

## Factores determinantes, dinámica interna y estrategias de control del microclima en invernaderos: una revisión integral

### Determining factors, internal dynamics and control strategies of microclimate in greenhouses: a comprehensive review

**Julio C. Sosa-Savedra<sup>1,2</sup>, Víctor M. Romero-Medina<sup>2</sup>, Estela Cerezo Acevedo<sup>2†</sup>, Roberto S. Velázquez-González<sup>3</sup> y Roberto Rodríguez Morales<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Instituto Politécnico Nacional, CICATA-Qro. Departamento de Investigación e Innovación Científica y Tecnológica. Cerro Blanco 141, Colinas del Cimatario, 76090 Santiago de Querétaro, Qro., México.

<sup>2</sup>Universidad del Caribe. Departamento de ciencias básicas e ingeniería. SM78, Mz 1. Lote 1. Fraccionamiento Tabachines, 77528. Cancún Quintana Roo, México.

<sup>3</sup>Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de ingeniería. Universidad 231, Cerro de las Campanas S/N, Las Campanas, 76010 Santiago de Querétaro, Qro.

<sup>4</sup>Instituto de Cibernética Matemática y Física (ICIMAF), Calle 15, No. 551, entre C y D, CP: 10 400, La Habana, Cuba.

\* **Roberto Rodríguez Morales:** Email: [rrm@icimaf.cu](mailto:rrm@icimaf.cu)

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-3022-1747>

#### Resumen

En este trabajo se lleva a cabo una revisión integral de los factores determinantes, de la dinámica interna y de las estrategias de control del microclima en los invernaderos. El objetivo del mismo es dar una visión panorámica actual de las limitaciones y dificultades reales que enfrenta esta temática, principalmente en los países en vía de desarrollo, unido al análisis de un hecho real: el cambio climático. En el trabajo se precisa de la necesidad del uso racional y sustentable de técnicas tan actuales como la Inteligencia Artificial (IA), el control automático, la digitalización, el internet de las cosas, y el manejo científico de grandes volúmenes de datos, entre otros. El material empleado lo constituyó la amplia revisión bibliográfica relacionada con esta temática unido al método científico de revisión sistemática, el cual sirvió de base para dar un enfoque estructurado y riguroso que identificó, evaluó y sintetizó toda la evidencia relevante sobre esta investigación. Al final del trabajo se muestran los resultados obtenidos de esta revisión y se constata la importancia del control del microclima en los invernaderos en el contexto del cambio climático. Se presenta una breve reflexión de los retos, desafíos y perspectivas futuras de esta temática en países en vía de desarrollo. El valor diferencial de esta revisión con respecto a otras relacionadas con esta temática es que en el presente trabajo se enfatiza la necesidad de la integración de varias disciplinas de gran actualidad, como son el procesamiento digital de imágenes y la IA en su espectro más amplio direccionado a los países en vía de desarrollo en un entorno de bajos recursos, lo cual le confiere un valor práctico en el contexto del cambio climático. Por último, se dan las conclusiones más importantes.

**Palabras clave:** Invernadero, microclima, control climático, inteligencia artificial, agricultura protegida.

## Abstract

A comprehensive review of the determining factors, internal dynamics, and control strategies of microclimate in greenhouses has been conducted in this study. The objective was established as providing a current panoramic view of the real limitations and challenges faced by this subject, particularly in developing countries, along with the analysis of an undeniable reality: climate change. The need for the rational and sustainable use of advanced technologies such as Artificial Intelligence (AI), automatic control, digitalization, the Internet of Things, and the scientific management of big data, among others, was emphasized. The material used was comprised of an extensive bibliographic review related to the subject, combined with the application of the systematic review method, which was employed to provide a structured and rigorous approach that identified, evaluated, and synthesized all relevant evidence concerning this research. At the end of the study, the obtained results from this review are presented, and the importance of microclimate control in greenhouses within the context of climate change is confirmed. A brief reflection on the current challenges and future perspectives of this topic in developing countries is offered. The differential value of this review with respect to others related to this topic is that the present work emphasizes the need for the integration of several highly topical disciplines, such as digital image processing and AI in its broadest spectrum, aimed at developing countries in a low-resource environment, which gives this article practical value in the context of climate change. Finally, the most significant conclusions are outlined.

**Keywords:** Greenhouse, microclimate, climate control, artificial intelligence, protected agriculture.

## 1. Introducción

Según la *Food and Agriculture Organization* (FAO), de Naciones Unidas, se prevé que en 2050 la población mundial superará los nueve mil millones de personas, obligando a producir un 70 % más de alimento y prácticamente duplicarse en los países en vía de desarrollo [1, 2, 3]. Bajo este contexto, la agricultura protegida ha adquirido un papel central en la producción de frutos y hortalizas, ofreciendo soluciones efectivas frente a los desafíos del cambio climático, la presión sobre los recursos naturales y la necesidad de una producción agrícola intensiva y sostenible [4].

La agricultura protegida es una técnica agrícola donde los cultivos se desarrollan bajo estructuras que permiten controlar o modificar factores ambientales como la temperatura, humedad y luz. De esta manera, permite extender los ciclos productivos, aumentar los rendimientos y mejorar la calidad de los cultivos, independientemente de las condiciones climáticas externas [5].

Existe distintos tipos de estructuras utilizadas en la agricultura protegida; pero, según sea el tipo de cultivo, clima y presupuesto, será la estructura elegida [5,6]. Estas estructuras se pueden clasificar en cuatro tipos: microtúnel, macrotúnel, malla (sombra o antiinsectos o antipájaros) e invernaderos. Dentro de cada uno de estos existen variantes, en función de los materiales utilizados.

