38(4): 393-422.

Aqeel ur, R., A. Z. Abbasi, N. Islam and Z. A. Shaikh (2014). "A review of wireless sensors and networks' applications in agriculture." *Computer Standards & Interfaces* 36(2): 263-270.

Molina-Aiz, F. D., H. Fatnassi, T. Boulard, J. C. Roy and D. L. Valera (2010). "Comparison of finite element and finite volume methods for simulation of natural ventilation in greenhouses." *Computers and Electronics in Agriculture* 72(2): 69-86.

Ojha, T., S. Misra and N. S. Raghuwanshi (2015). "Wireless sensor networks for agriculture: The state-of-the-art in practice and future challenges." *Computers and Electronics in Agriculture* 118: 66-84.

4. ANALISIS CFD DEL AMBIENTE DE UN INVERNADERO CON VENTILACION NATURAL UBICADO EN LA ZONA CENTRO DE MÉXICO

4. CFD ANALYSIS OF THE ENVIRONMENT OF A NATURALLY VENTILATED GREENHOUSE LOCATED IN THE CENTRAL AREA OF MEXICO

José Eduardo Rosales Vicelis¹; Efrén Fitz Rodríguez^{1*};

¹Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo.
Carretera México-Texcoco, km 38.5, Chapingo, Estado de México,
C. P. 56230, México.

Correo-e [*efitzr@taurus.chapingo.mx](mailto:efitzr@taurus.chapingo.mx); tel.: +52 (595) 952-1500 Ext. 6252.

(*Autor de correspondencia)

Resumen

La mayoría de los invernaderos instalados en México son de baja y mediano nivel tecnológico, sin calefacción, sin algún tipo de enfriamiento y con cultivos en suelo, en donde el control de los factores ambientales difícilmente se logra. Las temperaturas promedio mensuales registradas en el centro de México muestran la necesidad de calefacción en los meses de invierno (diciembre -febrero), permitiendo que el resto del año se pueda utilizar ventilación natural, como el mecanismo principal herramienta del productor para controlar la temperatura y humedad del invernadero. Dada la situación, el estudio de la ventilación natural se convierte en un aspecto fundamental para poder establecer un sistema de control y homogenización del ambiente por medio de la apertura y cierre de ventilas. Por lo tanto, se realizó un análisis estacionario por medio de Dinámica de Fluidos Computacionales (CFD), para evaluar el perfil de temperatura del aire del invernadero bajo diferentes configuraciones de ventilación y bajo diferentes condiciones climáticas externas. El modelo matemático se evaluó mediante una red de 20 sensores de temperatura del aire distribuidos sobre el plano transversal y central del invernadero. Los modelos matemáticos implementados en la simulación de las diferentes configuraciones de ventilación predicen de manera aceptable el comportamiento del ambiente, dado que, a partir de la comparación con los datos obtenidos en los puntos de medición, se obtuvo un promedio de coeficiente de correlación R^2 igual 0.72, y un error medio cuadrado RMSE igual 1.07 °C. Las simulaciones permitieron establecer la apertura y cierre de ventilas más adecuadas de acuerdo a las condiciones externas.

Palabras clave: Análisis numérico, dinámica de fluidos computacional, ventilación natural, control del clima, agricultura en ambientes controlados

4.1 Introducción

La ventilación natural es el principal mecanismo de modificación del ambiente (temperatura, contenido de humedad, concentración de CO₂) para más de 19 000 invernaderos de baja tecnología que existen en México. Estos representan el 79 % del total de invernaderos en el país (SIAP-SAGARPA, 2015). Dado que esta técnica de control demanda poco gasto en consumo energético, mantenimiento y operación, resulta ser el ideal para los productores de invernadero de baja tecnificación. Las condiciones climáticas en la zona del Centro de México, se caracterizan por mantener temperaturas mínimas promedio mayores a 6 °C en la mayor parte del año, exceptuando la temporada invernal; además de presentarse temperaturas máximas mayores a 20 durante casi todo el año (Valencia-Islas, 2016). Por lo tanto, la ventilación natural se convierte en la técnica más adecuada para regular el ambiente de los invernaderos durante este periodo del año. Sin embargo, definir la configuración adecuada de ventilación es un reto para lograr obtener las condiciones óptimas para los cultivos. La ventilación natural se ha sido estudiado a través de modelos matemáticos mecanicistas, donde el modelo de ventilación forma parte del modelo general del microclima del invernadero (Impron et al., 2007; Singh et al., 2006; Vanthoor et al., 2011); Así mismo ha sido caracterizada a través de estimaciones de tasas de intercambio de aire utilizando la técnica de gases trazadores (Boulard y Draoui, 1995; Nielsen, 2002; Pérez Parra et al., 2004). Sin embargo, estos métodos suponen la temperatura del aire del invernadero uniforme en todo el ambiente, lo cual es una gran simplificación, dado que en el interior se generan gradientes de temperatura y humedad, que puede magnitud considerable, tanto de manera vertical, como horizontal. Este gradiente de temperatura genera una importante falta de uniformidad en la producción tanto en cantidad como en calidad, y también generando problemas de aparición de plagas y enfermedades en las zonas del invernadero que tienen temperaturas y niveles de humedad menos favorables (Molina- Aiz et al., 2010). Por lo tanto, se debe elegir un modelo matemático que considere esta heterogeneidad de temperatura y los modelos basados en la Dinámica de Fluidos Computacionales (CFD) son una excelente alternativa de solución.

La ventilación natural de invernaderos se ha analizado a través de modelos basados en CFD y validados mediante la técnica de gases trazadores. Las investigaciones se han aplicado al estudio únicamente de intercambios de aire (Boulard et al., 1999; Sase et al., 2002), de la caracterización de temperatura (Bartzanas et al., 2004; Benni et al., 2016) y del comportamiento de la humedad relativa (Piscia et al., 2012; Piscia et al., 2015). Sin embargo, la mayoría de estas investigaciones no aterrizan este conocimiento para la homogenización y control de temperatura bajo la apertura y cierre de las ventilas. Las investigaciones sobre la ventilación natural para invernaderos de México, solo se centran en la determinación de las tasas de ventilación bajo ciertas configuraciones de ventilación para validar modelos mecanicistas puntuales y modelos CFD (Espinal-Montes et al., 2015; Pedro. et al., 2008; Romero et al., 2006).

El objetivo principal de esta investigación es desarrollar un modelo basado en análisis con CFD que permita simular la temperatura del aire al interior de un invernadero con ventilación natural bajo diferentes configuraciones de ventilación y bajo diferentes condiciones climáticas externas, con lo cual se definirá la configuración de apertura de ventilas más apropiada para dichos escenarios de clima exterior.

4.2. Materiales y Métodos

El estudio de ventilación se llevó a cabo en un invernadero mono-bahía (Figura 4.1) de 300 m² (30x10 m de largo y ancho, respectivamente), ubicado en el campus principal de la Universidad Autónoma Chapingo, en Texcoco, México. Este invernadero tiene una cubierta simple de polietileno en las paredes laterales y pared sur, y doble capa inflada en el techo. El mecanismo de ventilación es por medio de ventilas laterales y cenitales.

Para el desarrollo y evaluación del modelo se utilizaron las mediciones de la estación meteorológica del invernadero, la cual incluye un sensor de temperatura y humedad relativa del aire HMP60 (Vaisala, Helsinki, Finland), un sensor de velocidad y dirección de viento YOUNG 05305 (R.M. YOUNG Co., Traverse City, Michigan, USA), un sensor de temperatura del suelo SCR PT100 (Compañía, cd, país), un piranómetro SP-212-L (Apogee Instruments Inc., Logan, UT, USA) para

medir la irradiación solar, conectados a un registrador de datos “datalogger” CR1000 (Campbell Sci., Logan, UT, USA).

Dentro del invernadero se instrumentaron dos redes de sensores distribuidas en secciones verticales y horizontales, incluyendo una red de sensores inalámbrica (WSN) y red de sensores alámbrica (sección central vertical) (Figura 4.1).

La red de sensores alámbrica está compuesta de 10 sensores de temperatura DHT22 (Guangzhou Aosong Electronics Co., Ltd., Guangzhou Huangpu District, China); cada sensor fue colocado en un tubo de PBC de 2 pulgadas de diámetro y aspirados con ventiladores. Esta red fue colocada sobre el plano transversal central del invernadero (Figura 4.1) y los sensores se conectaron a un registrador de datos basado en una placa de ARDUINO MEGA 2560.

La WSN está compuesta de 10 nodos sensores y un nodo maestro; cada nodo sensor integra un sensor DHT22, aspirado mediante un ventilador, y diferentes módulos de: comunicación, almacenamiento, energía, procesamiento y medición de tiempo real. La WSN se colocó sobre los planos transversales norte y sur de invernadero (Figura 4.1).

