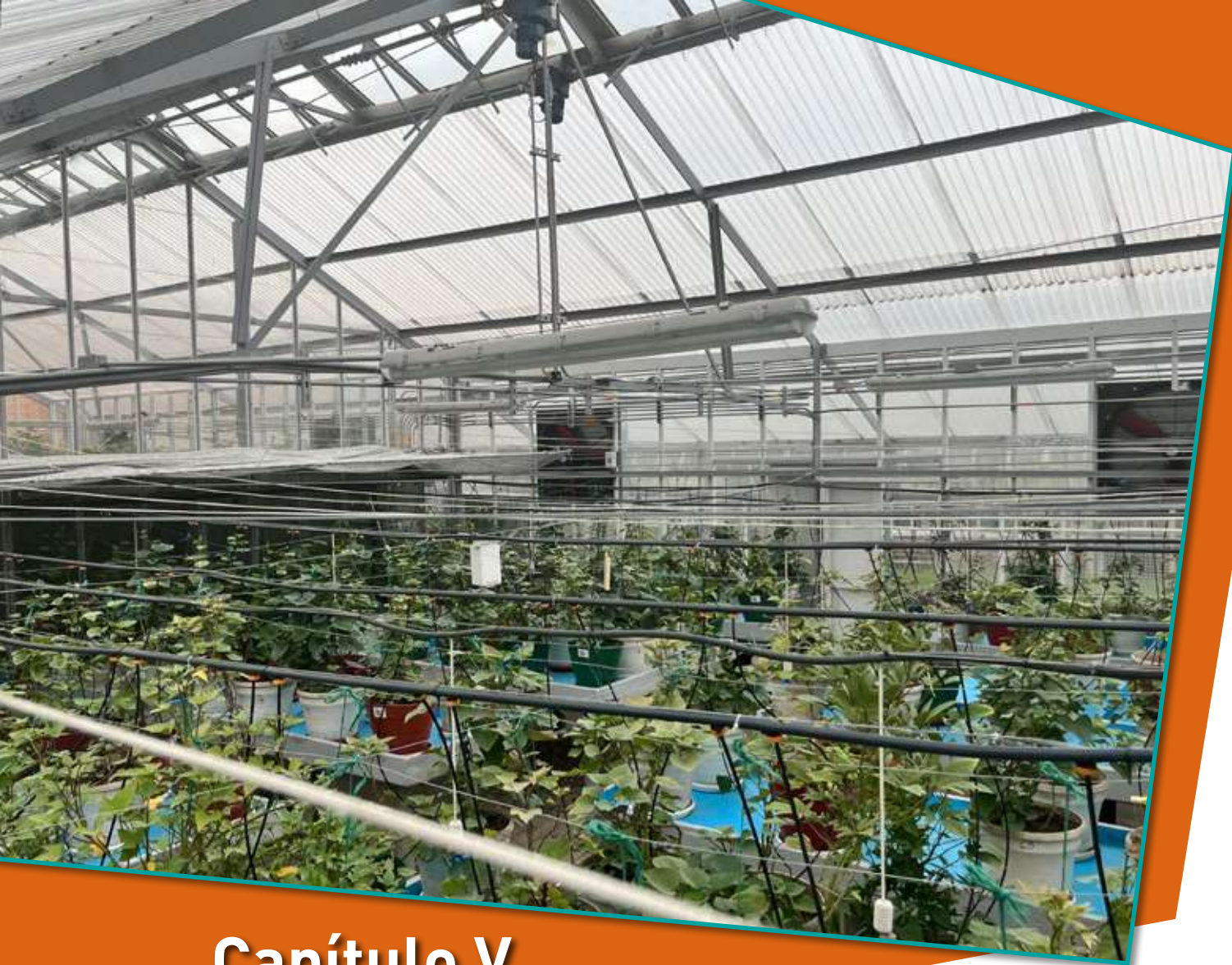




Capítulo V

86

Estrategias de climatización activa para uso en invernaderos del trópico altoandino colombiano

Edwin Andrés Villagrán Munar
John Javier Espitia González
Iván Edilberto Chacón Garzón
Stephanie Johana Numa-Vergel

Introducción

Una estructura de invernadero es una construcción agrícola con cubierta y paredes traslúcidas en la que se usan la radiación solar como fuente energética y el aprovechamiento de los métodos de transferencia de calor y masa para generar condiciones de microclima óptimas para el crecimiento de los cultivos (Villagrán et al., 2019). Asimismo, sin importar su ubicación geográfica, diseño, arquitectura y nivel tecnológico, una estructura de invernadero deberá proteger las plantas de las condiciones climáticas externas, favorecer su desarrollo óptimo, facilitar la consecución de mayores rendimientos y mejorar la calidad de los productos cosechados (Choab et al., 2019).

Los invernaderos pueden tener varias aplicaciones, tales como establecimiento de cultivos comerciales; áreas para labores de investigación, desarrollo e innovación; aplicaciones para secado de productos agrícolas; acuicultura, entre otras (Chauhan & Kumar, 2017). A nivel mundial, aproximadamente 115 países usan estructuras de invernadero para fines de horticultura comercial. En algunas regiones del mundo y bajo algunas condiciones climáticas o aplicaciones específicas, se hace necesario realizar actividades de gestión microclimática mediante el uso de equipos y tecnologías especializados para tal fin (Vanthoor et al., 2011).

En el interior del invernadero, es importante controlar variables como la temperatura, la humedad, el déficit de presión de vapor, el nivel de radiación solar e, incluso, la concentración de CO_2 . Estas son las que, en conjunto, se denominan variables microclimáticas, y que tienen relación directa con actividades fisiológicas de las plantas, como la fotosíntesis y la transpiración (Singh et al., 2017). Asimismo, en función de las condiciones climáticas locales y de las demandas energéticas de la estructura del invernadero, las actividades de climatización (enfriamiento, calefacción, humidificación y deshumidificación) son responsables de un alto porcentaje de los costos de producción (Kittas et al., 2013).

Por lo tanto, en este capítulo se incluyen algunas definiciones técnicas de las variables de microclima relacionadas con la producción bajo invernadero, así como las estrategias de climatización activa existentes y adaptables a las condiciones climáticas del trópico altoandino colombiano.

Variables de microclima relacionadas con la producción agrícola bajo invernadero

El microclima generado en el interior de un invernadero surge a partir de las relaciones de transferencia de calor y masa que existen entre las condiciones climáticas locales externas; la tipología y el diseño de la estructura; los materiales de recubrimiento del invernadero, y el tipo y estado fenológico del cultivo (De la Torre-Gea, 2013). En general, en un alto porcentaje de los invernaderos usados a nivel mundial, las condiciones de microclima no son las más adecuadas para la producción agrícola, por lo tanto, el microclima se convierte en factor limitante que no permite que la agricultura intensiva bajo cubierta exhiba todo su potencial (Lorenzo, 2012).

En términos generales, los parámetros microclimáticos inciden, en el corto plazo, en los procesos de fotosíntesis y transpiración. Este último es responsable del transporte de agua y nutrientes, y, en consecuencia, de la distribución de fotoasimilados a las diferentes partes de la planta (Moot et al., 2003). En el mediano plazo, este tipo de condiciones microclimáticas no óptimas termina afectando el crecimiento de la planta a nivel espacial, así como en el desarrollo foliar, la producción de materia seca, la redistribución a las partes de interés comercial de la planta e, incluso, se puede afectar la calidad de los productos cosechados (Lorenzo, 2012). Por ello es muy importante conocer cuál es la relación de las variables de microclima con el crecimiento y el desarrollo de las plantas.