El invernadero es una estructura hermética cerrada, pudiendo usar materiales transparentes como el cristal, policarbonato o plástico, y que genera un entorno artificialmente modificado. Dentro de este, las condiciones climáticas pueden ser gestionadas con mayor precisión. Este entorno controlado, denominado microclima, se puede definir como el conjunto de condiciones climáticas particulares dentro del volumen del invernadero, que difieren significativamente de las del clima exterior [7].

Las principales variables que componen el microclima incluyen la temperatura, la humedad relativa, la radiación solar, la concentración de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), la ventilación y la distribución de la luz [8, 9, 10]. Estas variables interactúan dinámicamente y tienen un efecto directo sobre los procesos fisiológicos de las plantas, tales como la fotosíntesis, la transpiración, el desarrollo floral y la maduración del fruto o crecimiento de la hortaliza [11].

La optimización del microclima es fundamental para maximizar la eficiencia del uso de recursos como el agua, los fertilizantes y la energía, al tiempo que permite mitigar la incidencia de plagas y enfermedades [12]. Un entorno desfavorable puede generar condiciones de estrés abiótico, afectando negativamente el rendimiento y la calidad del cultivo [11]. En este sentido, el microclima no es sólo un elemento por considerar en el diseño del invernadero, sino una variable estratégica que debe ser entendida, modelada y controlada con rigurosidad.

De esta manera, el interés científico en torno al microclima de invernaderos ha aumentado considerablemente en los últimos años, impulsado por la disponibilidad de nuevas herramientas de monitoreo, simulación y control automatizado. Sin embargo, a pesar de la abundante producción académica, el conocimiento permanece en muchos casos fragmentado y especializado, con escasa articulación entre disciplinas como la ingeniería agrícola, la agrometeorología, la fisiología vegetal y la inteligencia artificial [13]. Esta fragmentación dificulta el acceso a una visión integrada y actualizada del tema.

Por tanto, es necesaria una revisión científica exhaustiva que analice los principales factores físicos y biológicos que determinan el microclima en invernaderos, las dinámicas internas que lo caracterizan, y las estrategias actuales y emergentes para su monitoreo y control. Todo esto, con énfasis en la definición de microclimas, factores condicionantes, variabilidad espacial y temporal, y los avances tecnológicos aplicables a su gestión. Esta revisión no solo pretende consolidar el conocimiento disponible, sino también identificar vacíos en la investigación y proponer nuevas líneas de desarrollo científico y tecnológico. Además, proporciona una herramienta útil para investigadores, técnicos, diseñadores de sistemas de producción y productores agrícolas interesados en mejorar el manejo climático en ambientes protegidos.

El valor diferencial de esta revisión con respecto a otras relacionadas con esta temática es que en el presente trabajo se enfatiza la necesidad de la integración de varias disciplinas de gran actualidad, como son el procesamiento digital de imágenes y la IA en su espectro más amplio direccionado a los países en vía de desarrollo en un entorno de bajos recursos, lo cual le confiere (a este artículo) un valor práctico en el contexto del cambio climático.

El contenido del trabajo se divide en IX Secciones. La segunda sección se presentan los fundamentos del microclima en invernaderos, diferenciando sus componentes respecto al clima externo, describiendo sus variables físicas principales y la influencia del diseño estructural. En la Sección III se examinan los factores que afectan el microclima, incluyendo las condiciones climáticas exteriores, el diseño y materiales del invernadero, los sistemas de climatización y la actividad fisiológica de los cultivos. En la Sección IV se profundiza en las dinámicas internas del microclima, tales como los gradientes verticales y horizontales de temperatura y humedad, la distribución de la luz, y la modelación computacional del entorno climático. La Sección V se enfoca en el impacto del microclima sobre los cultivos, evaluando su efecto en los procesos fisiológicos, el desarrollo fenológico y la susceptibilidad a enfermedades, acompañado de estudios de caso. En la Sección VI se exploran las tecnologías emergentes para el monitoreo y control del microclima, abarcando sensores IoT, algoritmos de control automático e inteligencia artificial aplicada al manejo climático. En la Sección VII se aborda los retos y perspectivas futuras, incluyendo las limitaciones actuales en el diseño de estrategias de control climático, la necesidad de soluciones accesibles y resilientes, y la integración de nuevas tecnologías en el contexto de la agricultura de precisión. Este enfoque busca integrar la evidencia científica más reciente y proporcionar una base sólida para la toma de decisiones informadas en el diseño, operación y optimización de invernaderos adaptados a diversas condiciones agroecológicas.

Finalmente, en la Sección VIII se presenta un resumen de los principales hallazgos, la importancia del conocimiento del microclima para la eficiencia productiva y algunas recomendaciones para investigaciones futuras, y en la Sección IX se presentan las referencias del trabajo.

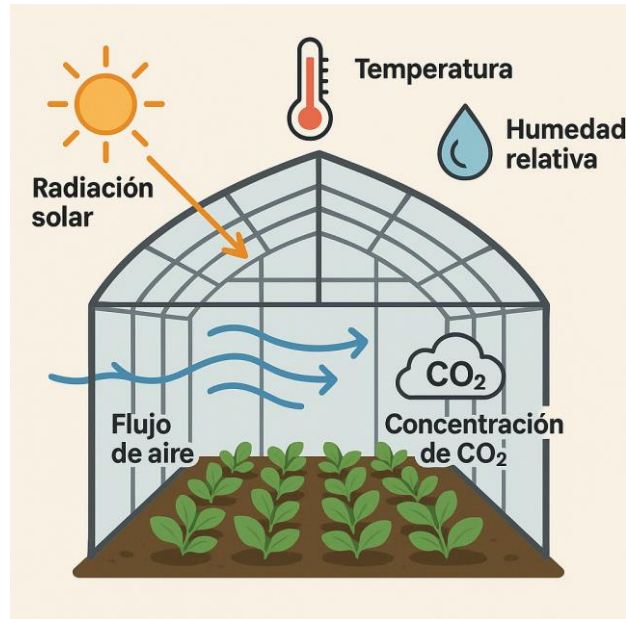
## 2. Fundamentos del Microclima en Invernaderos