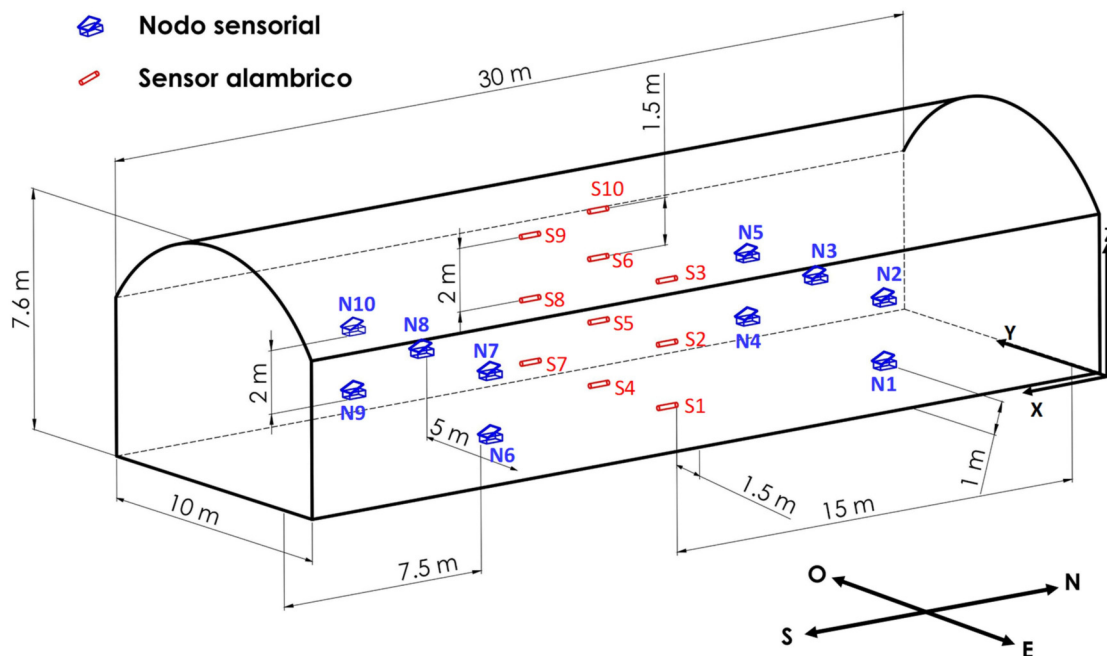


Figura 4.1. Dimensiones del invernadero experimental; (b) ubicación de sensores

4.2.1. Diseño de estudio

En el análisis CFD del ambiente del invernadero se propusieron diferentes configuraciones de ventilación, y se realizó la modelación tanto en estado transitorio (Figura 4.2), como en estado estacionario (Figura 4.3). Para cada tipo de modelación se eligieron determinadas configuraciones de ventilación, 8 para la modelación estacionaria y 3 para la modelación transitoria; las configuraciones de las simulaciones transitorias ST1, ST2 y ST3 son las mismas que las configuraciones de las simulaciones estacionaria SE7, SE8 y SE5, respectivamente; esto con la finalidad de comparar el resultado de la simulación estacionaria con el resultado de la simulación transitoria, después de evaluar este último modelo hasta el tiempo que alcanza el estado estable. Se evaluaron los modelos a partir de mediciones, y se analizaron estas configuraciones de ventilación, pero bajo diferentes velocidades y direcciones del viento, con el fin de determinar su efecto sobre la eficiencia en la ventilación. Finalmente, se determinó la configuración de ventilación más eficiente, en cuanto a disminución y homogenización de la temperatura del aire, a partir de simulaciones bajo las mismas condiciones externas

Cuadro 4.1 Configuraciones de ventilación utilizadas según el tipo de modelación

Modelación	Configuración ventilas para cada escenario de simulación.		
Transitoria	ST1 – (Le50-Lo50- Ce50-Co50)	ST2 – (Le50-Lo50- Ce0-Co0)	ST3 – (Le50-Lo50- Ce0-Co50)
	SE1 – (Le75-Lo0- Ce0-Co0)	SE2 – (Le50-Lo0- Ce0-Co0)	SE3 – (Le25-Lo0- Ce0-Co25)
	SE4 – (Le12.5- Lo12.5-Ce50-Co50)	SE5 – (Le50-Lo50- Ce0-Co100)	SE6 – (Le25-Lo25- Ce0-Co50)
Estacionaria	SE7 – (Le50-Lo50- Ce50-Co50)	SE8 – (Le50-Lo50- Ce0-Co0)	

Le-# Ventilador lateral-Este a un #% de apertura; Lo-# Ventilador lateral-Oeste a un #% de apertura

Ce-# Ventilador cenital-Este a un #% de apertura; Co-# Ventilador cenital-Oeste a un #% de apertura

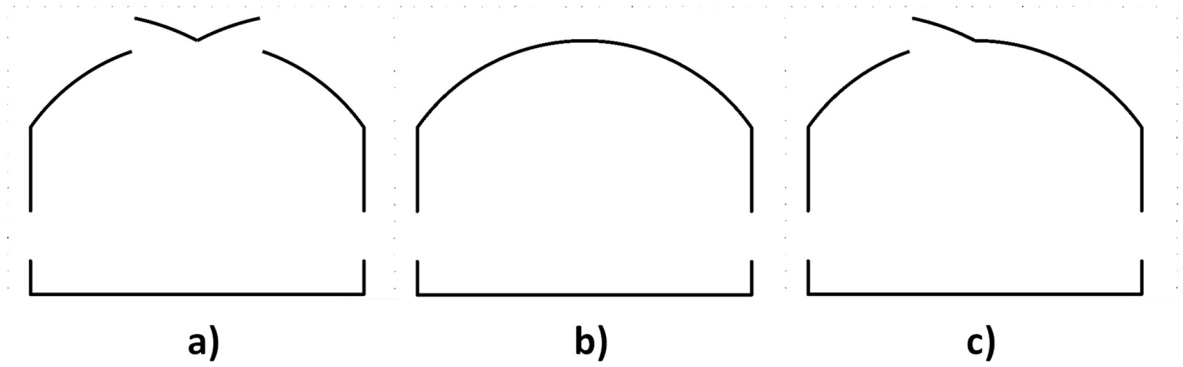


Figura 4.2 Configuraciones de ventilación para simulaciones transitorias: (a). ST1 (b). ST2; (c). ST3.

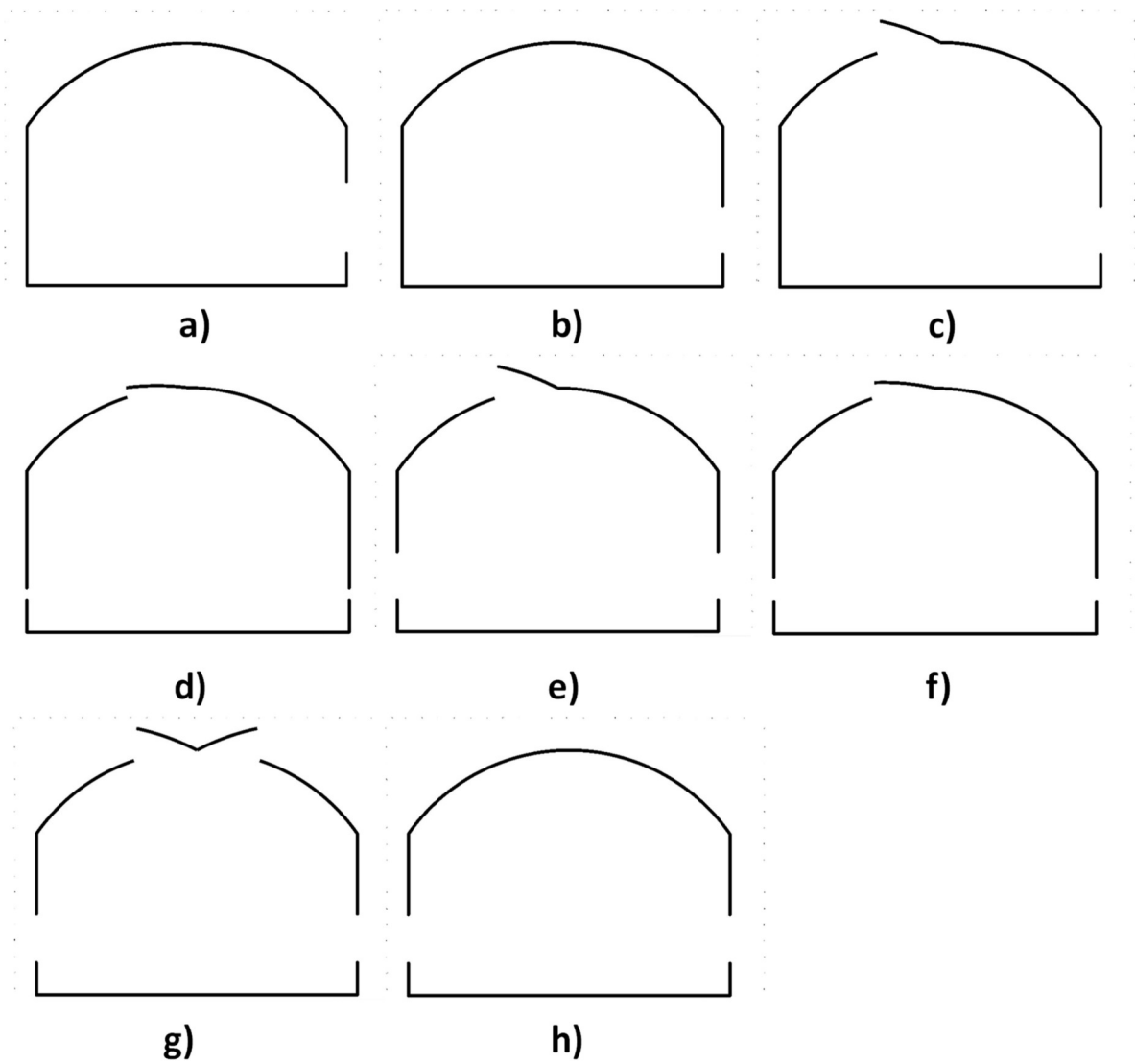


Figura 4.3 Configuraciones de ventilación para simulaciones estacionarias: a) SE1; b) SE2; c) SE3; d) SE4; e) SE5; f) SE6; g) SE7; h) SE8

4.2.2. Análisis numérico con CFD

Se implementó el análisis CFD, utilizando el software ANSYS FLUENT 18.1 (ANSYS Inc. Canonsburg, PA, USA), siguiendo la metodología propuesta por Versteeg y Malalasekera (2007):

4.2.2.1. Modelo numérico

El método de CFD resuelve numéricamente las ecuaciones del fenómeno de transporte. Estas ecuaciones son denominadas ecuaciones de conservación tridimensional de masa, de momento (ecuaciones de Navier-Stokes) y de energía. Estas ecuaciones, se pueden representar de manera general por medio de las siguientes expresiones:

Para simulaciones 3D estacionarias:

$$\frac{\partial(U)}{\partial t} + \frac{\partial(V)}{\partial t} + \frac{\partial(W)}{\partial t} = \Gamma \nabla^2 \phi + S_\phi$$

Para simulaciones 2D transitorias:

$$\frac{\partial(U)}{\partial t} + \frac{\partial(V)}{\partial t} + \frac{\partial(\phi)}{\partial t} = \Gamma \nabla^2 \phi + S_\phi$$

Donde ϕ es la variable de interés en forma adimensional (que puede ser masa, velocidad, factor químico o temperatura); U , V y W son los componentes vectoriales de velocidad; Γ es el coeficiente de difusión; S_ϕ es el termino fuente.; la derivada parcial de la variable de concentración con respecto al tiempo represente el término transitorio. Las ecuaciones que gobiernan se discretizan mediante el procedimiento descrito por Patankar (1980). Este procedimiento consiste en una integración de estas ecuaciones mediante el método de volumen de control (Bartzanas, 2004).