Radiación solar

La radiación solar es la principal fuente de energía que ingresa al invernadero. La radiación interceptada por la cubierta del invernadero es la responsable de la ganancia energética y, por ende, del aumento de temperatura durante las horas de periodo diurno (Soussi et al., 2022). Además, parte de la radiación que ingresa al invernadero es capturada y almacenada en el suelo para ser liberada lentamente en las horas de la noche, convirtiéndose en una de las fuentes de aporte de calor, lo que permite que la temperatura nocturna no disminuya de forma dramática (Mesmoudi et al., 2017). Por otra parte, la radiación solar interceptada por las hojas de las plantas impulsa el proceso fotosintético, lo que convierte la energía solar en energía química, usada por las plantas para sus procesos metabólicos (Lorenzo, 2012).

En términos de balance de energía, la radiación solar es la responsable de los flujos de calor latente y calor sensible generados en el sistema

planta-suelo-atmósfera, así como de procesos de transferencia de masa, como la evapotranspiración (González-Piqueras et al., 2015). Por otro lado, el espectro de la radiación usado para la fotosíntesis en plantas verdes, conocido como radiación fotosintéticamente activa (PAR), y que se expresa en términos de densidad de fotones fotosintéticos ($\text{mmol de fotones m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), depende de las condiciones meteorológicas estacionales, de la geometría de la cubierta y del material usado en ella (Möttus et al., 2013).

En el caso de los cultivos hortícolas, que son especies de alta saturación lumínica, se ha reportado que la fotosíntesis neta no llega siquiera a niveles de $1.400 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Por lo tanto, para estas especies, la radiación solar sí es un factor limitante para el desarrollo del cultivo (Lorenzo, 2012). Adicionalmente, se debe mencionar que, para especies hortícolas de interés, como tomate, pepino y pimentón, al ser plantas de porte largo y con doseles vegetales suculentos, la radiación PAR es heterogénea desde la parte alta del dosel hacia las hojas cercanas al suelo. Por lo anterior, para estas especies es recomendable analizar muy bien la densidad de siembra, así como las podas de formación y mantenimiento de la planta (Bojacá et al., 2012a).

Temperatura

La temperatura del aire y del suelo (o sustrato) en el interior del invernadero es una variable clave que incide directamente sobre el crecimiento y desarrollo de las especies vegetales, en las etapas tempranas de crecimiento de las plantas. La temperatura es la encargada de su desarrollo foliar (Soussi et al., 2022), y es así como el adecuado crecimiento de una amplia gama de especies vegetales de interés comercial ocurre en rangos de temperatura que oscilan entre los 10 y los 30 °C (Sultan et al., 2016). Sin embargo, cuando en el interior del invernadero se presentan temperaturas mínimas inferiores a 10 °C o superiores a 30 °C, y no se cuenta con los equipos de climatización que permitan realizar la gestión microclimática, se afecta la actividad fisiológica de las plantas, lo que ralentiza su crecimiento y genera pérdidas de potencial productivo, tanto en calidad como en cantidad (Lorenzo, 2012).

En los últimos años, el interés por optimizar la temperatura del entorno radicular ha sido creciente. En ese sentido, hay reportes que indican que la temperatura de la raíz de una planta debe, en lo posible, mantenerse por encima de 2 °C respecto a la temperatura ambiental (Martínez & Roca, 2011). Generalmente, cuando la temperatura del sistema radicular es baja, se afectan procesos de absorción de nutrientes, a causa de una menor actividad metabólica radicular y de un cambio en las propiedades físicas del agua, lo cual dificulta su movilidad desde la raíz hacia la parte aérea de la planta (He et

al., 2022). En la tabla 19, se incluyen algunos rangos de temperatura relevantes para algunas especies cultivadas bajo invernadero. El manejo adecuado de la temperatura dentro de estos rangos es determinante para asegurar la productividad del cultivo (Fleisher et al., 2006).

Tabla 19. Rangos de temperatura relevantes para algunas especies cultivadas bajo invernadero

Especie	Temperaturas (°C)					
	Mínima		Óptima		Máxima biológica	Óptima radicular
	Letal	Biológica	Noche	Día		
Tomate.	0-2	8-10	13-16	22-26	26-30	15-20
Pepino.	0-4	10-13	18-20	24-28	28-32	20-21
Pimentón.	0-4	10-12	16-18	22-28	28-32	15-20
Berenjena.	0-2	9-10	15-18	22-26	30-32	15-20
Melón.	0-2	12-14	18-21	24-30	30-34	20-22
Calabacín.	0-4	10-12	15-18	24-30	30-34	15-20
Lechuga.	0-2	4-6	10-15	15-20	25-30	10-12
Fresa.	-2-0	6	10-13	18-22	-	12-15
Rosa.	-6-0	8-12	14-16	20-25	30-32	15-18
Gerbera.	0-2	8-10	13-15	20-24	-	18-20
Clavel.	-4-0	4-6	10-12	18-21	26-32	15-18

Fuente: Elaboración propia con base en Tesi (1983)

Humedad relativa

Otra de las variables clave para mantener unas condiciones de microclima que garanticen el adecuado crecimiento del cultivo en el interior del invernadero es la humedad. De acuerdo con algunos estudios, se ha determinado que, dependiendo del tipo cultivo, la humedad relativa en el invernadero debe oscilar entre un valor mínimo de 60 % y un valor máximo de 80 % (Amani et al., 2020) (tabla 20). Dentro del invernadero, las condiciones de humedad pueden llegar a puntos de saturación indeseables para el bienestar de las plantas. El exceso de vapor de agua en el ambiente interior puede originarse a partir de las condiciones climáticas extremas y debido a los aportes de la condensación del agua procedente de fenómenos de evaporación y transpiración (Bouhoun Ali et al., 2014).

Tabla 20. Rango de humedad óptimo para algunas especies cultivadas bajo invernadero

Especie	Humedad relativa óptima (%)	Especie	Humedad relativa óptima (%)
Tomate.	55-60	Lechuga.	60-80
Pepino.	70-80	Fresa.	60-70
Pimentón.	65-70	Rosa.	70-75
Berenjena.	65-70	Gerbera.	60-70
Melón.	60-80	Clavel.	70-80

Fuente: Elaboración propia con base en Tesi (1983)

Valores de humedad inferiores al 60 % pueden provocar estrés hídrico en la planta, así como deformación y reducción del tamaño de hojas y tallo (Vadiee & Martin, 2012). Por otro lado, ambientes con valores de humedad superiores al 80 % ocasionan un ambiente propicio para la aparición de enfermedades causadas por hongos, y translocación de nutrientes que afectan el crecimiento de la planta (Villagrán & Bojacá, 2019).

Déficit de presión de vapor

Esta variable de microclima relaciona la temperatura y la humedad relativa en un mismo momento temporal. El déficit de presión de vapor (DPV) se define como la diferencia entre la presión del vapor de agua en el punto de saturación y la presión real del vapor de agua a la temperatura del invernadero (Amani et al., 2020). Valores altos de DPV (> 1,5 kPa) se suelen presentar en ambientes de baja humedad y alta temperatura. Este tipo de ambientes acelera la transpiración de las plantas y puede ocasionar su deshidratación. Bajo estas condiciones, también se presenta una reducción de la tasa de fotosíntesis neta. Cuando las plantas se someten continuamente a estos ambientes altamente evaporativos, tienen lugar desórdenes fisiológicos —como necrosis apical en tomate y pimiento— que generan grandes pérdidas económicas por su rechazo en el comercio (Lorenzo, 2012).