El microclima en invernaderos se define como el conjunto de condiciones climáticas locales que se desarrollan dentro de una estructura cerrada o semicerrada del invernadero, diferenciándose del clima exterior circundante. Este microambiente se ve influido por una combinación de factores físicos, biológicos y estructurales que interactúan dinámicamente para afectar el desarrollo de los cultivos. Comprender los fundamentos del microclima es esencial para su modelado, monitoreo y control, con el objetivo de optimizar el crecimiento vegetal y el uso eficiente de recursos [1, 10, 12].

Por otro lado, el clima externo se refiere a las condiciones meteorológicas generales del entorno, influenciadas por fenómenos atmosféricos regionales y globales. Mientras que el microclima, en un invernadero, está condicionado por factores locales y artificiales, como los materiales de cubierta, el uso de mallas, la geometría estructural, la ventilación y la presencia de cultivos [14]. Estas diferencias implican una modificación de la radiación solar, del intercambio de calor y vapor de agua, y de la circulación del aire dentro del invernadero.

Las principales variables físicas del microclima, mostradas en la Figura 1, son [10, 12]:

- **Temperatura:** Es la medida de calor en el ambiente del invernadero. Influye directamente en la fotosíntesis, la respiración y transpiración de las plantas. Se ve afectada por la radiación solar, el intercambio de calor con el exterior y los sistemas de calefacción o refrigeración empleados.
- **Humedad relativa:** Es la cantidad de vapor de agua presente en el aire en relación con la cantidad máxima que el aire puede contener a una temperatura dada. Determina la transpiración de las plantas y el riesgo de enfermedades. Una humedad excesiva puede favorecer el desarrollo de patógenos fúngicos, mientras que niveles bajos pueden inducir estrés hídrico [12].
- **Radiación solar:** Es la cantidad de energía luminosa que llega a las plantas. Es esencial para la fotosíntesis y el desarrollo morfológico. Su transmisión hacia el interior depende del tipo de cubierta, la limpieza del material y de la orientación del invernadero [14].
- **Concentración de CO<sub>2</sub>:** Es la cantidad de contenido de CO<sub>2</sub> en el aire del invernadero. Al aumentar su concentración puede mejorar la fotosíntesis y el rendimiento de los cultivos. La concentración puede disminuir durante el día, si no se ventila adecuadamente o si no se suplementa.
- **Flujo de aire:** Es el movimiento del aire dentro del invernadero, que afecta la distribución de temperatura, humedad y concentración de CO<sub>2</sub>, así como la ventilación natural. Incide en la distribución térmica y en la renovación del aire. Una buena circulación interna evita la estratificación térmica y mejora el intercambio gaseoso [1].



**Fig.1** Variables físicas del microclima en un invernadero.

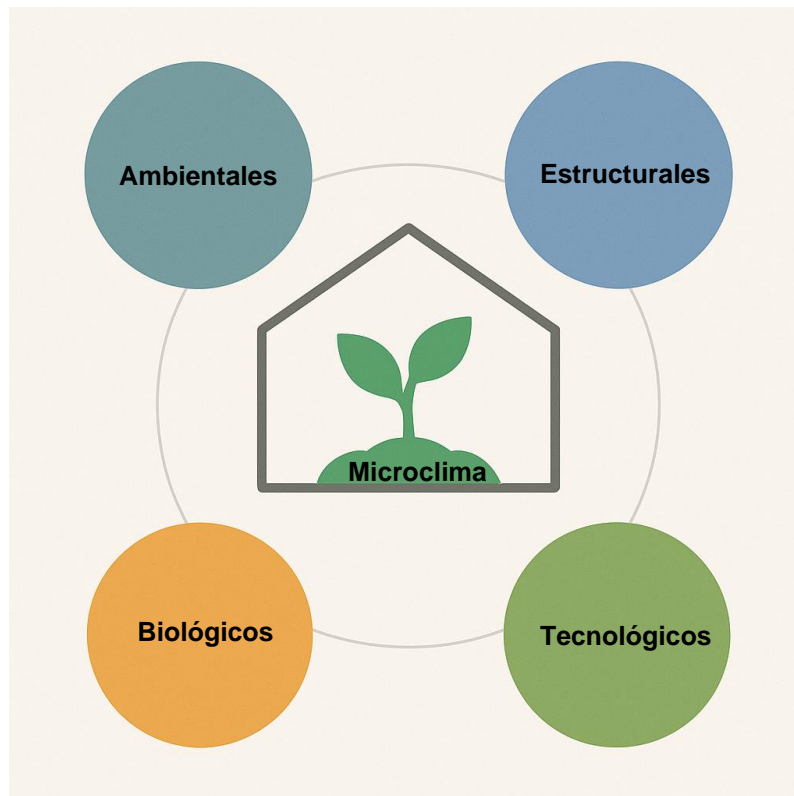
Sin embargo, el diseño estructural del invernadero influye decisivamente en la configuración del microclima. Elementos como la altura de la estructura, la pendiente del techo, el tipo de materiales de cubierta (vidrio, policarbonato, polietileno), y los sistemas de ventilación (natural o forzada) determinan la cantidad de energía térmica acumulada, la capacidad de enfriamiento y la distribución de la luz [1].