El fenómeno de turbulencia se modeló utilizando el modelo $k-\varepsilon$ estándar, el cual permite analizar este fenómeno en un tiempo computacional adecuado para estudios de modelación CFD en invernaderos. (Espinal-Montes, 2015). Para los modelos 3D, se incorporó el modelo de carga solar de ANSYS Fluent 18.1, mediante el método de trazado de rayos solares, facilitando la concentración de cargas solares como

fuentes de calor en las ecuaciones de energía; para los modelos 2D se consideró el modelo de radiación de Ordenadas Discretas (DO). El modelo de radiación DO permite la solución de radiación en paredes semitransparentes y puede usarse para modelar bandas espectrales (Fidaro et al., 2010); en este caso se modeló el espectro visible. Para modelar las propiedades ópticas solares para los modelos 3D, se especifica la transmisividad y reflectividad de los materiales utilizados como pared en las condiciones de frontera. Estos valores se obtuvieron de la documentación del fabricante del material empleado.

Cuadro 4.2 Propiedades termo-físicas de los materiales utilizados en la simulación

Propiedad	Aire	Polietileno	Suelo	Policarbonato
Densidad (kg/cm ³)	1.225	950	1800	1183
Conductividad térmica (W/m K)	0.0242	0.43	1.8	0.19
Calor específico (J/kg K)	1006	1900	2100	1200
Viscosidad(kg/m s)		1.79E-05		

4.2.2.2. Geometría y mallado

Se incorporó un dominio computacional para simular las condiciones externas del invernadero. Las dimensiones del dominio computacional se establecen de acuerdo al estudio a realizar. Para estudios de ventilación natural en invernaderos, Bournet et al., (2007) sugiere las dimensiones en función de la altura del invernadero: para el largo y ancho de esta zona sugiere una longitud de siete veces la altura del invernadero a partir de la ventilas de este y una altura de cinco veces la altura del invernadero. La geometría del invernadero y el dominio computacional se realizó con la herramienta de diseño 3D SpaceClaim de ANSYS.

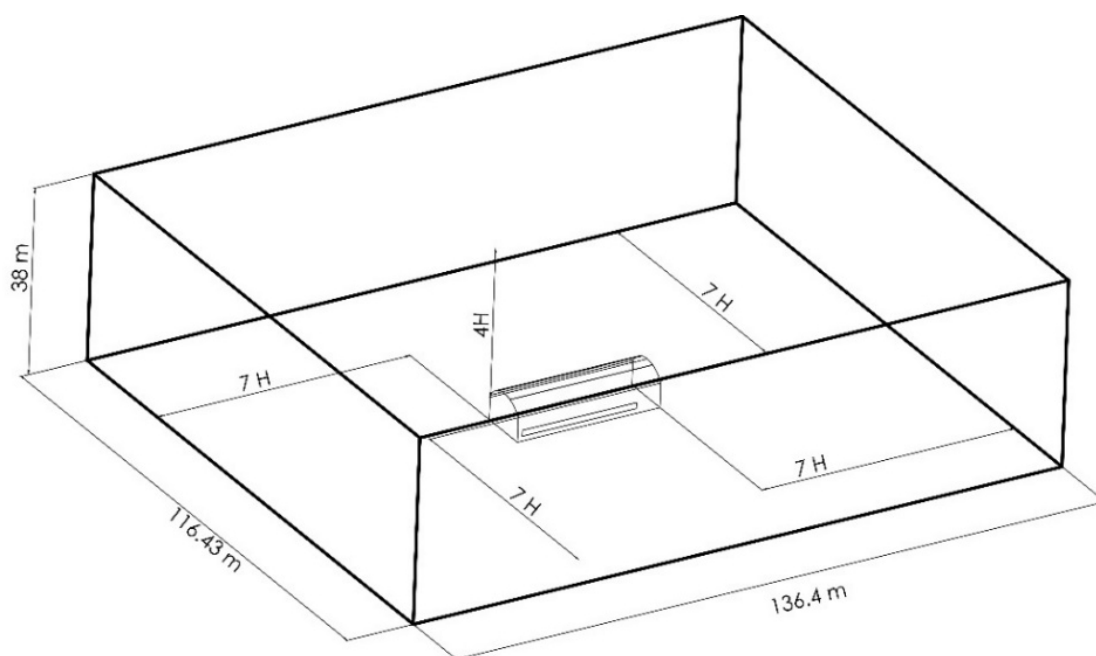


Figura 4.4 Geometría del dominio e invernadero y sus dimensiones

De manera similar, el mallado fue construido mediante el software ANSYS Mesh. El mallado (subdivisión de espacios) se implementó con elementos hexaédricos, donde el tamaño del elemento se determinó de acuerdo a la evaluación de la calidad del mallado, utilizando diferentes tamaños de elementos, y considerando los parámetros de ortogonalidad y asimetría. Se consideró una malla semiestructurada, considerando una malla más fina en la zona de estudio, ventilas del invernadero.

Cuadro 4.3 Evaluación del tamaño de los elementos para mallado del modelo

Opción	Dominio	Invernadero	Ventilas	Criterio de calidad 1:		Criterio de calidad 2		Número de elementos
				Ortogonalidad		Skewness		
				Min	Media	Min	Media	
1	1	0.1	0.02	0.626	0.993	1.30e-10	5.62e-3	2 771 560
2	1	0.2	0.02	0.676	0.994	1.30e-10	3.62e-3	1 074 024
3	2	0.1	0.02	0.626	0.990	1.30e-10	7.159e-3	2 180 123
4	2	0.2	0.02	0.676	0.987	1.30e-10	8.11e-3	479 710

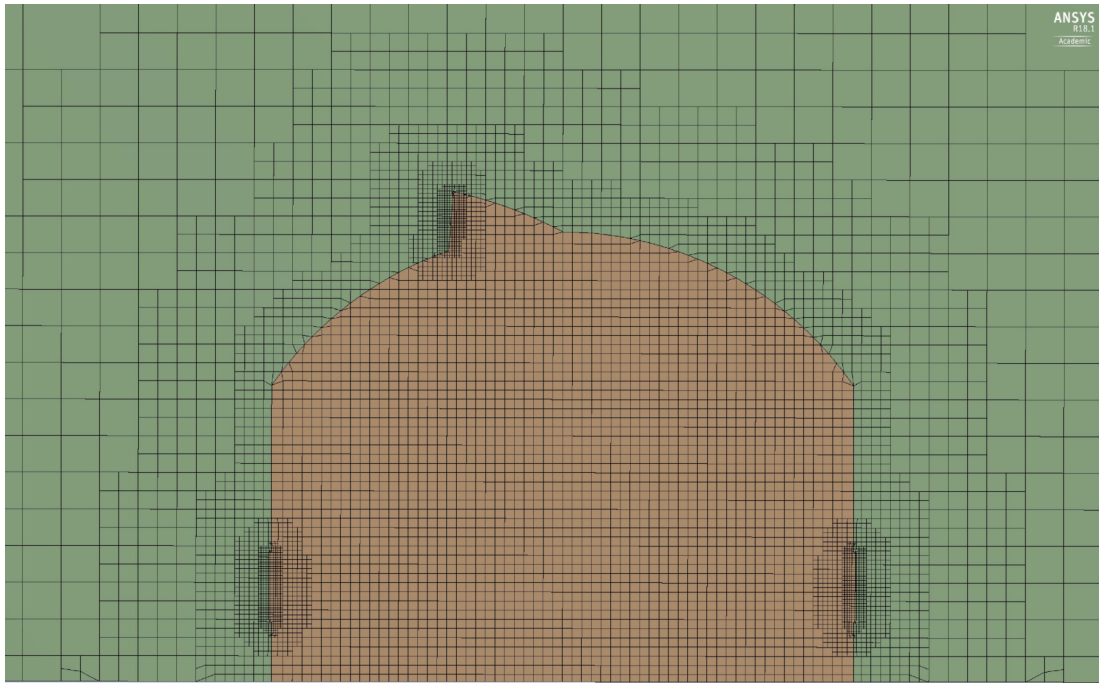


Figura 4.5 Mallado de las ventilas, invernadero y dominio computacional

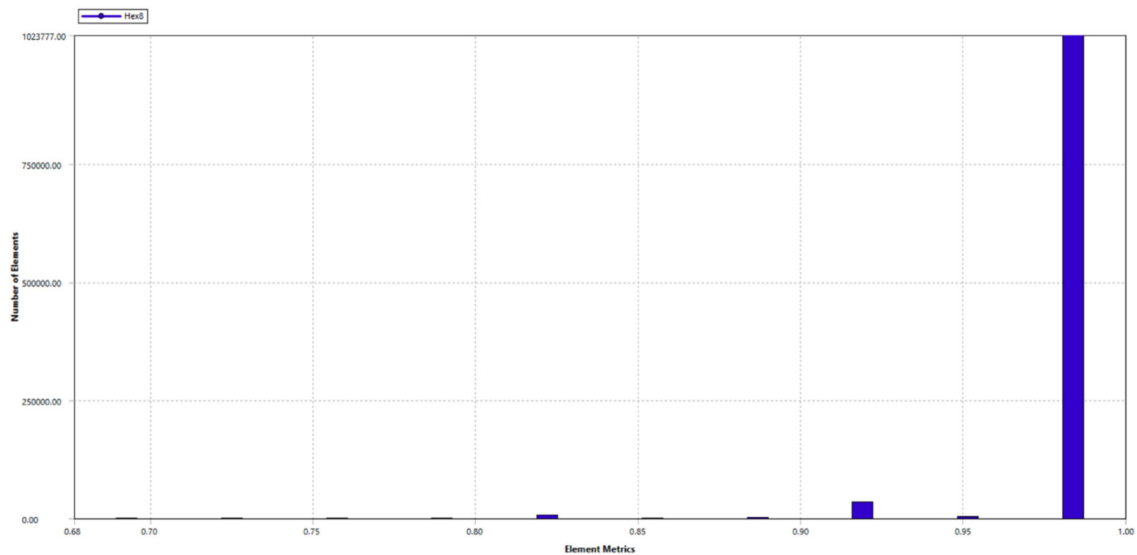


Figura 4.6 Evaluación de la calidad del mallado a partir de los tamaños seleccionados

4.2.2.3. Condiciones de frontera

Las condiciones de frontera se establecieron a partir de las mediciones de los sensores instalados al exterior e interior del invernadero y dependiendo de cada configuración de ventilación. La malla antiafido de cada ventila se modeló como un medio poroso cuyos valores de los parámetros permeabilidad, espesor del salto

poroso y coeficiente de pérdida inercial se obtuvieron de Cuauhtémoc Pérez Vega et al., (2016).