En el caso contrario, ambientes con valores bajos de DPV (< 0,5 kPa) se producen en condiciones de baja temperatura y alta humedad. Estas atmósferas de baja evaporación de agua limitan la transpiración de las plantas, lo que produce fisiopatías asociadas a desequilibrio hormonal y a un limitado transporte de iones hacia los órganos productivos de las plantas (Lorenzo, 2012). Bajo estas condiciones, también es característico que se genere una mayor tasa de incidencia de enfermedades causadas por hongos. Por lo tanto, es ideal

que, en el invernadero, se cuente con sistemas de climatización que permitan mantener las plantas en ambientes con valores de v_{PD} que oscilen entre 0,45 y 1,25 kPa (Villagrán et al., 2022).

Concentración de CO_2

El nivel de CO_2 en el ambiente del invernadero es un factor clave para el proceso de la fotosíntesis. La planta toma el CO_2 del ambiente y lo incorpora al tejido vegetal convirtiéndolo en materia seca (López-Cruz et al., 2005). El nivel de CO_2 ambiental actual es inferior al nivel de CO_2 óptimo que necesitan las plantas para expresar tasas de fotosíntesis altas, por lo tanto, se puede decir que la tasa de asimilación de carbono en niveles de CO_2 atmosférico (415 ppm) está por debajo del potencial que tienen las plantas en ambientes con carbono enriquecido (> 800 ppm) (Lorenzo, 2012).

Las estrategias de enriquecimiento carbónico se han convertido en otra área de especial interés para los investigadores de la horticultura protegida. Este tipo de actividad tiene un efecto positivo en el crecimiento del cultivo, siempre y cuando también se tenga control sobre la temperatura, la humedad y el nivel de luminosidad, y se cuente con sistemas precisos de aplicación de agua y nutrientes (Vox et al., 2010).

En general, el enriquecimiento de CO_2 en el ambiente interior del invernadero puede permitir aumentos de las tasas de fotosíntesis hasta de un 50 %, en comparación con plantas que se desarrollan en ambientes con niveles de CO_2 cercanos al nivel atmosférico (Mortensen, 1987). Por otro lado, algunos estudios han demostrado que los niveles óptimos de CO_2 se encuentran dentro de los rangos entre los 700 y 1.000 $\mu\text{mol mol}^{-1}$, dependiendo del tipo de cultivo. Estos mismos estudios recomiendan no exceder niveles de CO_2 de 1.000 $\mu\text{mol mol}^{-1}$, ya que estos pueden producir algunos daños en las plantas y retardos en su proceso de crecimiento (Nederhoff, 1994; Sánchez-Guerrero et al., 2009).

Estrategias de control de clima activo

El control climático activo en invernaderos se usa principalmente para garantizar las condiciones de microclima óptimas para el crecimiento y desarrollo de los cultivos, así como para hacer más eficiente el uso de agua y energía (Parafors & Griepentrog, 2013). El control climático activo está basado en sistemas automatizados con monitoreo en tiempo real. El *hardware* del sistema incluye los sensores de monitoreo y registro de condiciones ambientales dentro y fuera del invernadero, así como una serie de controladores y actuadores para la gestión del microclima (Zhang et al., 2020).

Sistemas de ventilación natural automatizados

La ventilación natural es un método pasivo ampliamente utilizado a nivel mundial. El principio de funcionamiento está basado en la convección libre vía flotabilidad, por la cual el aire caliente del interior del invernadero, al tener una menor densidad, tiende a flotar y buscar la salida por las áreas de ventilación ubicadas en la cubierta del invernadero (Molina-Aiz et al., 2009). Este flujo de aire de salida es remplazado por un aire fresco del ambiente exterior que ingresa al invernadero a través de las áreas de ventilación (Baeza et al., 2009). Asimismo, la tasa de renovación del invernadero puede verse modificada debido a la convección forzada vía efecto eólico, con la que el viento exterior que se desplaza en sentido horizontal golpea las áreas de ventilación en sentido perpendicular e ingresa al invernadero, generando un flujo de renovación de aire (Benni et al., 2016) (figura 32).



Figura 32. Áreas de ventilación de techo y laterales mecanizadas y automatizadas.

Fuente: Elaboración propia

Para invernaderos tropicales ubicados en climas fríos y húmedos, se establece que el área de ventilación mínima debe ser del 30 % respecto a la superficie cubierta, de modo que si un invernadero tiene 1.000 m² de superficie, las áreas de ventilación deben ser de 300 m², ubicados de forma equitativa entre las paredes laterales y la región de la cubierta (Bournet & Boulard, 2010). Por el contrario, en regiones cálidas y húmedas, estas áreas de ventilación deben ser superiores al 45 %, con respecto a la superficie cubierta. Esto garantizará que en el invernadero se generen tasas de ventilación superiores a 0,05 m³s⁻¹m⁻², lo cual permitirá tener un grado aceptable de gestión de las condiciones microclimáticas (Villagrán et al., 2020).

Modelo de balance energético simplificado para el cálculo de la tasa y el caudal de ventilación en un invernadero

Con la finalidad de analizar las variables que determinan la temperatura en el interior de un invernadero, dentro de las cuales se encuentra la ventilación natural, Kittas et al. (2005) proponen un modelo de balance de energía simplificado, representado en la ecuación 1.

$$V_a = \frac{0,0003\tau R_{s,omax}}{\Delta T} \quad \text{Ecuación 1}$$

donde,

V_a es la relación Q/A_g y Q es el caudal de ventilación ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$).

A_g es la superficie del suelo cubierta por el invernadero (m^2).

τ es el coeficiente de transmisión de la radiación solar al interior del invernadero.

$R_{s,omax}$ es el valor máximo de la radiación solar exterior (W m^{-2}).

ΔT es el valor del diferencial de temperatura entre el interior del invernadero y el ambiente exterior.

Por lo tanto, según datos reportados en el estudio de Villagrán et al. (2022), al aplicar la fórmula para una condición típica del mediodía colombiano, en el que la radiación solar puede ser de 800 Wm^2 , si quisiéramos mantener un diferencial de temperatura entre los ambientes interior y exterior de máximo 2°C , en un invernadero con un coeficiente de transmisión de la radiación solar de 0,79, se tendría (ecuación 2):

$$V_a = \frac{0,0003(800 * 0,79)}{2} = 0,095 \quad \text{Ecuación 2}$$

Por lo tanto, V_a que es la tasa de ventilación por m^2 de superficie cubierta, presentaría un valor de $0,095 \text{ m}^3\text{s}^{-1}\text{m}^{-2}$. Si, por ejemplo, el invernadero tiene una superficie cubierta (A_g) de 1.000 m^2 , se necesitaría un caudal de ventilación (Q) de $94,8 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, para mantener la temperatura con un diferencial de $+2^\circ\text{C}$, respecto a la temperatura exterior.