En Peña-Fernández et al. indican que los invernaderos con techos altos favorecen la estratificación térmica, permitiendo una zona más fresca a nivel del cultivo, mientras que estructuras con baja altura tienden a generar sobrecalentamiento [15]. De igual manera, el uso de pantallas térmicas y materiales difusores puede mejorar la uniformidad de la luz y reducir el estrés por radiación [16].

De esta manera, los fundamentos del microclima en invernaderos abarcan un conjunto complejo de variables interrelacionadas. Su comprensión es indispensable para el diseño de estrategias efectivas de manejo climático que permitan mejorar la eficiencia del uso de recursos, la calidad de los productos hortícolas y la sostenibilidad de los sistemas agrícolas protegidos.

### 3. Factores que Afectan el Microclima

El microclima, dentro de un invernadero, es el resultado de múltiples interacciones entre factores ambientales, estructurales, biológicos y tecnológicos (Figura 2). Estos factores determinan las condiciones climáticas internas que afectan directamente el desarrollo fisiológico y fenológico de los cultivos. Comprenderlos permite implementar estrategias de diseño y manejo más eficientes, adaptadas a contextos productivos específicos.



**Fig.2** Factores que intervienen en el microclima de un invernadero.

### 3.1. Factores ambientales

Las condiciones climáticas externas, al invernadero, como la radiación solar, la temperatura ambiente, la velocidad y dirección del viento, la humedad e incluso las precipitaciones influyen significativamente en el microclima de un invernadero. Estas variables externas interactúan con la estructura y los sistemas de control del invernadero, incidiendo directamente en las condiciones internas que afectan el crecimiento y desarrollo de los cultivos.

Se sabe que la temperatura externa suele ser menor que la interna, mientras que la radiación solar dentro del invernadero es menor debido a la absorción y reflexión por los materiales de cubierta [17, 18]. También, la radiación solar externa es el factor más determinante de la evapotranspiración dentro del invernadero.

Por otro lado, la velocidad y dirección del viento externo influyen en la eficacia de la ventilación forzada o natural, esta última directamente relacionada con la orientación del invernadero [14, 18]. De esta manera, en condiciones de baja velocidad de viento, la ventilación es menos eficiente, lo que puede llevar a un sobrecalentamiento. Configuraciones óptimas de ventilación, como la combinación de aberturas en el techo y laterales, mejoran el intercambio de aire y ayudan a mantener temperaturas internas más homogéneas y cercanas a las externas [9]. Además, la humedad interna fluctúa y puede diferir significativamente de la externa, dependiendo de la ventilación y la transpiración de las plantas.

Así, la radiación solar incidente determina la cantidad de energía que debe ser gestionada dentro del invernadero, mientras que la temperatura y la velocidad del viento influyen en los gradientes térmicos, el intercambio de aire y la humedad interna [18].

### 3.2. Factores estructurales

El diseño estructural del invernadero es un factor crucial en la modulación del microclima. Las características estructurales, como la altura, la forma de la cubierta, la orientación y el material de

construcción y de cobertura, determinan la capacidad de acumulación de calor, la distribución de la luz y la eficiencia de la ventilación [14, 17, 18].

Los invernaderos con techos altos o ventilación cenital presentan mejor renovación de aire y control de la temperatura en días cálidos [19, 20]. Los materiales de cubierta, como el vidrio, policarbonato y plásticos difusores, también afectan la transmisividad de la radiación solar, la retención de calor y la condensación de humedad [14]. Mientras que las cubiertas con propiedades difusoras mejoran la distribución uniforme de la luz, reduciendo zonas de sombra y mejorando la fotosíntesis [21].

### 3.3. Factores biológicos

Este tipo de factor está directamente relacionado con la actividad biológica del o los cultivos, en el invernadero, que también tienen un efecto en el microclima. Procesos fisiológicos como la transpiración, la fotosíntesis y la respiración afectan los niveles de humedad, la concentración de CO<sub>2</sub> y la temperatura interna [22].

De esta manera, el microclima en un invernadero se ve afectado por la densidad de siembra, el tipo de cultivo, su área foliar y el manejo del dosel vegetal, ya que inciden en la evapo-transpiración total, y por ende en la carga térmica y la humedad relativa del aire [23, 24]. Cultivos de crecimiento rápido o de alta biomasa pueden generar microclimas particulares dentro del mismo invernadero, con zonas más húmedas o sombreadas.

Entonces, el conjunto de estos factores determina la complejidad y variabilidad del microclima en invernaderos. Por lo que, la comprensión integrada de sus interacciones permite el diseño de estrategias de manejo más efectivas y sostenibles, ajustadas a las necesidades específicas de cada sistema de producción.

### 3.4. Factores tecnológicos

Los sistemas de cultivo en invernadero permiten un entorno controlado que mejora el rendimiento, la calidad y el uso eficiente del agua. Aunque la tecnificación o automatización, de los invernaderos, tienen un alto consumo energético, siguen siendo populares por su capacidad para optimizar recursos, producir cultivos todo el año y enfrentar condiciones ambientales adversas [25].

Los sistemas de control climático en invernaderos incluyen mecanismos activos y pasivos diseñados para mantener condiciones óptimas. Entre ellos se encuentran los sistemas de calefacción, ventilación natural o forzada, enfriamiento evaporativo, sombreado y nebulización [20, 26, 2]

La ventilación natural es un método eficiente y de bajo costo para controlar la temperatura y renovar el aire, aunque depende fuertemente de las condiciones externas. En climas cálidos y húmedos, el enfriamiento evaporativo mediante paneles húmedos o nebulizadores permite reducir la temperatura interna y aumentar la humedad relativa [14, 27].