Cuadro 4.4 Condiciones de frontera del modelo

Frontera	Tipo/Material	Condición térmica
Pared norte	Pared/policarbonato	Acoplada; $\Delta = 4 \text{ mm}$
Suelo	Pared /suelo	$T=T_s \text{ K}$; $\Delta= 50 \text{ mm}$
Techo	Pared/polietileno	Acoplada; $\Delta = 0.2 \text{ mm}$
Paredes laterales y	Pared/polietileno	Acoplada; $\Delta = 0.1 \text{ mm}$
Entrada del dominio	Velocidad de entrada	$V=V_w \text{ m/s}$; $T=T_o \text{ K}$
Salida del dominio	Presión de salida	$P=0 \text{ Pa}$; $T=T_o \text{ K}$
Ventilas e infiltración	Medio poroso	$F_p=1.287\text{e-}09\text{m}^2$; $\Delta=0.265 \text{ mm}$, $C_2=3832.89 \text{ 1/m}$

T -Temperatura de la pared/medio; V - Velocidad de fluido de entrada; Δ – Espesor de la pared o salto poroso; P – Presión estimada; T_s – Temperatura del suelo; V_w -Velocidad del viento; T_o – Temperatura exterior. F_p –Permeabilidad; C_2 –Coeficiente de pérdida inercial.

Las condiciones climáticas externas como velocidad del viento, temperatura exterior, temperatura del suelo se establecieron dependiendo de la configuración a simular (Cuadro 4.4, Cuadro 4.5)

Cuadro 4.5 Variables de entrada para las simulaciones estacionarias.

Variable	SE1	SE2	SE3	SE4	SE5	SE6	SE7	SE8
Radiación (W/m ²)	359	361	313	618	561	670	950	538
Velocidad del viento (m/s)	0.7	0.5	0.53	1.1	0.9	4.64	1.84	1.12
Dirección del Viento (°)	289	224	233	246	214	167	231	244
Temperatura del suelo (°C)	18.84	18.44	9.61	14.06	12.54	14.2	24.23	11.3
Temperatura del aire exterior (°C)	16.33	15,22	8.05	18.89	14.59	19.11	26.84	13.21

Cuadro 4.6 Variables de entrada para las simulaciones transitorias.

Variable	ST1	ST2	ST3
Radiación (W/m ²)	950	538	561
Velocidad del viento (m/s)	1.84	1.12	0.9
Dirección del Viento (°)	231	244	214
Temperatura del suelo (°C)	24.23	11.3	12.54
Temperatura del aire exterior (°C)	26.84	13.21	14.59

4.2.2.4. Simulación

Para las simulaciones se consideró el régimen de estado estacionario, considerando 6 configuraciones de ventilación, con la finalidad de obtener resultados del efecto térmico inmediato a la apertura de las ventanas laterales y cenitales; y el régimen de estado transitorio, 3 configuraciones de ventilación, con la finalidad de analizar el efecto térmico durante los 10 minutos posteriores a la apertura de ventilas y verificar que los resultados de las simulaciones estacionarias corresponde con la estabilización de la temperatura en estado transitorio. Se seleccionó el método basado en presión “ACOPLADO” con formulación pseudo-transitoria, con la finalidad de brindar estabilidad y convergencia a la solución numérica. La inicialización del modelo se realizó de manera manual, para analizar el cambio de temperatura posterior a la apertura de ventilas.

4.2.2.5. Resultados

Los resultados de simulación para cada escenario de ventilación se evaluaron con las mediciones de los sensores instalados en el invernadero. Para evaluar los modelos, se determinó el error medio cuadrado (RMSE) y el coeficiente de correlación (R^2) para cada configuración de ventilación entre las mediciones y los resultados de la simulación.

4.3. Resultados y Discusión

4.3.1. Simulaciones estacionarias. Evaluación del modelo.

Se realizó la simulación estacionaria de cada configuración y se extrajo la información de temperatura del aire y los perfiles de velocidad y dirección del viento para las secciones transversales en las zonas donde se ubicaron los sensores de temperatura del aire. Posteriormente, se evaluó la simulación de cada configuración con los datos de temperatura del aire. El análisis de los resultados se realizó, de manera independiente, para cada configuración de ventilación.

a) SE1 (Le75-Lo0-Ce0-Co0)

Los resultados de esta simulación (Figura 4.7) indican que la apertura de esta ventila permite un descenso mínimo de temperatura del aire, comparado con el valor inicial de la temperatura (antes de la apertura), en las zonas cercanas a la ventila y bajas del invernadero; mientras que las zonas alejadas y altas no se muestra una reducción de la temperatura del aire, sino que aumenta ligeramente. Esto se debe a los perfiles de velocidad del viento de esta zona, los cuales son grandes en la región inmediata a la ventila abierta y baja del invernadero. A pesar que la dirección del viento favorece con la ventila abierta, la velocidad del mismo no es suficiente para renovar el aire del interior del invernadero.

b) SE2 (Le50-Lo0-Ce0-Co0)

Los resultados de la simulación y los datos medidos muestran que esta configuración es ineficiente en la renovación de aire, y por consiguiente para la disminución de temperatura. El área de ventilación en combinación con velocidades de viento exterior bajas, provoca que no exista descenso de temperatura del aire al momento de abrir las ventilas en ninguna región del invernadero, por el contrario, esta sigue aumentando debido al ingreso de calor por radiación solar.

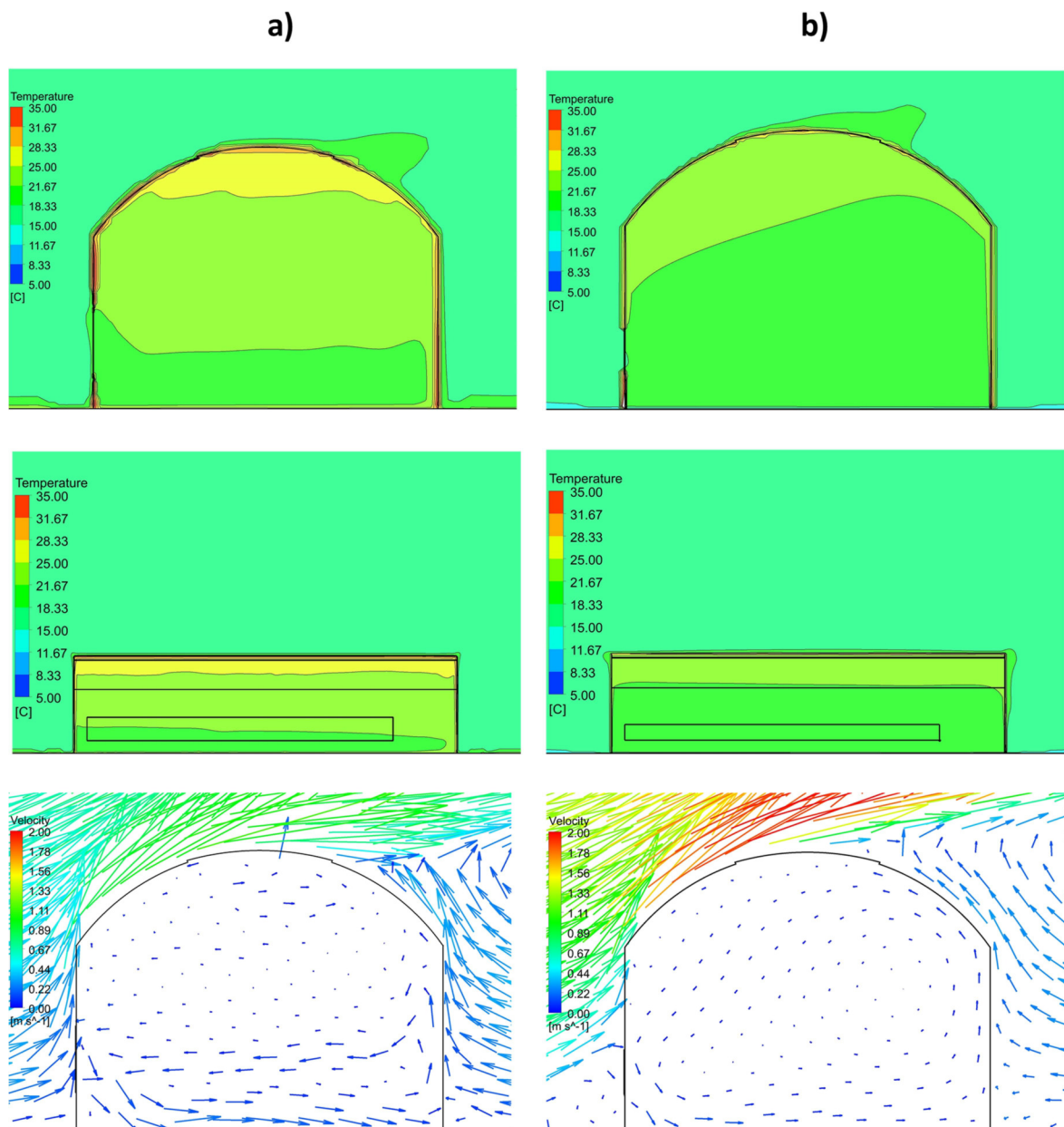


Figura 4.7 Perfiles transversales y longitudinal de temperatura del aire y de velocidad y dirección del viento para las configuraciones: a) Le75-Lo0-Ce0-Co0; b) Le50-Lo0-Ce0-Co0

Este comportamiento es, también, consecuencia de los vectores de velocidad del viento que ingresan al interior del invernadero, los cuales son pequeños magnitud, debido a que existe un solo acceso de entrada y salida de aire en el invernadero, provocando oposición entre los flujos de aire que ingresan y salen del invernadero

c) SE3 (Le0-Lo25-Ce25-Co0)

Esta configuración, incluye la apertura de una ventila cenital, contraria a la ventana lateral. Esta disposición de ventilas permite que flujo de aire ingrese por la ventana lateral y salga por la cenital, siempre y cuando la dirección del viento favorezca con la ventana lateral. Dado, que el flujo que ingresa al invernadero debe ser igual al flujo que sale, se debe considerar el área de apertura de dichas ventilas. Por lo tanto, sí el área de ventana cenital es menor que el de la lateral, ocasionara que el flujo también intente salir por la ventila de ingreso. A pesar de esto, esta configuración, en términos de renovación de aire, es mucho mejor que las configuraciones con una sola apertura de ventilas. Esto se observa de los resultados de simulación (Figura 4.8), los cuales muestran que esta configuración genera un descenso importante de temperatura del aire, y teniendo mayor efecto en las zonas bajas.

d) SE4 (Le12.5-Lo12.5-Ce25-Co0)

Esta configuración caracterizada por la apertura de 3 ventilas, dos laterales y una cenital, soluciona, parcialmente, el problema de las áreas de entrada y salida de flujos de aire, ya que esta disposición permite el ingreso de aire en una lateral y la salida de aire en las otras dos ventilas, lo cual se traduce a mayores renovaciones de aire por minuto. Esto, también se refleja, en los vectores de viento al interior del invernadero, los cuales aumentaron ligeramente en magnitud, en comparación con las anteriores configuraciones. En términos de cambio de temperatura, ocurre un descenso mayor a 5 °C de temperatura del aire en todas las zonas del invernadero.