Ventilación forzada o mecánica

La ventilación forzada, apoyada en extractores y ventiladores de gran caudal, es una alternativa viable cuando la ventilación natural es ineficiente para controlar los niveles de temperatura y humedad en el interior del invernadero. Por otra parte, la ventilación mecánica es ideal para nivelar la temperatura del interior del invernadero con la del ambiente exterior, con una distribución altamente homogénea (Santosh et al., 2017). Asimismo, estudios realizados por Flores-Velázquez et al. (2014) han revelado que una alternativa económicamente viable y con buenos resultados en la dinámica del flujo de aire es combinar la ventilación mecánica con la apertura de las áreas de ventilación del techo. Los extractores y ventiladores usados en ventilación mecánica de invernaderos deben ser de gran caudal ($> 11000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$), con una capacidad de 30 Pa de presión estática, y deben estar equipados con rejillas o persianas de ventilación que se cierren cuando los equipos estén apagados. Por último, deben ser lo más eficientes posible en el consumo de energía, ya que este factor ayudará a reducir el costo económico de la actividad de ventilación (Kittas et al., 2013).

El método de extracción de aire consiste en colocar, en una pared del invernadero, extractores de gran caudal separados lateralmente con una distancia máxima de 8 m. En la pared opuesta, debe existir un área de ingreso de aire, por lo menos un 25 % más grande que el área del extractor (Kittas et al., 2013) (figura 33). No es recomendable que la distancia entre la pared de extracción y la pared de ingreso de aire supere los 25 m, puesto que se generaría una condición microclimática con alta heterogeneidad de temperatura y humedad. Cuando esta situación se presente, se recomienda usar recirculadores de aire de flujo horizontal, ubicando las direcciones de tiro en forma intercambiada, para generar una buena mezcla del aire en el invernadero (Flores-Velázquez et al., 2014).

Los sistemas de ventilación forzada basados en el método extractor-soplador permiten el suministro de altos índices de renovación de aire, con lo cual se obtiene una alta tasa de enfriamiento (Kittas et al., 2013) (figura 34). Lo anterior permitirá que pueda incluso igualarse la temperatura interior del invernadero con la temperatura del ambiente exterior en momentos de alta radiación, con lo cual se evitarán condiciones de alta temperatura, no adecuadas para los cultivos (Martínez & Roca, 2011). Cuando se emplee este método, debe garantizarse que la velocidad del aire que ingresa a la zona de cultivo no supere los $1,5 \text{ ms}^{-1}$, puesto que puede generar deshidratación o daños sobre las primeras hileras de plantas (Flores-Velázquez et al., 2012). Con este sistema de ventilación, también es importante que la distancia en la pared entre

ventiladores y extractores no sea mayor a 30 m, puesto que se generará una condición de temperatura y humedad bastante heterogénea. Nuevamente, se recomendaría para este caso el uso de recirculadores de aire en el interior del invernadero.

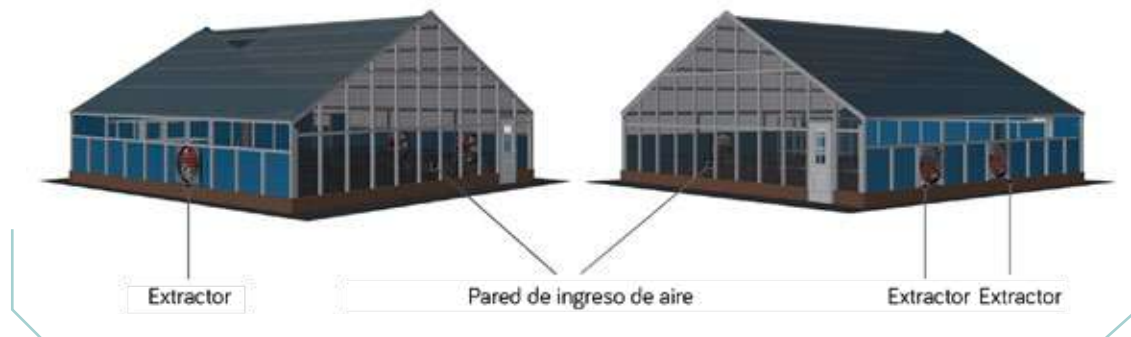


Figura 33. Método de ventilación forzada con pared de ingreso de aire.

Fuente: Elaboración propia



Figura 34. Método de ventilación forzada mediante extracto y soplador.

Fuente: Elaboración propia

Enfriamiento evaporativo simple

Conocido a nivel local como nebulización a baja presión, este sistema es usado en invernaderos comerciales y ofrece una alternativa de enfriamiento al humedecer el aire del interior del invernadero y forzar la pérdida energética del ambiente interior a partir de la evaporación de las gotas de agua. En términos físicos, ello no es más que la conversión del calor sensible del agua en calor latente (Soussi et al., 2022). El agua es aplicada mediante nebulizadores equipados con pequeñas boquillas por donde sale el agua presurizada a valores superiores de 4 bar y con un tamaño de gota de 200 μm (Ishii et al., 2013) (figura 35). Este tipo de sistema suele tener una mejor capacidad de enfriamiento en regiones con condiciones climáticas cálidas y secas. Además, si se requiere un sistema de mayor eficiencia, se puede usar nebulización de alta presión, con la que el tamaño de gota puede ser de 10 μm a una presión de operación de 40 bar (Ohyama et al., 2008).

Es importante mencionar que este sistema de enfriamiento presenta una alta homogeneidad, comparado con los otros sistemas de enfriamiento disponibles para invernadero. Además, en estudios realizados por Kittas et al. (2013), se demostró que se trata de una herramienta de optimización de la temperatura, pero también para acondicionamiento hídrico de las plantas. Sin embargo, como es un sistema que funciona preferiblemente con agua dulce y de alta calidad, su uso es limitado en regiones áridas con poca disponibilidad de agua (Perdigones et al., 2008).

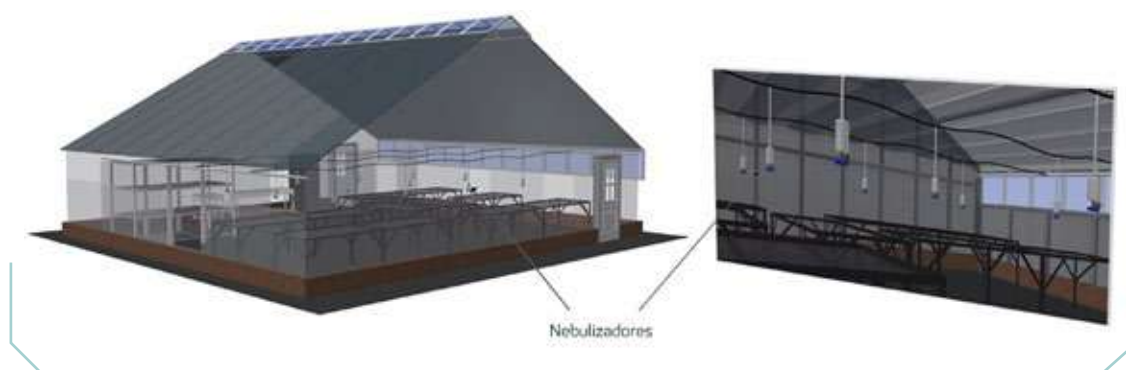


Figura 35. Método de enfriamiento evaporativo por nebulización de agua.