La automatización de los invernaderos, mediante sensores y controladores, ha mejorado significativamente la estabilidad del microclima, mejorando la fotosíntesis y la tasa de crecimiento de las plantas. Estos sistemas pueden obtener datos en tiempo real, reducir el uso de recursos (agua, energía, pesticidas), maximizando así el rendimiento, la calidad de la producción y promoviendo una agricultura protegida más sustentable [28, 29, 30].

## 4. Dinámicas Internas del Microclima en Invernaderos

El microclima dentro de un invernadero es un sistema complejo y dinámico que influye directamente en el crecimiento y desarrollo de los cultivos. Comprender las variaciones espaciales y temporales de las distintas variables físicas y de algunos factores externos, que afectan el microclima, son esenciales para optimizar las condiciones de cultivo. Este capítulo aborda las principales dinámicas

internas del microclima en invernaderos, incluyendo gradientes térmicos y de humedad, distribución de la luz, zonas microclimáticas y herramientas de simulación y modelado.

#### 4.1 Gradientes Verticales y Horizontales de Temperatura y Humedad

En los invernaderos, las condiciones de temperatura y humedad no son uniformes; presentan variaciones tanto verticales como horizontales debido a factores como la radiación solar, la ventilación y la transpiración de las plantas [31].

**Gradientes Verticales:** La temperatura y la humedad pueden variar significativamente desde el nivel del suelo hasta el techo del invernadero. Estas diferencias afectan la distribución del calor y la condensación, influyendo en la salud de las plantas y la aparición de enfermedades. Estudios han demostrado que estas variaciones pueden ser de hasta 2-3 °C en temperatura y 5-10 % en humedad relativa.

**Gradientes Horizontales:** Las variaciones horizontales se deben a la orientación del invernadero, la disposición de las plantas y la ubicación de los sistemas de ventilación y calefacción. Estas diferencias pueden crear zonas con microclimas distintos dentro del mismo invernadero, afectando la uniformidad del cultivo.

Para monitorear estas variaciones, se recomienda el uso de redes de sensores distribuidos que permitan una evaluación precisa del microclima en diferentes puntos del invernadero. Estas redes pueden usar distintos protocolos, como *WiFi*, *Bluetooth*, *Zigbee*, etc. [32, 33].

#### 4.2 Distribución de la Luz

En los invernaderos, la distribución de la luz se ve afectada por la estructura del invernadero, los materiales de cobertura, la disposición de las plantas e incluso por la orientación y ubicación del invernadero (latitud).

Factores que afectan la distribución de la Luz:

- Tipo de invernadero: Las características estructurales del invernadero, como la altura o tipo de techo permiten una mayor o menor iluminación. Por ejemplo, existen invernaderos a dos aguas simétrico y otro a dos aguas asimétrico. El primero recibe una captación de luz solar uniforme, mientras que el asimétrico se maximiza la entrada de luz y calor solar, si se orienta la pendiente más larga al sur [25].
- Materiales de cobertura: La transmitancia de los materiales influye en la cantidad y calidad de luz que penetra en el invernadero. Existen materiales de cubierta como el cristal o acrílico (transparente/opaco); plástico lechoso del 15 al 30 % de sombra; malla sombra a 90-10, 70-30, 60-40 de sombra, provocando diferentes concentraciones de calor, humedad e iluminación. Algunos de estas cubiertas poseen propiedades difusoras mejoran la distribución uniforme de la luz [21].
- Sombra de las plantas: La disposición y densidad de las plantas pueden generar zonas de sombra en el interior del invernadero, reduciendo la disponibilidad de luz en ciertas áreas para otras plantas.
- Orientación del invernadero: La orientación respecto al sol afecta la intensidad y duración de la luz recibida durante el día [34].
- Ubicación del invernadero: La latitud afecta cómo inciden los rayos solares en su superficie. Cerca del ecuador, los rayos solares llegan casi perpendicularmente, lo que maximiza la radiación solar y la temperatura interior. En latitudes más altas, los rayos solares llegan en ángulo más oblicuo, reduciendo la energía solar que recibe el invernadero y, en consecuencia, su capacidad de calentar.

La implementación de sistemas de iluminación suplementaria y el uso de materiales de alta transmitancia pueden mejorar la distribución de la luz, promoviendo un crecimiento más uniforme de los cultivos.

#### 4.3 Zonas de microclima dentro del invernadero

Debido a las variaciones en temperatura, humedad y luz, se pueden formar zonas con microclimas distintos dentro de un mismo invernadero. Estas zonas pueden influir en el desarrollo desigual de las plantas y en la aparición de plagas y enfermedades.

- Identificación de zonas microclimáticas: El uso de sensores distribuidos y sistemas de monitoreo permite identificar áreas con condiciones ambientales diferentes [35].
- Impacto en el cultivo: Las zonas con condiciones subóptimas pueden presentar menor rendimiento, la aparición y propagación de enfermedades y plagas, lo que incrementa las pérdidas económicas [36].

La gestión adecuada de estas zonas, mediante ajustes en la ventilación, calefacción y riego, es esencial para mantener la uniformidad y salud del cultivo.

#### 4.4 Simulación y modelado del microclima

La aplicación de modelos matemáticos en el estudio del microclima en invernaderos comenzó a consolidarse a partir de las décadas de 1970-1980 con el uso de modelos de balance energético simplificados para estimar temperatura, humedad y radiación en el interior de los invernaderos [37]. En ese periodo, los investigadores comenzaron a emplear ecuaciones diferenciales ordinarias para simular el intercambio de calor y masa entre el invernadero y el ambiente exterior, con el fin de optimizar la ventilación natural y los sistemas de calefacción.

Con el avance de la computación en los años 90, se comenzaron a utilizar modelos de simulación dinámicos, integrando submodelos de radiación solar, balance de energía y transferencia de masa, permitiendo estudiar el efecto de parámetros de diseño como orientación, tipo de cubierta y estrategias de ventilación [38].