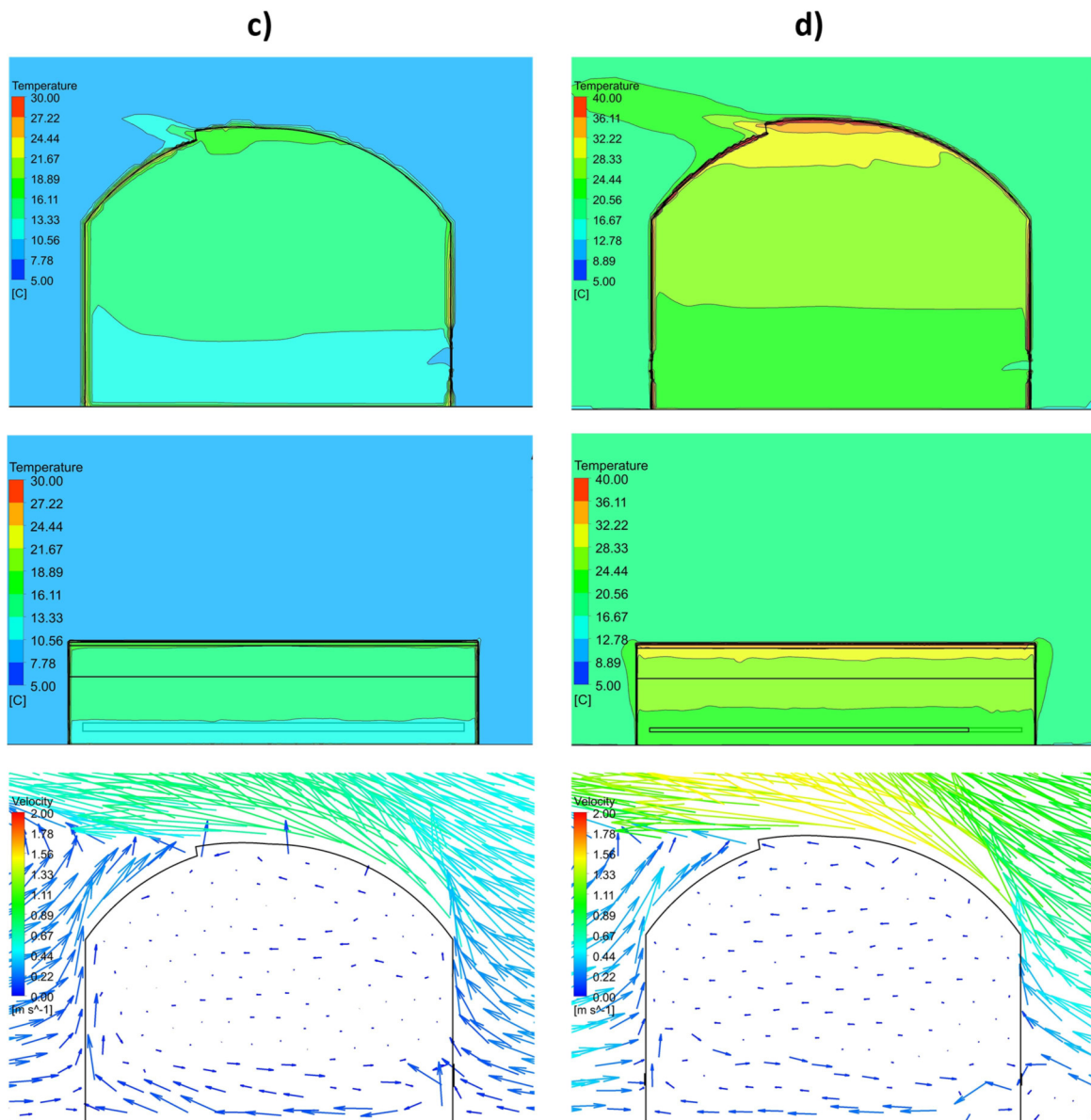


Figura 4.8. Perfiles transversales y longitudinal de temperatura del aire y de velocidad y dirección del viento para las configuraciones: c) Le0-Lo25-Ce25-Co0; d) Le12.5-Lo12.5-Ce25-Co0

e) SE5 (Le25-Lo25-Ce50-Co0) y SE6 (Le50-Lo50-Ce100-Co0)

La disposición de apertura de ventilas de estas configuraciones es la misma, se diferencian únicamente del área de apertura de ventilas. Esta diferencia se traduce en un aumento considerable de la magnitud de los vectores de viento al interior del invernadero (Figura 4.9), el cual tiene un efecto importante en la de ventilación del

invernadero. Sin embargo, el área de apertura de ventilas, no es el único factor importante en la determinación de la tasa de ventilación del invernadero, este también se ve afectado por la velocidad del viento, el cual es mayor en la simulación Le25-Lo25-CeE50-Co0, esto da como resultado que ambas configuraciones originen un descenso de temperatura del aire mayor a 6 °C. Sin embargo, el gradiente vertical de temperatura del aire se conserva después de la apertura de ventilas.

4.2.3. SE7 (Le50-Lo50-Ce0-Co0)

Esta configuración, caracterizada por la apertura de las dos ventanas laterales, ocasiona un descenso importante de temperatura del aire, principalmente, en las zonas bajas del invernadero. Esto se puede apreciar en los resultados de simulación, los cuales muestran la dirección y magnitud de los vectores de viento al interior del invernadero, los cuales presentan una mayor magnitud en las zonas bajas. Sin embargo, también, ocasiona que el gradiente vertical de temperatura del aire aumente a más de 6 °C.

4.2.4. SE8 (Le50-Lo50-Ce50-Co50)

Esta configuración, caracterizada por la apertura de todas las ventilas del invernadero, muestra el mayor descenso de temperatura del aire, mayor a 8 °C, después de la apertura de ventilas. Esta disposición origina que ingresen flujos de aire, con magnitudes relativamente altas, y que la salida del aire se facilite principalmente por la otra ventila lateral, ocasionando que no exista un importante movimiento de aire en el centro del invernadero, y que no se disminuya el gradiente vertical de temperatura del aire.

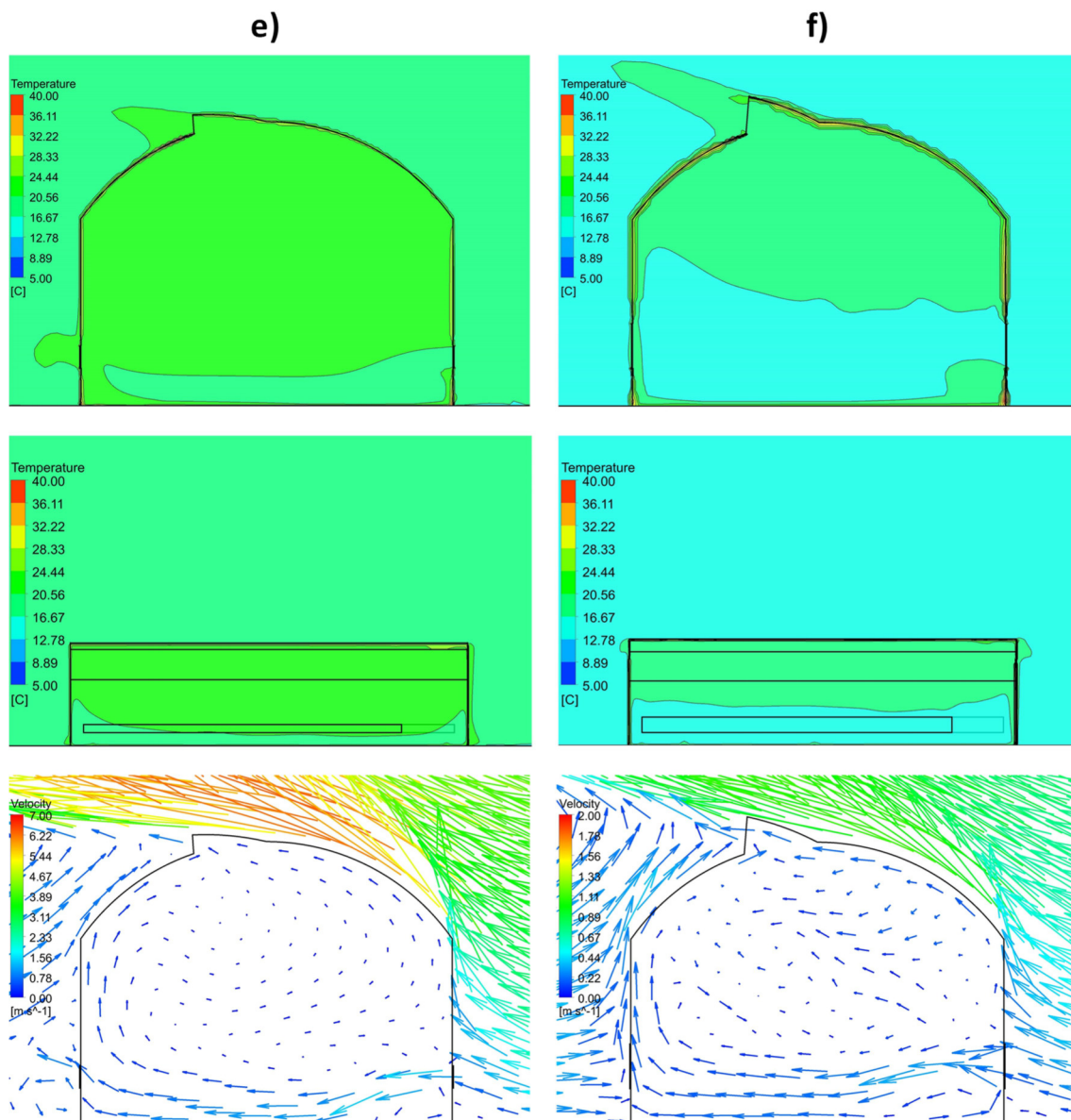


Figura 4.9 Perfiles transversales y longitudinal de temperatura del aire y de velocidad y dirección del viento para las simulaciones: e) Le25-Lo25-Ce50-Co0; f) Le50-Lo50-Ce100-Co0