Fuente: Elaboración propia

Los sistemas de nebulización están equipados con un cabezal de riego pre-surizado, con el que el agua se distribuye en redes de tuberías fabricadas en PVC y tuberías de portanebulizadores fabricadas en polietileno (Bojacá et al., 2012b). Comercialmente, los nebulizadores se pueden adquirir con una, dos o cuatro boquillas de nebulización de agua, que, generalmente, se ubican en la parte superior de las mesas de cultivo a una altura mínima de 1,8 m, aunque entre más altos se ubiquen en el interior del invernadero, mejor será la uniformidad de enfriamiento (Kittas et al., 2013). La separación entre nebulizadores oscila entre los 1,5 y 3,0 m, y la separación entre líneas de nebulización, entre 1,5 y 4,5 m. Los pulsos de riego por nebulización para control de temperatura requieren de una adecuada ventilación y de un apropiado flujo de aire ($0,5$ y $1,0 \text{ ms}^{-1}$). La eficiencia de la evaporación de agua aumenta en un 150 % en sistemas de nebulización con ventilación versus sistemas sin ventilación (Kittas et al., 2013).

Enfriamiento mediante sistema de almohadilla evaporativa y extracción de aire

Es un método de enfriamiento altamente eficiente y uno de los más utilizados en la horticultura bajo invernadero, principalmente en regiones de clima cálido con temperaturas superiores a 30°C y humedad relativa inferior al 60 % (Ghani et al., 2019). Su principio de funcionamiento establece que los ventiladores y la almohadilla evaporativa deben ser instalados en paredes opuestas (Kittas et al., 2013) (figura 36). La evaporación del agua a través de la almohadilla se da por las características porosas del material de celulosa con el cual se fabrica este tipo de paneles o almohadillas. El fenómeno evaporativo produce disminución de la temperatura y humidificación del aire en el interior del invernadero (Ghani et al., 2019). En regiones con climas extremos (temperatura de 38°C y 15 % de humedad relativa), este tipo de sistema de enfriamiento permite acondicionar la temperatura en el interior a un valor de 27°C y con una humedad relativa de 52 % (Kubota et al., 2006).

El sistema en conjunto de extracción de aire y almohadilla evaporativa suele funcionar mediante el principio de presión negativa (Kittas et al., 2013). Lo anterior permite que, al momento de encender los extractores, se genere un flujo de aire desde el ambiente exterior hacia el interior. El flujo de aire es forzado a pasar a través de la almohadilla porosa y dirigirse hacia la pared de extracción de aire (Soussi et al., 2022). Por lo general, en este tipo de sistema de enfriamiento se genera un gradiente térmico con una zona de baja temperatura en la zona de la pantalla evaporativa, y una zona más cálida en la pared de extracción de aire (Chen et al., 2014).



Figura 36. Enfriamiento por extracción de aire y almohadilla evaporativa.

Fuente: Elaboración propia

Algunas recomendaciones técnicas al momento de instalar un sistema de almohadilla complementado con extractores de aire establecen que la distancia máxima entre las paredes opuestas (extracción y almohadilla evaporativa) no debe superar los 40 m, y que el área de almohadilla deber ser igual a 1 m^2 por 20 m^2 de superficie cubierta de invernadero. Se recomiendan almohadillas de celulosa de 200 mm de espesor. Por otra parte, se debe garantizar un flujo de aire de $180 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ por m^2 de superficie de invernadero, lo cual permitirá que en la almohadilla se generen velocidades de aire superiores a $0,75 \text{ m s}^{-1}$, lo que garantizará un buen funcionamiento del sistema de enfriamiento (Kittas et al., 2013).

Calefacción

Los sistemas de calefacción son esenciales con miras a proporcionar condiciones de temperatura y humedad adecuadas para el crecimiento y desarrollo de las plantas, o para maximizar la producción, tanto en calidad como en cantidad. El uso de un sistema de calefacción es necesario en países donde las condiciones climáticas invernales son severas (Bazgaou et al., 2021). Los sistemas de calefacción deben ser implementados incluso en países tropicales, como es el caso de Colombia, según el tipo de cultivos o para la temporada del año en que se presenta el fenómeno de heladas (Rocha et al., 2021).

Para ser eficiente, un sistema de calefacción debe tener la capacidad de proporcionar energía en forma de calor al ambiente interior del invernadero, a una tasa de aplicación mucho mayor que la tasa de pérdida energética que se presenta desde el interior del invernadero al ambiente exterior (Villarreal-Guerrero et al., 2020). Por lo tanto, se recomienda que para el diseño del sistema de calefacción se tengan presentes las características propias del invernadero, como área, volumen y tipo de cubierta, así como las condiciones del clima exterior. Esto permitirá establecer los flujos de pérdida energética y la cantidad de energía que se debe suministrar para mantener la temperatura en el rango deseado (Tantau & Lange, 2003).

Modelo simplificado para determinar las necesidades energéticas de calefacción

Una de las formas más sencillas para determinar la energía necesaria para actividades de calefacción en un invernadero es mediante el cálculo del coeficiente global de pérdida de calor y el diferencial térmico deseado entre los ambientes interior y exterior, lo cual puede realizarse mediante la ecuación 3.

$$E_r = UA(T_i - T_o)$$

Ecuación 3

donde,

E_r es la energía que debe ser suministrada al invernadero para alcanzar la temperatura deseada (W).

U es el coeficiente global de pérdida de calor ($\text{Wm}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$).

A es la superficie expuesta del invernadero (m^2), y que corresponde a la suma de la superficie total de la cubierta del invernadero, las paredes frontales y las laterales.

T_i es la temperatura del aire interior ($^\circ\text{C}$).

T_o es la temperatura del aire exterior ($^\circ\text{C}$).

Para el caso del coeficiente global de pérdida de calor ($\bar{U}$), existen valores determinados principalmente por el tipo del material de cubierta y cerramiento del invernadero (tabla 21).

Tabla 21. Coeficiente de pérdida de calor para los principales materiales de cubierta y cerramiento

Material de cubierta y cerramiento	Coeficiente de pérdida de calor (U) ($Wm^{-2} ^\circ C^{-1}$)
Vidrio de panel sencillo.	6,7
Vidrio de panel doble.	3,2
Polycarbonato.	3,6
Lámina de plástico sencilla.	9,4
Lámina de plástico doble.	6,8

Fuente: Elaboración propia con base en Valera et al. (2008)

De acuerdo con lo anterior, si se cuenta con un invernadero que tiene un área superficial total de la cubierta y paredes de $420 m^2$, el material de cubierta y cerramiento será una lámina plástica sencilla, la temperatura del ambiente exterior (T_o) será de $3 ^\circ C$ y la temperatura del interior (T_i) será de $12 ^\circ C$.

$$E_r = ((9,4 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C})(420m^2)((12 ^\circ C) - (3 ^\circ C))$$

Ecuación 4

$$E_r = 35.532 W$$

Para mantener las condiciones de temperatura deseadas, se necesitaría aportar un total de $35.532 W$, mediante cualquier sistema de calefacción disponible.

Sistemas de calefacción

Existen a nivel comercial diferentes tipos de sistemas de calefacción para invernaderos, sin embargo, los más populares son el calentamiento por piso radiante, con el que se usa el agua como fluido de calentamiento, y el sistema de calefacción por unidades de aire caliente (Kittas et al., 2013). Los dos tipos de sistemas pueden operar mediante el suministro de energía eléctrica o mediante la combustión de gas natural o biomasa, o de cualquier tipo de combustible.

Calentadores por aire caliente

Este tipo de sistema funciona mediante la inyección de aire forzado, el cual se calienta por medio de intercambiadores de calor. El aire puede salir a

temperaturas cercanas a los 60 °C y se redistribuye hacia el volumen de aire por acondicionar en el interior del invernadero (figura 37). Estos sistemas son recomendados para regiones de climas tropicales, donde las actividades de calefacción son temporales y las condiciones de temperatura mínima exterior no son tan extremas (Aguilar-Rodríguez et al., 2020).