A partir de 2000, el uso de Dinámica de Fluidos Computacional (o CFD, por sus siglas en inglés, *Computational Fluid Dynamics*) se convirtió en una herramienta clave, permitiendo estudiar en detalle la distribución espacial de las diferentes propiedades del microclima en el interior de los invernaderos, tales como: la temperatura, la humedad y la velocidad del aire, así como los efectos de diferentes configuraciones de ventilación natural y forzada [39].

En la actualidad, la simulación del microclima de invernaderos ha evolucionado hacia la integración de modelos CFD acoplados con modelos de cultivos y algoritmos de optimización, permitiendo evaluar tanto el comportamiento térmico del invernadero como el crecimiento de las plantas, con el objetivo de maximizar la eficiencia energética, hídrica y productiva [40, 41].

##### 4.4.1 Descripción de los modelos computacionales actuales

Los modelos computacionales aplicados al diseño óptimo de invernaderos y a la simulación de su microclima permiten evaluar estrategias de control climático, ventilación, calefacción y eficiencia energética, reduciendo costos experimentales y optimizando el rendimiento de cultivos. A continuación, se describen los principales modelos utilizados actualmente:

##### Modelos de balance de energía

Estos modelos asumen condiciones uniformes de temperatura y humedad en el aire del invernadero, aplicando ecuaciones de balance de energía y masa para estimar:

- Radiación solar absorbida.
- Pérdidas por ventilación y convección.
- Ganancias térmicas internas y liberación de calor por transpiración.

Son herramientas de baja complejidad computacional, útiles para simulaciones de largo plazo, estudios preliminares de diseño, estrategias de calefacción y ventilación, y dimensionamiento de ventilaciones [75]. Se usan principalmente para el análisis de la influencia de cubiertas plásticas en la temperatura interna en invierno.

Los programas comúnmente usados para este tipo de análisis pueden ser: *TRNSYS* y *EnergyPlus* [76].

#### Modelos de dinámica de fluidos computacional (CFD)

Los modelos CFD resuelven las ecuaciones de Navier-Stokes para simular:

Flujos de aire tridimensionales dentro del invernadero.

- Distribución de temperatura, humedad relativa y concentración de CO<sub>2</sub>.
- Ventilación natural y forzada.
- Turbulencias y zonas de estancamiento térmico.

Permiten un análisis detallado del microclima a nivel del dosel de cultivo, evaluando la efectividad de sistemas de ventilación y estrategias de control climático. Se usan para la simulación del efecto de ventanas cenitales en la distribución de temperaturas en diferentes épocas del año [77].

Los programas comúnmente usados para este tipo de análisis pueden ser: *ANSYS Fluent*, *OpenFOAM* y *COMSOL Multiphysics*.

#### Modelos acoplados microclima-cultivo

Estos modelos integran el microclima con modelos de crecimiento de cultivos, considerando:

- Radiación fotosintéticamente activa.
- Transpiración y liberación de humedad.
- Balance de concentración de CO<sub>2</sub> con la fotosíntesis.
- Influencia del microclima en el desarrollo fenológico.

Permiten evaluar simultáneamente estrategias de control climático y el rendimiento del cultivo, optimizando la eficiencia productiva y energética. Se usan para la simulación del rendimiento del producto bajo diferentes tasas de ventilación y niveles de concentración de CO<sub>2</sub>. Estos modelos, incluyen algoritmos de aprendizaje automático y redes neuronales artificiales, utilizan datos históricos y en tiempo real para predecir las condiciones futuras del microclima [11, 42]. Son especialmente útiles para sistemas de control automático y toma de decisiones, ya que permiten anticipar cambios ambientales y ajustar de manera eficiente los sistemas de climatización, ventilación y riego para optimizar el uso de recursos y mantener condiciones óptimas para el desarrollo de cultivos o la conservación de espacios [11, 42]. La integración de estas herramientas permite una respuesta efectiva a las variaciones del microclima, mejorando la eficiencia y sostenibilidad de la producción en invernaderos.

Los programas comúnmente usados para este tipo de análisis pueden ser: *Virtual Grower (USDA)* y *Greenhouse Environment Model (GEM)*.

#### Modelos de optimización acoplados a simulaciones

Estos modelos combinan algoritmos de optimización (genéticos, enjambre de partículas, gradiente descendente) con simulaciones energéticas o CFD para:

- Optimizar la geometría del invernadero y ubicación de ventilaciones.
- Diseñar estrategias de control automático de ventilación, calefacción y sombreado.
- Minimizar consumo de energía mientras se maximizan condiciones óptimas de crecimiento.

Se usan para la determinación del área óptima de ventilación cenital y lateral para maximizar la renovación de aire en verano [78].

Los programas comúnmente usados para este tipo de análisis pueden ser: *MATLAB Optimization Toolbox* y *Python (SciPy, PyFoam)*, acoplados con CFD o *TRNSYS*.

En la Tabla 4.1, se presenta una comparación de los sistemas computacionales utilizados en el diseño óptimo de invernaderos y la simulación de su microclima.

**Tabla 1.** Sistemas computacionales utilizados en el diseño óptimo de invernaderos y la simulación de su microclima [75, 76, 77, 78].