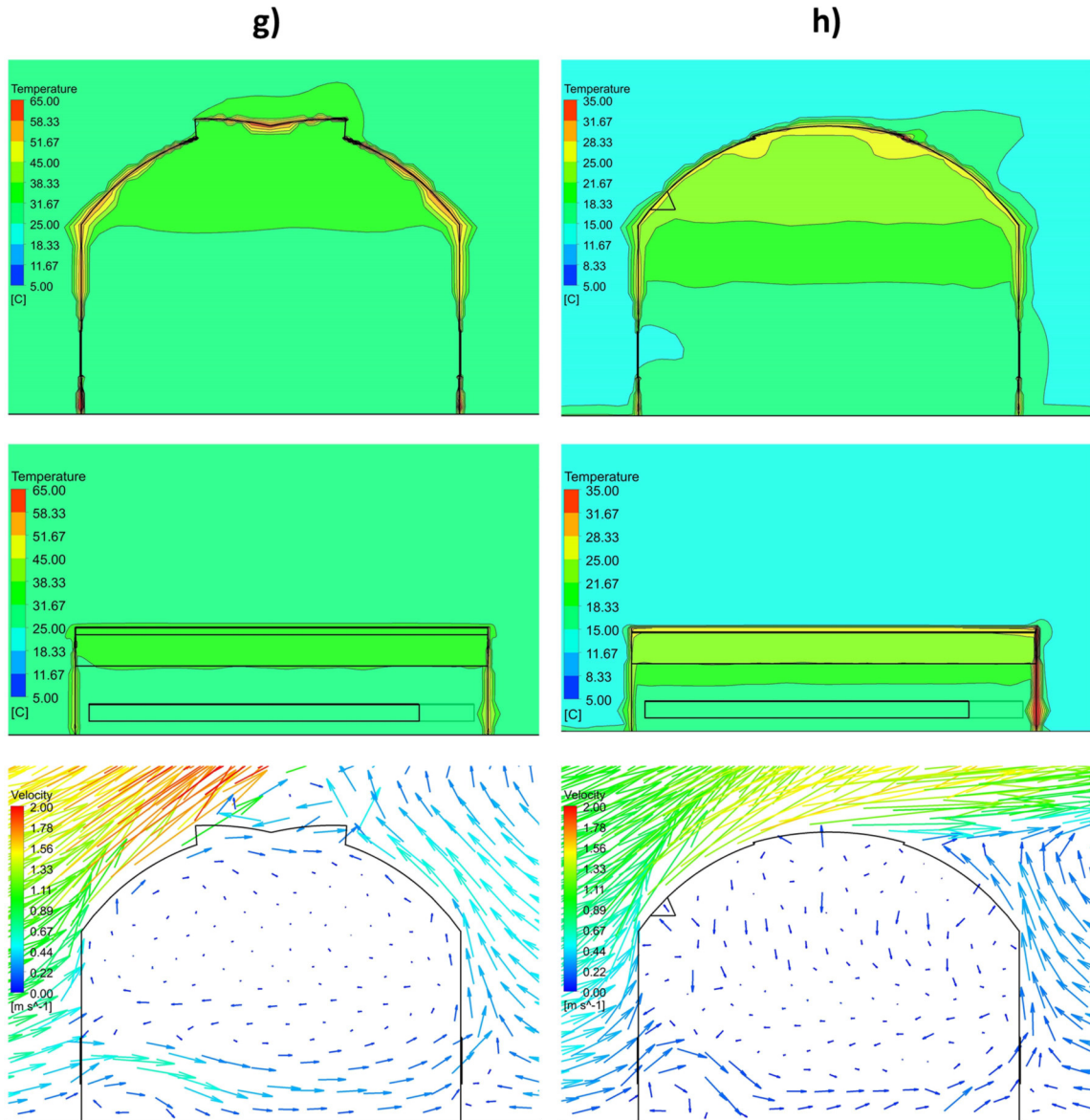


Figura 4.10. Perfiles transversales y longitudinal de temperatura del aire y de velocidad y dirección del viento para las configuraciones: g) SE7 (Le50-Lo50-Ce50-Co50; h) SE8 (Le50-Lo50-Ce0-Co0).

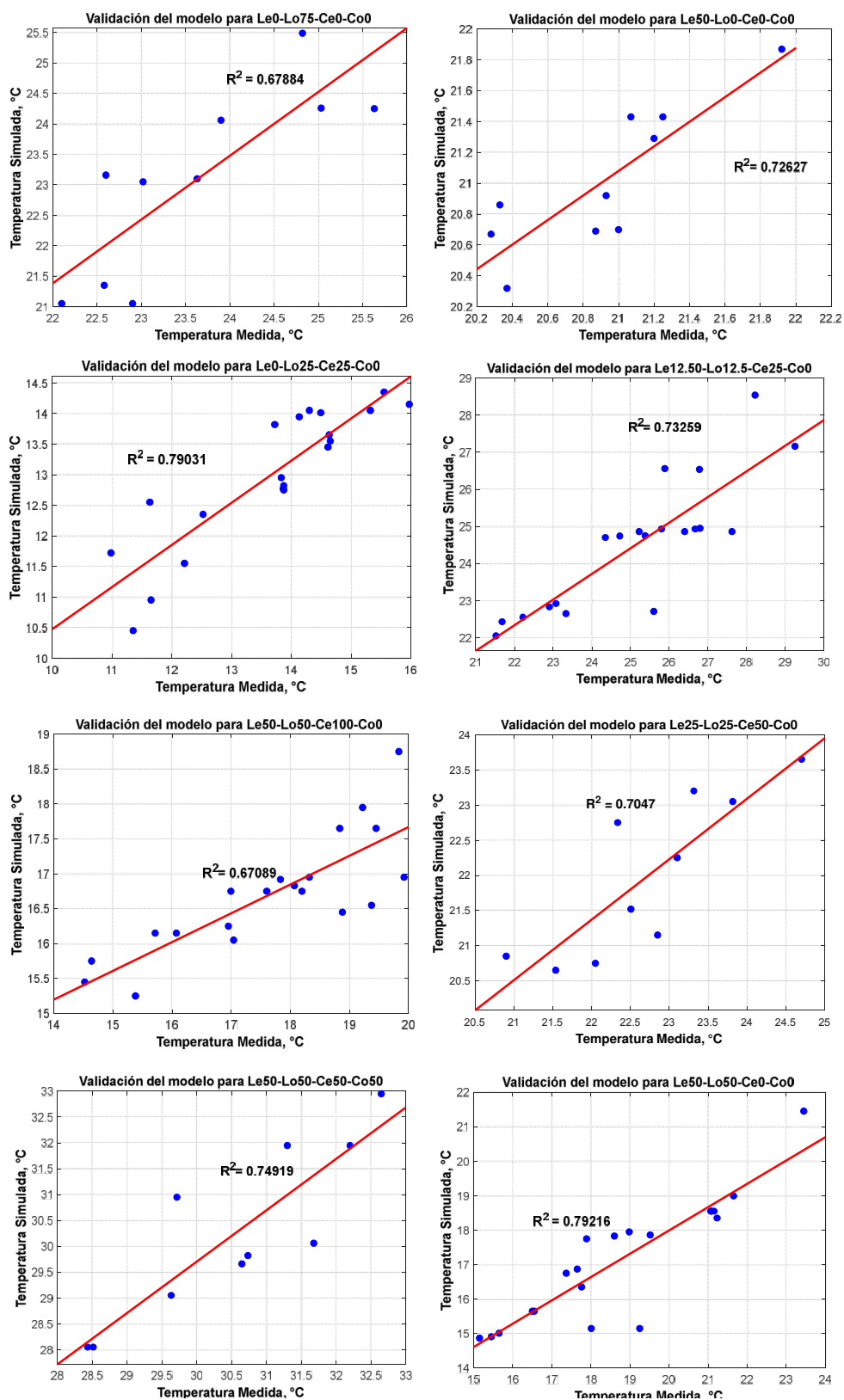


Figura 4.11 Evaluación de los modelos CFD, en estado estacionario, para cada configuración de ventilación.

La evaluación del modelo, a partir del cálculo del coeficiente de correlación (R^2) (Figura 4.11) y del error medio cuadrado (RMSE), muestra que el modelo bajo simulación del régimen en estado estacionario predice adecuadamente el comportamiento de la temperatura del aire al interior del invernadero, bajo determinadas condiciones externas y de configuración de ventilación natural. Los modelos evaluados presentan un valor promedio de R^2 y RMSE igual a 0.72 y 1.07 °C, respectivamente. La mejor predicción se desarrolló para la simulación SE2, ya que bajo esta simulación se obtuvo un RMSE de 0.27 °C y un R^2 de 0.72, mientras que la peor predicción se desarrolló para la configuración SE8, de la cual se obtuvo un RMSE de 1.74 y R^2 de 0.89. Esta variación se debe al tipo de simulación que se empleó, ya que, durante el proceso de renovación de aire, a partir de la apertura de ventilas, las condiciones de frontera como velocidad y dirección del viento, radiación solar, temperatura del aire exterior, y temperatura del suelo son y variantes en el tiempo, lo que ocasiona que la predicción con respecto a la medición difiera mínimamente.

Los diferentes escenarios de simulación muestran un importante gradiente vertical de temperatura del aire; esto se debe principalmente a la propiedad de densidad del aire, la cual disminuye con respecto al tiempo, ocasionando que los volúmenes de aire con menor densidad y con mayor temperatura se concentren en las partes altas del invernadero. Sin embargo, a partir de las mediciones de temperatura del aire, se muestra que antes de la apertura de ventilas, existe un pequeño gradiente horizontal de 2 °C, entre la secciones sur y norte del invernadero. Dicho gradiente disminuye después de la apertura de ventilas.

Cuadro 4.7 Evaluación de los modelos CFD, en estado estacionario, para cada configuración de ventilación.