Figura 37. Sistema de calefacción por aire caliente.

Fuente: Elaboración propia

Calentamiento por piso radiante

Este tipo de sistema es de los más eficientes en el uso de energía. La calefacción se realiza haciendo fluir agua a temperaturas de 70 °C, por tuberías ubicadas en forma de serpentín en el suelo del invernadero (Dhiman et al., 2019). El efecto del calentamiento de la tubería genera transferencia de calor por convección y radiación desde el piso radiante hacia la zona del cultivo, lo que permite aumentar la temperatura y reducir la humedad relativa en el aire circundante al dosel de la planta (Flores-Velázquez et al., 2019) (figura 38). Al diseñar este tipo de sistema, la recomendación general es analizar el costo económico de la instalación y, adicionalmente, el tipo de energía a utilizar, por medio de un balance económico, técnico y ambiental de las alternativas disponibles (Kittas et al., 2013).

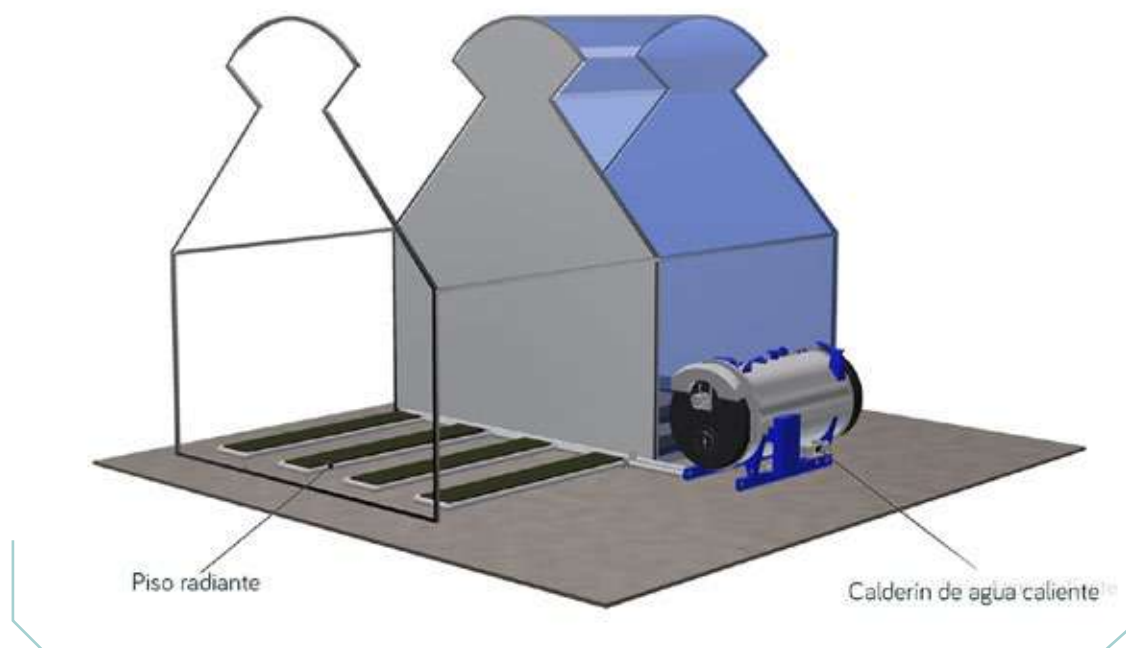


Figura 38. Sistema de calefacción por piso radiante.

Fuente: Elaboración propia

Sistemas de inyección de CO_2

Este tipo de sistema busca enriquecer la concentración de CO_2 en el ambiente interior, con lo cual se mejora la tasa fotosintética de las plantas y se pueden obtener aumentos superiores al 20 % en la producción total, respecto a invernaderos que no cuentan con sistemas de enriquecimiento carbónico (Sánchez-Guerrero et al., 2005). Estos sistemas también han cobrado interés para suplir las deficiencias de CO_2 que se pueden presentar en invernaderos de grandes superficies, debido a la escasa ventilación (Lorenzo et al., 1990).

La principal fuente de enriquecimiento carbónico usada en estas estructuras es la inyección localizada de CO_2 purificado, sin embargo, esta técnica tiene un costo elevado (figura 39). Por lo anterior, también existen otras estrategias de enriquecimiento carbónico que usan los gases de combustión generados en las labores de calefacción (Sánchez-Guerrero et al., 2005). Cuando se opte por esta alternativa, se deben controlar los niveles de SO_2 , SO_3 y NO_x , ya que estos gases pueden generar daño sobre los cultivos, incluso en concentraciones muy bajas (Kittas et al., 2013).

En general, el rango óptimo de concentración de CO_2 en el invernadero debe oscilar entre 700 y 900 $\mu\text{mol mol}^{-1}$, aunque se debe mencionar que, en la actualidad, aún se siguen desarrollando investigaciones con la finalidad de optimizar los sistemas de enriquecimiento carbónico, para maximizar los beneficios que ofrece esta técnica de gestión microclimática (Nurmalisa et al., 2022).



Figura 39. Sistema de inyección de CO_2 purificado.

Fuente: Elaboración propia

Tendencias en climatización de invernaderos

En la actualidad, existe una línea de investigación que se va desarrollando rápidamente y que busca dar respuesta a la preocupación constante que tienen tanto productores como investigadores en cuanto a la eficiencia energética de la climatización de invernaderos, ya que es un tema crucial que amenaza la sostenibilidad de la agricultura protegida de media y alta tecnología (Soussi et al., 2022). En términos generales, existen avances en la optimización de los procesos de transferencia de calor, almacenamiento térmico, control del flujo de energía, desalinización de agua y sistemas desecantes en invernaderos cerrados. Asimismo, la dependencia energética está migrando hacia los sistemas alimentados por energías renovables, como la solar o geotérmica. Estos tipos de energía ya muestran avances significativos en actividades de calefacción y enfriamiento, que son las de mayor consumo energético (Chen et al., 2020). Estas nuevas tendencias deben ser analizadas desde las dimensiones

técnicas y económicas, con el fin de determinar su adaptabilidad y funcionalidad bajo las condiciones climáticas y socioculturales de países tropicales, como Colombia.

Conclusiones

La gestión del microclima es un factor clave que garantizará el éxito de la producción hortícola, ornamental o de cualquier otra especie, en un modelo productivo bajo cubierta. La productividad de la planta y su desarrollo fisiológico dependerán, en gran medida, de las condiciones de temperatura, humedad, D_{pv}, luminosidad y concentración de CO₂ que se puedan gestionar durante el ciclo de cultivo.

Las labores de climatización deben ser analizadas con criterio técnico, económico y ambiental. Lo anterior permitirá definir el tipo de sistema de climatización que se debe instalar, el consumo energético y la fuente de energía con la cual se alimentarán los diferentes actuadores para la gestión microclimática. El análisis de estos factores permitirá determinar si los costos de las actividades de climatización, comparados con los beneficios de producción alcanzados, le dejarán al productor un margen de ganancia significativo.

A nivel local, es importante avanzar en estudios experimentales que permitan generar estrategias de climatización adaptadas a las condiciones climáticas, económicas y socioculturales del país. Estos estudios deben realizarse mediante la implementación de tecnologías emergentes basadas en energías renovables.