Sistema Computacional	Tipo de Modelo	Aplicaciones en invernaderos	Ventajas	Limitaciones
ANSYS Fluent	CFD	Simulación detallada de flujo de aire, temperatura, concentración de CO <sub>2</sub> , ventilación	Alta precisión, interfaz gráfica intuitiva, análisis transitorio y estacionario	Licencia costosa, requiere equipo de cómputo robusto
OpenFOAM	CFD	Análisis de ventilación natural y forzada, distribución de temperatura y humedad	Código abierto, personalizable, flexible	Curva de aprendizaje alta, configuración compleja
COMSOL Multiphysics	CFD y multiphysics	Análisis de flujo de aire, transferencia de calor, radiación y acoplamiento con estructuras	Interfaces multipropósito, visualización avanzada	Costoso, demanda computacional alta
Virtual Grower (USDA)	Modelo de balance energético y productivo	Evaluación de microclima, costos y energéticos y simulación de crecimiento	Gratuito, fácil de usar, orientado a horticultura	Menor resolución espacial, no analiza flujo de aire detallado
GEM ( <i>Greenhouse Environment Model</i> )	Balace energético con simulación climática	Simulación de microclima acoplado con el crecimiento del cultivo	Evaluación de rendimiento productivo con microclima	Requiere ajuste de parámetros para precisión
TRNSYS	Simulación de sistemas dinámicos	Evaluación energética de estrategias de calefacción y ventilación	Modular, adaptable a escenarios de energía renovable	Configuración inicial compleja
MATLAB ( <i>Simulink Optimization Toolbox</i> )	+ Modelado dinámico y optimización	Simulación de microclima y control de ventilación y calefacción	Flexibilidad, integración con algoritmos de optimización	Requiere programación, licencia costosa
EnergyPlus (adaptado)	Simulación energética	Evaluación del consumo energético de invernaderos con ventilación y climatización	Detallado en energía, ampliamente documentado	Adaptación a invernaderos puede requerir scripts adicionales
Python ( <i>NumPy, SciPy, PyFoam</i> )	Modelado y CFD acoplado	Simulaciones personalizadas de microclima con algoritmos de optimización	Gratuito, altamente personalizable	Requiere habilidades de programación, configuración manual

## 5. Impacto del microclima en el desarrollo de los cultivos

El microclima en los invernaderos representa un componente crítico para el desarrollo fisiológico, fenológico y sanitario de los cultivos. Las condiciones ambientales controladas (temperatura, humedad relativa, radiación, concentración de CO<sub>2</sub> y ventilación) determinan no solo la tasa de

crecimiento vegetal, sino también la calidad y cantidad del producto final. Las variaciones en dichas variables pueden desencadenar respuestas fisiológicas que afecten el rendimiento, alteren el metabolismo y propicien enfermedades.

En este capítulo se analizan las principales formas en que el microclima influye en los cultivos bajo agricultura protegida. Se abordan los efectos sobre los procesos fisiológicos fundamentales, las etapas fenológicas, la incidencia de enfermedades y las respuestas adaptativas frente a condiciones subóptimas. Además, se incluyen evidencias generales de estudios recientes que permiten comprender la complejidad de estas interacciones y la necesidad de un manejo climático preciso y dinámico.

### 5.1. Influencia del Microclima en los Procesos Fisiológicos de las Plantas

El microclima en un invernadero actúa como regulador principal de los procesos fisiológicos que determinan el crecimiento, desarrollo y productividad de los cultivos. Entre los procesos más sensibles a las condiciones ambientales internas se encuentran la fotosíntesis, la transpiración, la respiración y la acumulación de biomasa. Estos procesos están fuertemente influenciados por las variables microclimáticas, principalmente la temperatura, la radiación solar, la humedad relativa, la concentración de CO<sub>2</sub> y el movimiento del aire [7, 12].

#### 5.1.1 Fotosíntesis y eficiencia en el uso de la luz

La fotosíntesis, como principal mecanismo de conversión de energía, depende críticamente de la intensidad y calidad de la radiación fotosintéticamente activa (PAR, por *Photosynthetically Active Radiation*), así como de la temperatura y la concentración de CO<sub>2</sub>. En condiciones de microclima óptimo, se incrementa la tasa fotosintética neta y la eficiencia en el uso de la luz, lo que contribuye directamente a una mayor productividad [22, 21].

Además, las coberturas difusoras en los invernaderos han demostrado mejorar la distribución de la luz, favoreciendo una fotosíntesis más homogénea en el dosel vegetal [21]. La suplementación con CO<sub>2</sub>, en niveles controlados, también permite incrementar el rendimiento fotosintético hasta un umbral fisiológico óptimo [10].

#### 5.1.2 Transpiración y regulación hídrica

La transpiración es el principal mecanismo de regulación térmica en las plantas y su tasa depende directamente de la humedad relativa y del déficit de presión de vapor (VPD por *Vapor Pressure Deficit*) del ambiente. Una humedad excesivamente baja incrementa el VPD, elevando la tasa de transpiración, lo que puede inducir estrés hídrico y cierre estomático, limitando la fotosíntesis [12, 24].

Por el contrario, una humedad muy alta puede reducir la transpiración y favorecer la condensación en el follaje, lo cual, además de afectar el balance hídrico, incrementa el riesgo de enfermedades fúngicas [20]. Por tanto, mantener un microclima con VPD controlado es esencial para la homeostasis hídrica.

#### 5.1.3 Respiración y metabolismo

El microclima también regula la tasa de respiración, un proceso fundamental para el mantenimiento energético de la planta. Las temperaturas elevadas, por encima del umbral óptimo, aumentan la tasa respiratoria y provocan un gasto energético elevado, reduciendo la eficiencia del crecimiento [14, 25].

En cambio, temperaturas por debajo del rango fisiológico óptimo pueden ralentizar la actividad enzimática, afectando la biosíntesis de compuestos estructurales y metabólicos. La modulación térmica, en este sentido, representa una de las estrategias más relevantes para el control metabólico de los cultivos bajo condiciones protegidas.