Simulación	Parámetro	Media aritmética	R^2	RMSE	σ_i	σ_f	$\frac{\sigma_f}{\sigma_i}$
SE1	TIM	297.31	0.67	0.98	0.68	1.13	1.66
	TFM	296.77					
	TFS	296.23					
	T	-0.53					
SE2	TIM	292.88	0.72	0.27	0.295	0.47	1.59
	TFM	294.07					
	TFS	294.17					
	T	1.19					
SE3	TIM	289.61	0.79	0.94	1.34	2	1.49
	TFM	286.54					
	TFS	285.8					
	T	-3.07					
SE4	TIM	303.07	0.73	1.27	2.1	2.58	1.22
	TFM	298.36					
	TFS	298.17					
	T	-4.71					
SE5	TIM	297.77	0.67	1.43	1.923	1.877	0.972
	TFM	290.7					
	TFS	290.12					
	T	-7.07					
SE6	TIM	302.76	0.7	0.94	2.17	1.04	0.4792
	TFM	295.86					
	TFS	295.13					
	T	-6.9					
SE7	TIM	312.47	0.74	0.85	1.39	1.38	0.99
	TFM	303.7					
	TFS	303.4					
	T	-8.77					
SE8	TIM	296.88	0.79	1.91	1.4	2.04	1.4571
	TFM	291.85					
	TFS	290.38					
	T	-5.03					

TFM-Temperatura Final Medida; TFS-Temperatura Final Simulada; TIM-Temperatura inicial medida; ΔT -diferencia de temperaturas (TFM-TIM); σ_i -Desviación estándar inicial σ_f -Desviación estándar final

4.3.2. Simulaciones transitorias. Evaluación del modelo.

Las simulaciones transitorias, bajo la simplificación del modelo a 2D, permitieron obtener mejores resultados con menor costo computacional, en comparación con uno 3D. El tiempo de simulación bajo este régimen transitorio fue diferente para cada configuración, el cual corresponde al intervalo tiempo desde de la apertura de ventilas hasta que se estabiliza la temperatura del aire del invernadero, resultando 9 minutos, 14 minutos y 12 minutos para las simulaciones ST1, ST2 y ST3, respectivamente.

Estas simulaciones permitieron visualizar el comportamiento de la temperatura del aire después de la apertura de ventilas, principalmente la magnitud del descenso de la temperatura del aire en el invernadero. Considerando la temperatura del aire registrada por el sensor S4 y la temperatura del aire simulada en esta ubicación del sensor, se evaluó el modelo en estado transitorio. Las tres simulaciones obtuvieron correctas predicciones, ya que se obtuvieron valores de RMSE igual a 0.65, 0.54 y 0.61 y de R^2 igual a 0.97, 0.94 y 0.94 para las simulaciones ST1, ST2 y ST3, respectivamente.

Cuadro 4.8. Evaluación de los modelos CFD, en estado transitorio, para cada configuración de ventilación.

Simulación	Parámetro	Media aritmética	R^2	RMSE
ST1	TIM	294.96	0.975	0.6538
	TFM	288.63		
	TFS	289.2		
ST2	TIM	294.96	0.948	0.547
	TFM	288.63		
	TFS	289.2		
ST3	TIM	294.96	0.94	0.612
	TFM	288.63		
	TFS	289.2		

TFM-Temperatura Final Medida; TFS-Temperatura Final Simulada;
TIM-Temperatura inicial medida;

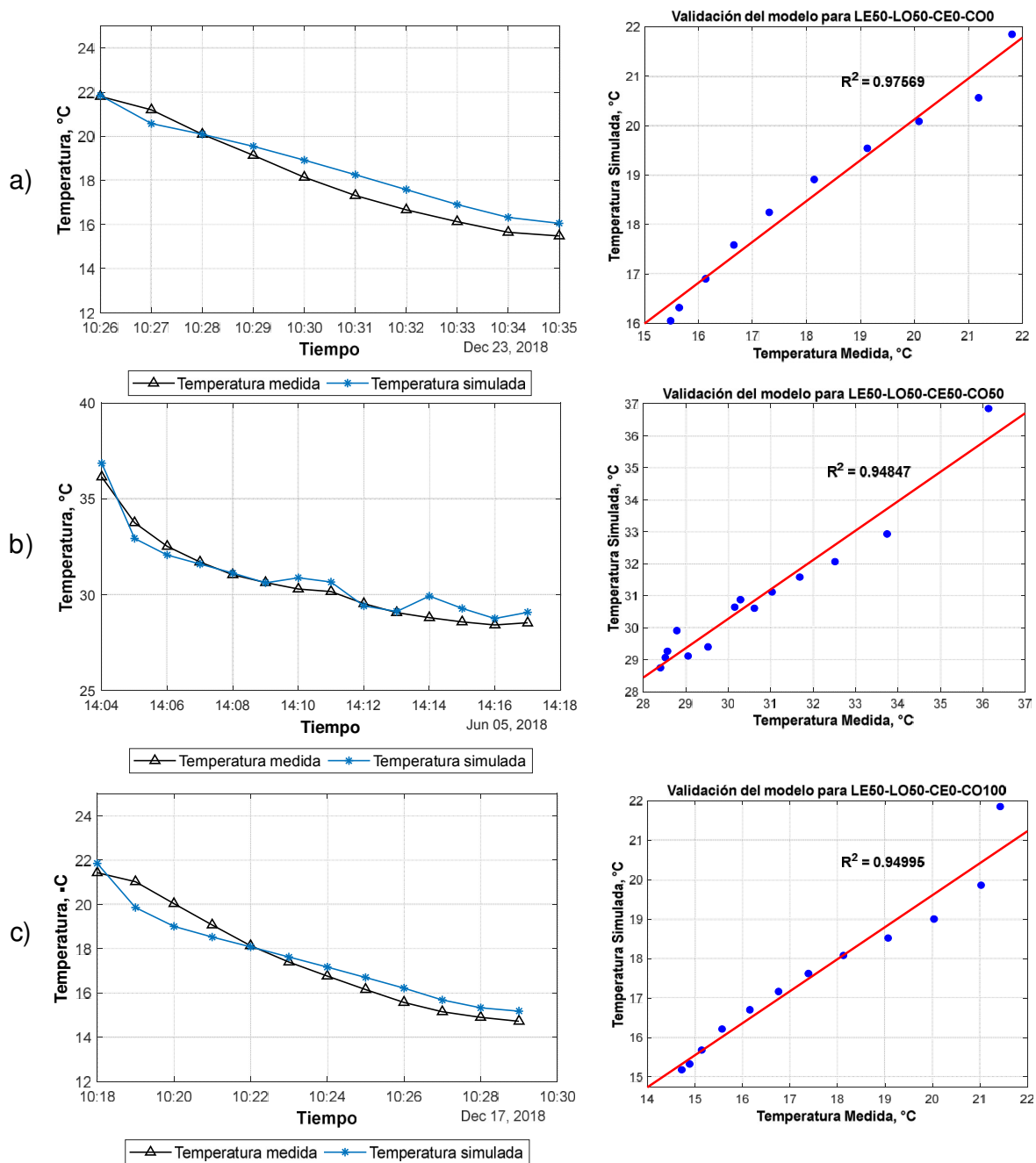


Figura 4.12. Comportamiento de la temperatura del aire de los modelos CFD, en estado transitorio, para cada configuración de ventilación.

4.3.3. Análisis del efecto de la velocidad y dirección del viento

Después de evaluar el modelo, se investigó el efecto de la velocidad y dirección del viento en la disminución y homogenización de la temperatura del aire, bajo una determinada configuración de ventilas. Para esto se utilizó el modelo de la configuración SE1, haciendo variar la velocidad y dirección del viento y resultando

6 diferentes escenarios (Cuadro 4.9). Para determinar el descenso de temperatura del aire, se consideró la media de la temperatura inicial medida (TIMM) para el escenario de simulación SE1, la cual resultó de 24.16 °C (Cuadro 4.7); así mismo para determinar el cambio de gradiente térmico se consideró la desviación estándar inicial σ_i calculada de las mediciones del escenario de simulación SE1, cuyo valor encontrado fue 0.68, y a partir de estos valores constantes se obtuvo el cambio de temperatura del aire y la homogenización del ambiente en el invernadero después de la apertura de ventilas.

Cuadro 4.9. Resultados del efecto de la velocidad y dirección del viento.

Escenario	Velocidad del viento m/s	Dirección del viento	TFSM	T	σ_f	$\frac{\sigma_f}{\sigma_i}$
Escenario a)	0.7	Oeste	23.08	-1.07	1.51	2.23
Escenario b)	2	Oeste	21.52	-2.63	1.12	1.65
Escenario c)	3	Oeste	20.22	-3.93	0.77	1.14
Escenario d)	4	Oeste	19.42	-4.73	0.69	1.02
Escenario e)	2	Este	22.76	-1.39	1.27	1.87
Escenario f)	2	Norte	20.72	-3.43	1.49	2.20

TFSM-Temperatura Final Simulada Media; ΔT -diferencia de temperaturas (TFSM-TIMM); σ_f -Desviación estándar final, σ_i -Desviación estándar inicial.

Los resultados muestran la importancia de la velocidad del viento sobre el cambio de temperatura del aire del invernadero, disminuyendo cuantiosamente a velocidades de aire altas, disminuyendo escasamente a velocidades bajas y posiblemente aumentado a velocidades muy bajas o nulas. Esto, debido a que el área de aperturas de ventilas es muy pequeña y no favorece las renovaciones de aire en el invernadero; por lo tanto, este tipo de configuraciones de ventilas con escasas aperturas se recomiendan utilizarse cuando existan condiciones externas con altas velocidades del viento.