Referencias

- Aguilar-Rodríguez, C. E., Flores-Velázquez, J., Ojeda-Bustamante, W., Rojano, F., & Iñiguez-Covarrubias, M. (2020). Valuation of the energy performance of a greenhouse with an electric heater using numerical simulations. *Processes*, 8(5), 600. <https://doi.org/10.3390/PR8050600>
- Amani, M., Foroushani, S., Sultan, M., & Bahrani, M. (2020). Comprehensive review on dehumidification strategies for agricultural greenhouse applications. *Applied Thermal Engineering*, 181, 115979.
- Baeza, E. J., Pérez-Parra, J. J., Montero, J. I., Bailey, B. J., López, J. C., & Gázquez, J. C. (2009). Analysis of the role of sidewall vents on buoyancy-driven natural ventilation in parral-type greenhouses with and without insect screens using computational fluid dynamics. *Biosystems Engineering*, 104(1), 86-96. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.04.008>
- Bazgaou, A., Fatnassi, H., Bouharroud, R., Ezzaeri, K., Gourdo, L., Wifaya, A., Demrati, H., Elame, F., Carreño-Ortega, Bekkaoui, A., Aharoune, A., & Bouirden, L. (2021). Effect of active solar heating

system on microclimate, development, yield and fruit quality in greenhouse tomato production. *Renewable Energy*, 165, 237-250. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.11.007>

Benni, S., Tassinari, P., Bonora, F., Barbaresi, A., & Torreggiani, D. (2016). Efficacy of greenhouse natural ventilation: Environmental monitoring and CFD simulations of a study case. *Energy and Buildings*, 125, 276-286. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.05.014>

Bojacá, C. R., Monsalve, O., Casilimas, H., Villagrán, E. A., Gil, R., Arias, L. A., & Fuentes, L. S. (2012a). *Manual de producción de pimentón bajo invernadero*. Universidad Jorge Tadeo Lozano.

Bojacá, C., Casilimas, H., Monsalve, O., Gil, R., Villagrán, E., Arias, L. A., & Fuentes, L. S. (2012b). *Manual de producción de pepino bajo invernadero*. Universidad Jorge Tadeo Lozano.

Bouhoun Ali, H., Bournet, P. E., Danjou, V., Morille, B., & Migeon, C. (2014). CFD simulations of the night-time condensation inside a closed glasshouse: sensitivity analysis to outside external conditions, heating and glass properties. *Biosystems Engineering*, 127, 159-175. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.08.017>

Bournet, P. E., & Boulard, T. (2010). Effect of ventilator configuration on the distributed climate of greenhouses: a review of experimental and CFD studies. *Computers and Electronics in Agriculture*, 74(2), 195-217. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2010.08.007>

Chauhan, P. S., & Kumar, A. (2017). Heat transfer analysis of north wall insulated greenhouse dryer under natural convection mode. *Energy*, 118, 1264-1274.

Chen, J., Cai, Y., Xu, F., Hu, H., & Ai, Q. (2014). Analysis and optimization of the fan-pad evaporative cooling system for greenhouse based on CFD. *Advances in Mechanical Engineering*, 6. <https://doi.org/10.1155/2014/712740>

Chen, X., Riffat, S., Bai, H., Zheng, X., & Reay, D. (2020). Recent progress in liquid desiccant dehumidification and air-conditioning: a review. *Energy and Built Environment*, 1(1), 106-130.

Choab, N., Allouhi, A., El Maakoul, A., Kousksou, T., Saadeddine, S., & Jamil, A. (2019). Review on greenhouse microclimate and application: design parameters, thermal modeling and simulation, climate controlling technologies. *Solar Energy*, 191, 109-113. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.08.042>

De la Torre-Gea, G. (2013). *Modelación del flujo de aire mediante dinámica de fluidos computacionales en invernaderos con ventilación natural* [Tesis de doctorado, Universidad Autónoma de Querétaro]. <http://ri-ng.uaq.mx/bitstream/123456789/346/1/RI000467.pdf>

Dhiman, M., Sethi, V. P., Singh, B., & Sharma, A. (2019). CFD analysis of greenhouse heating using flue gas and hot water heat sink pipe networks. *Computers and Electronics in Agriculture*, 163, 104853. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104853>

Fleisher, H. D., Logendra, S. L., Moraru, C., Both, A.-J., Cavazzoni, J., Gianfagna, T., Lee, T.-C., & Janes, W. H. (2006). Effect of temperature perturbations on tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) quality and production scheduling. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 81(1), 125-131.

Flores-Velázquez, J., Mejía-Saenz, E., Montero, J. I., & Rojano, A. (2012). Numerical analysis of the inner climate in a mechanically-ventilated greenhouse with three spans. *Agrociencia*, 45(5), 545-560.

- Flores-Velázquez, J., Montero, J. I., Baeza, E. J., & López, J. C. (2014). Mechanical and natural ventilation systems in a greenhouse designed using computational fluid dynamics. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 7(1), 1-16.
- Flores-Velázquez, J., Villarreal-Guerrero, F., Rojano-Aguilar, A., & Schdmith, U. (2019). CFD to analyze energy exchange by convection in a closed greenhouse with a pipe heating system. *Acta Universitaria*, 29, 1-16. <https://doi.org/10.15174/au.2019.2112>
- Ghani, S., Bakochristou, F., ElBialy, E. M. A. A., Gamaledin, S. M. A., Rashwan, M. M., Abdelhalim, A. M., & Ismail, S. M. (2019). Design challenges of agricultural greenhouses in hot and arid environments: a review. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 12(1), 48-70.
- González-Piqueras, J., Villodre, J., Campos, I., Calera, A., & Balbotín, C. (2015). Seguimiento de los flujos de calor sensible y calor latente en vid mediante la aplicación del balance de energía métrica. *Revista de Teledetección*, 43, 43-54.
- He, F., Thiele, B., Kraska, T., Schurr, U., & Kuhn, A. J. (2022). Effects of Root Temperature and Cluster Position on Fruit Quality of Two Cocktail Tomato Cultivars. *Agronomy*, 12(6), 1275.
- Ishii, M., Okushima, L., Moriyama, H., Sase, S., Takakura, T., & Kacira, M. (2013). Effects of natural ventilation rate on temperature and relative humidity in a naturally ventilated greenhouse with high pressure fogging system. *Acta Horticulturae*, 1037, 1127-1132. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2014.1037.150>
- Kittas, C., Karamanis, M., & Katsoulas, N. (2005). Air temperature regime in a forced ventilated greenhouse with rose crop. *Energy and Buildings*, 37(8), 807-812. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.10.009>
- Kittas, C., Katsoulas, N., Bartzanas, T., & Bakker, J. C. (2013). Greenhouse climate control and energy use. En *Good agricultural practices for greenhouse vegetable crops: Principles for mediterranean climate areas* (pp. 63-95). FAO.
- Kubota, C., Sabeh, N. C., & Giacomelli, G. A. (2006). Water use for pad and fan evaporative cooling of a greenhouse in a semi-arid climate. *Acta Horticulturae*, 719, 409-416. https://www.actahort.org/books/719/719_46.htm
- López-Cruz, I. L., Ramírez-Arias, A., & Rojano-Aguilar, A. (2005). Modelos matemáticos de hortalizas en invernadero: trascendiendo la contemplación de la dinámica de cultivos. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 11(2), 257-267.
- Lorenzo, P., Maroto, C., & Castilla, N. (1990). CO₂ in plastic greenhouse in Almeria (Spain). *Acta Horticulturae*, 268, 165-169.
- Lorenzo, P. (2012). El cultivo en invernaderos y su relación con el clima. *Cuadernos de Estudios Agroalimentarios (CEA)*, 3, 23-44.
- Martínez, P. F., & Roca, D. (2011). *El control del clima de los invernaderos de plástico. Un enfoque actualizado*. Universidad Nacional de Colombia.
- Mesmoudi, K., Meguellati, K. H., & Bournet, P. E. (2017). Thermal analysis of greenhouses installed under semi arid climate. *International Journal of Heat and Technology*, 35(3), 474-486. <https://doi.org/10.18280/ijht.350304>