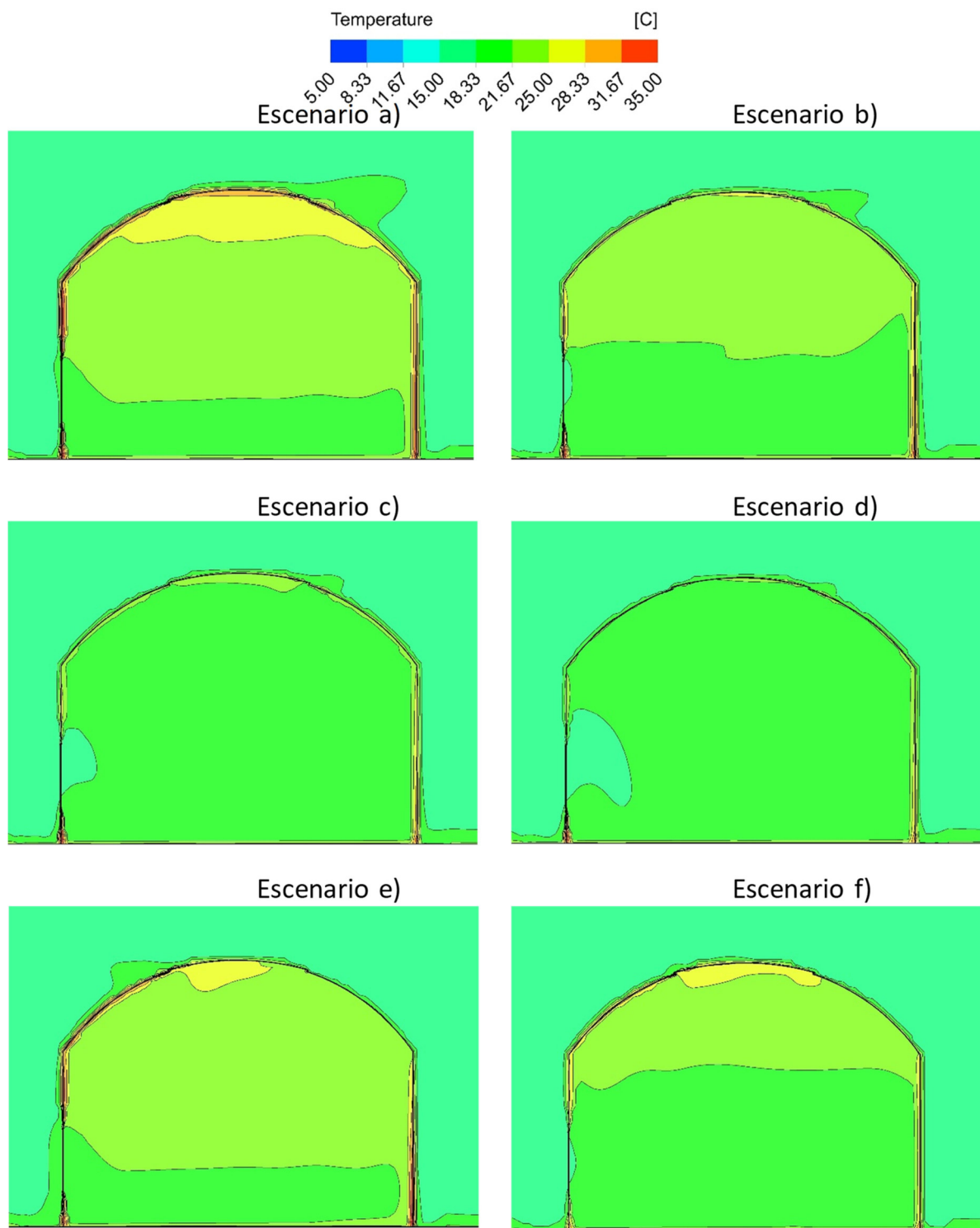


Figura 4.13. Perfiles transversales centrales de temperatura del aire para los diferentes escenarios de velocidad y dirección del viento.

La dirección del viento también es un parámetro importante para el control y homogenización del ambiente en el invernadero. Una dirección contraria a la ventila

abierta, Escenario e), provoca que el descenso de temperatura sea insuficiente y aumenta la heterogeneidad del ambiente en el invernadero. Sin embargo, las corrientes de aire perpendiculares a la apertura de la ventila, Escenario f), provocó un importante descenso de temperatura, sin embargo, esta reducción conllevó a un importante aumento de la heterogeneidad del ambiente en el invernadero,

4.4. Conclusiones

Los modelos numéricos CFD, de las diferentes configuraciones presentan un promedio general de RMSE = 1.02 °C, y un $R^2 = 0.78$, para las simulaciones estacionarias; esto indica que es una aceptable predicción de la temperatura del aire durante la apertura de ventilas; mientras que para las simulaciones transitorias se obtuvo un promedio general de RMSE = 0.604 °C, y un $R^2 = 0.95$; mejorando la predicción y comportamiento de la temperatura del aire durante la apertura de ventilas. Comprobando que las simulaciones transitorias mejoran la predicción y el comportamiento de la temperatura del aire bajo el efecto de la ventilación natural.

A partir del análisis de los datos, enfocándose en el cambio (reducción o disminución) de la temperatura del aire y homogenización del ambiente, se comprobó que:

- La apertura de únicamente una ventila lateral, no tiene efecto significativo sobre la disminución de temperatura del aire interior, y solo conduce a una importante generación de gradiente vertical de temperatura del aire.
- La apertura de dos ventilas laterales favorece la disminución de temperatura (5 °C); sin embargo, se obtuvo un considerable aumento de la heterogeneidad del ambiente (gradiente vertical).
- La combinación de dos ventilas laterales y una cenital, provoca la disminución de temperatura del aire interior hasta 7 °C y homogeniza el ambiente del invernadero.
- La combinación de dos ventilas laterales y dos cenitales ocasiona la mayor reducción de temperatura del aire, hasta casi 2 °C más que la disminución de la configuración de 3 ventilas; sin embargo, la homogenización, en este caso, fue menor que la configuración de 3 ventilas.

- El área de apertura de ventilas es un parámetro importante en la ventilación del invernadero. ya que el aumento del área genera una mayor disminución de la temperatura del aire.
- La velocidad del viento es otro parámetro importante, ya que las altas velocidades, favorecen la disminución y homogenización del ambiente
- Para mejorar las predicciones de los modelos, se deben considerar otras variables climáticas como la temperatura del cielo, la humedad relativa, y la temperatura de la cubierta del invernadero; así mismo, se debe realizar un análisis de sensibilidad para encontrar los parámetros más relevantes del modelo y realizar la calibración del modelo CFD.
- Para futuras investigaciones, se debe realizar la modelación de otras configuraciones de ventilación, con el fin de encontrar la configuración óptima para las condiciones climáticas externas.

Se demostró el efecto del área de apertura de ventilas y de la velocidad y dirección de viento sobre la tasa de ventilación de cada escenario de simulación, y por consiguiente sobre la disminución y homogenización de la temperatura del aire.

Los resultados de las simulaciones se pueden utilizar como referencia para elegir la apertura de ventilas más adecuada para un determinado escenario de condiciones climáticas internas y externas, considerando diversos aspectos como temperatura del aire interior, temperatura del aire interior deseada, velocidad y dirección del viento, radiación solar y temperatura del aire exterior. Esto se aplica considerando que la tasa de ventilación está estrechamente relacionada con la velocidad y dirección del viento y área de apertura de ventilas.

4.5. Literatura citada

- Bartzanas T., Boulard T., Kittas C. (2004) Effect of Vent Arrangement on Windward Ventilation of a Tunnel Greenhouse. *Biosystems Engineering* 88:479-490. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2003.10.006>.
- 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. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.05.014>.
- Boulard T., Draoui B. (1995) Natural ventilation of a greenhouse with continuous roof vents: measurements and data analysis. *Journal of Agricultural engineering research* 61:27-35.
- Boulard T., Haxaire R., Lamrani M.A., Roy J.C., Jaffrin A. (1999) Characterization and Modelling of the Air Fluxes induced by Natural Ventilation in a Greenhouse. *Journal of Agricultural Engineering Research* 74:135-144. DOI: <http://dx.doi.org/10.1006/jaer.1999.0442>.
- Espinal-Montes V., López-Cruz I.L., Rojano-Aguilar A., Romantchik-Kriuchova E., Ramírez-Arias A. (2015) Determinación de los gradientes térmicos nocturnos en un invernadero usando dinámica de fluidos computacional. *Agrociencia* 49:233-247.
- Fidaros, D. K., C. A. Baxevanou, T. Bartzanas and C. Kittas (2010). Numerical simulation of thermal behavior of a ventilated arc greenhouse during a solar day. *Renewable Energy* 35(7): 1380-1386. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.11.013>
- Impron I., Hemming S., Bot G.P.A. (2007) Simple greenhouse climate model as a design tool for greenhouses in tropical lowland. *Biosystems Engineering* 98:79-89. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2007.03.028>.
- Molina-Aiz F.D., Fatnassi H., Boulard T., Roy J.C., Valera D.L. (2010) Comparison of finite element and finite volume methods for simulation of natural ventilation in greenhouses. *Computers and Electronics in Agriculture* 72:69-86. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2010.03.002>.
- Nielsen O.F. (2002) SE—Structures and Environment: Natural Ventilation of a Greenhouse With Top Screen. *Biosystems engineering* 81:443-451. doi:<https://doi.org/10.1006/bioe.2002.0052>
- Pedro. R.-G., Lopez-Cruz I., L. C., C. Y. (2008) Analysis of greenhouse natural ventilation under the environmental conditions of central Mexico. *Transactions of the ASABE* 51:1753-1762. doi:10.13031/2013.25309

- Pérez Parra J., Baeza E., Montero J.I., Bailey B.J. (2004) Natural Ventilation of Parral Greenhouses. *Biosystems Engineering* 87:355-366. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2003.12.004>.
- Piscia D., Montero J.I., Baeza E., Bailey B.J. (2012) A CFD greenhouse night-time condensation model. *Biosystems Engineering* 111:141-154. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.11.006>.
- Piscia D., Muñoz P., Panadès C., Montero J.I. (2015) A method of coupling CFD and energy balance simulations to study humidity control in unheated greenhouses. *Computers and Electronics in Agriculture* 115:129-141. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2015.05.005>.
- Romero P., A. G.G., Choi C.Y., Lopez-Cruz I. (2006) Ventilation rates for a naturally-ventilated greenhouse in central Mexico. *International Symposium on Greenhouse Cooling* 719:65-72. doi:10.17660/ActaHortic.2006.719.5
- Sase, S., E. Reiss, A. Both, and W. J. Roberts. 2002. Developing a natural ventilation model for open.roof greenhouses. *Center for Controlled Environment Agriculture, Newsletter, Rutgers University* 11: (3) 1-7
- SIAP-SAGARPA. (2015) Atlas agroalimentario. .
- Singh G., Singh P.P., Lubana P.P.S., Singh K.G. (2006) Formulation and validation of a mathematical model of the microclimate of a greenhouse. *Renewable Energy* 31:1541-1560. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2005.07.011>.
- Valencia Islas, J. O. (2016). Análisis de un modelo matemático como base de un simulador de clima de invernaderos. Tesis de maestría. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.
- 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* 110:363-377. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.06.001>.
- Versteeg, H. K. and W. Malalasekera (2007). *An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method*, Pearson Education.