- Molina-Aiz, F. D., Valera, D. L., Peña, A. A., Gil, J. A., & López, A. (2009). A study of natural ventilation in an Almería-type greenhouse with insect screens by means of tri-sonic anemometry. *Biosystems Engineering*, 104(2), 224-242. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.06.013>
- Moot, D. J., Brown, H. E., Teixeira, E. I., & Pollock, K. M. (2003). Crop growth and development affect seasonal priorities for lucerne management. *NZGA: Research and Practice Series*, 11, 201-208.
- Mortensen, L. M. (1987). CO₂ enrichment in greenhouses: Crop responses. *Scientia Horticulturae*, 33(1-2), 1-25.
- Möttus, M., Sulev, M., Baret, F., López-Lozano, R., & Reinart, A. (2013). Photosynthetically active radiation: measurement and modeling. En C. Richter, D. Lincot, & C. A. Gueymard (Eds.), *Solar energy* (pp. 140-169). Springer.
- Nederhoff, E. M. (1994). *Effects of CO₂ concentration on photosynthesis, transpiration and production of greenhouse fruit vegetable crops*. Wageningen University and Research.
- Nurmalisa, M., Tokairin, T., Kumazaki, T., Takayama, K., & Inoue, T. (2022). CO₂ distribution under CO₂ enrichment using computational fluid dynamics considering photosynthesis in a tomato greenhouse. *Applied Sciences*, 12(15), 7756.
- Ohya, K., Kozai, T., & Toida, H. (2008). Greenhouse cooling with continuous generation of upward-moving fog for reducing wetting of plant foliage and air temperature fluctuations: a case study. *International Workshop on Greenhouse Environmental Control and Crop Production in Semi-Arid Regions*, 797, 321-326.
- Paraforos, D. S., & Griepentrog, H. W. (2013). Multivariable greenhouse climate control using dynamic decoupling controllers. *IFAC Proceedings Volumes*, 46(18), 305-310.
- Perdigones, A., García, J. L., Romero, A., Rodríguez, A., Luna, L., Raposo, C., & De la Plaza, S. (2008). Cooling strategies for greenhouses in summer: control of fogging by pulse width modulation. *Biosystems Engineering*, 99(4), 573-586.
- Rocha, G. A. O., Pichimata, M. A., & Villagrán, E. (2021). Research on the microclimate of protected agriculture structures using numerical simulation tools: a technical and bibliometric analysis as a contribution to the sustainability of under-cover cropping in tropical and subtropical countries. *Sustainability*, 13(18), 10433. <https://doi.org/10.3390/SU131810433>
- Sánchez-Guerrero, M. C., Lorenzo, P., Medrano, E., Baille, A., & Castilla, N. (2009). Effects of EC-based irrigation scheduling and CO₂ enrichment on water use efficiency of a greenhouse cucumber crop. *Agricultural Water Management*, 96(3), 429-436.
- Sánchez-Guerrero, M. C., Lorenzo, P., Medrano, E., Castilla, N., Soriano, T., & Baille, A. (2005). Effect of variable CO₂ enrichment on greenhouse production in mild winter climates. *Agricultural and Forest Meteorology*, 132(3-4), 244-252.
- Santosh, D. T., Tiwari, K. N., Singh, V. K., & Reddy, A. R. G. (2017). Micro climate control in greenhouse. *International Journal of Current Microbiological Applied Science*, 6, 1730-1742.
- Singh, M., Yousuf, A., & P Singh, J. (2017). Greenhouse microclimate modeling under cropped conditions. A review. *Research in Environment and Life Sciences*, 9(6), 1552-1557.

- Soussi, M., Chaibi, M. T., Buchholz, M., & Saghruni, Z. (2022). Comprehensive review on climate control and cooling systems in greenhouses under hot and arid conditions. *Agronomy*, 12(3), 626.
- Sultan, M., Miyazaki, T., Saha, B. B., & Koyama, S. (2016). Steady-state investigation of water vapor adsorption for thermally driven adsorption based greenhouse air-conditioning system. *Renewable Energy*, 86, 785-795.
- Tantau, H. J., & Lange, D. (2003). Greenhouse climate control: an approach for integrated pest management. *Computers and Electronics in Agriculture*, 40(1-3), 141-152.
- Tesi, R. (1983). *Moderne tecniche di protezione: in orticoltura, floricoltura e grutticoltura*. Edagricole.
- Vadiei, A., & Martin, V. (2012). Energy management in horticultural applications through the closed greenhouse concept, state of the art. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(7), 5087-5100.
- Valera, D. L., Molina, F. D., & Álvarez, A. J. (2008). *Ahorro y eficiencia energética en invernaderos*. IDAE.
- Vanthoor, B. H. E., Stanghellini, C., Van Henten, E. J., & de Visser, P. H. B. (2011). A methodology for model-based greenhouse design: part 1, a greenhouse climate model for a broad range of designs and climates. *Biosystems Engineering*, 110(4), 363-377. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.06.001>
- Villagrán, E. A., & Bojacá, C. R. (2019). Study of natural ventilation in a Gothic multi-tunnel greenhouse designed to produce rose (*Rosa* spp.) in the high-Andean tropic. *Ornamental Horticulture*, 25(2), 133-143. <https://doi.org/10.14295/oh.v25i2.2013>
- Villagrán, E. A., Flores, J., Akrami, M., & Bojacá, C. R. (2022). Microclimatic evaluation of five types of Colombian greenhouses using geostatistical techniques. *Sensors*, 22(10), 3925.
- Villagrán, E. A., León, R., Rodríguez, A., & Jaramillo, J. (2020). 3D numerical analysis of the natural ventilation behavior in a Colombian greenhouse established in warm climate conditions. *Sustainability*, 12(19), 8101. <https://doi.org/10.3390/su12198101>
- Villagrán, E. A., Baeza, E. J., & Bojacá, C. R. (2019). Transient CFD analysis of the natural ventilation of three types of greenhouses used for agricultural production in a tropical mountain climate. *Biosystems Engineering*, 188, 288-304. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.10.026>
- Villarreal-Guerrero, F., Pinedo-Álvarez, A., & Flores-Velázquez, J. (2020). Control of greenhouse-air energy and vapor pressure deficit with heating, variable fogging rates and variable vent configurations: simulated effectiveness under varied outside climates. *Computers and Electronics in Agriculture*, 174, 105515. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105515>
- Vox, G., Teitel, M., Pardossi, A., Minuto, A., Tinivella, F., & Schettini, E. (2010). Sustainable greenhouse systems. En A. Salazar, & I. Rios (Eds.), *Sustainable agriculture: technology, planning and management* (pp.1-79). Nova Science.
- Zhang, S., Guo, Y., Zhao, H., Wang, Y., Chow, D., & Fang, Y. (2020). Methodologies of control strategies for improving energy efficiency in agricultural greenhouses. *Journal of Cleaner Production*, 274, 122695.