**Acumulación de biomasa y rendimiento**

La interacción entre los procesos mencionados se refleja en la acumulación de biomasa, tanto foliar como reproductiva, y en la calidad del producto final. Estudios recientes han demostrado que condiciones de microclima estables permiten optimizar la partición de asimilados hacia órganos cosechables, incrementando la eficiencia de conversión energética [31, 11].

Un control inadecuado del microclima, en cambio, puede ocasionar desequilibrios entre crecimiento vegetativo y reproductivo, afectando el rendimiento final. Por tanto, entender la fisiología vegetal en función del entorno microclimático es crucial para diseñar estrategias de manejo que maximicen la productividad y sostenibilidad de los cultivos en invernadero. La Tabla 2 muestra un resumen de las variables micro climáticas, los procesos en los que interviene y los efectos de un mal manejo.

**Tabla 2.** Efectos del microclima en procesos fisiológicos [7, 10, 11, 12, 14, 21, 22, 31].

Variable climática	Proceso fisiológico en el que interviene	Efectos de un mal manejo de la variable
Temperatura	Fotosíntesis, respiración, floración,	Estrés térmico, respiración elevada, bajo rendimiento
Humedad relativa	Transpiración, apertura estomática, desarrollo de enfermedades	Condensación, riesgo de hongos, estrés
Radiación solar	Fotosíntesis, morfogénesis, acumulación de biomasa	Sombra, baja fotosíntesis, crecimiento limitado
Concentración de CO <sub>2</sub>	Fotosíntesis, tasa de crecimiento, eficiencia metabólica	Fotosíntesis limitada, crecimiento subóptimo
Movimiento del aire / Ventilación	Distribución de temperatura y humedad, intercambio gaseoso	Estratificación térmica, concentración de patógenos

**5.2. Efecto del microclima sobre el desarrollo fenológico**

El desarrollo fenológico de las plantas (desde la germinación hasta la maduración) está estrechamente vinculado con las condiciones microclimáticas que prevalecen en el entorno de cultivo. Variables como la temperatura, la radiación solar, la humedad relativa y la concentración de CO<sub>2</sub> regulan tanto la duración de las fases de desarrollo como la expresión de caracteres reproductivos. Por ende, el microclima no sólo condiciona el crecimiento vegetativo, sino que modula la sincronía y la eficiencia de los procesos reproductivos, afectando directamente el rendimiento final.

**5.2.1 Temperatura y ritmo fenológico**

La temperatura es probablemente el factor más determinante del ritmo fenológico, dado que afecta directamente la actividad enzimática y la velocidad de los procesos fisiológicos. En ambientes protegidos, una temperatura óptima puede acelerar la floración y la maduración, mientras que temperaturas fuera del rango ideal pueden causar retrasos, aborto floral o desarrollo incompleto del fruto [14, 43]. Además, se ha documentado que variaciones térmicas entre el día y la noche (amplitud térmica) influyen en la acumulación de azúcares, pigmentos y compuestos secundarios, modificando así la calidad del producto final [31].

**5.2.2 Radiación solar y fotomorfogénesis**

La cantidad y calidad de luz que llega a las plantas regula procesos clave como la elongación del tallo, la expansión foliar y la iniciación floral. La radiación fotosintéticamente activa (PAR, por *Photosynthetically Active Radiation*) y el fotoperiodo influyen en la transición de fases vegetativas a reproductivas, y su distribución uniforme dentro del invernadero es crucial para evitar desbalances fenológicos entre plantas [21]. El uso de cubiertas difusoras y sistemas de sombreado controlado ha

demostrado mejorar la uniformidad lumínica y, con ello, la sincronización fenológica en cultivos hortícolas.

### 5.2.3 Humedad relativa y dinámica reproductiva

La humedad relativa puede impactar la polinización, el cuajado de frutos y la apertura estomática durante etapas críticas. Niveles de humedad excesivos favorecen la condensación en estructuras reproductivas, incrementando la incidencia de enfermedades como botritis, mientras que una humedad baja puede inducir estrés hídrico y reducir la viabilidad polínica [20]. En cultivos intensivos bajo invernadero, se recomienda mantener la humedad relativa en rangos óptimos para cada especie durante las etapas reproductivas, evitando fluctuaciones bruscas.

### 5.2.4 Concentración de CO<sub>2</sub> y acumulación reproductiva

El enriquecimiento con dióxido de carbono ha mostrado beneficios significativos sobre la tasa de fotosíntesis y, por ende, sobre el suministro de asimilados disponibles para órganos reproductivos. Una mayor disponibilidad de carbohidratos durante la floración y el cuajado permite una mayor tasa de retención de frutos y una maduración más uniforme, especialmente en solanáceas y cucurbitáceas cultivadas bajo condiciones controladas [10].

## 5.3. Microclima y sanidad vegetal

El microclima en los invernaderos no solo determina el crecimiento y desarrollo de los cultivos, sino que también desempeña un papel fundamental en la aparición y propagación de enfermedades fúngicas, bacterianas y virales. Las condiciones ambientales internas, particularmente la humedad relativa, la temperatura y la ventilación, pueden crear un entorno favorable para la proliferación de patógenos, alterando la salud vegetal y reduciendo la productividad.

### 5.3.1 Humedad relativa y patógenos fúngicos

La humedad relativa elevada es uno de los factores más críticos para el desarrollo de enfermedades como el botritis (*Botrytis cinerea*), el oídio (*Erysiphe spp.*) y la alternariosis (*Alternaria spp.*). Estas enfermedades se ven favorecidas cuando la humedad supera el 85 %, especialmente si se presenta condensación sobre las hojas o estructuras florales durante la noche o en horas de baja ventilación [11, 44]. La condensación actúa como vía directa para la germinación de esporas y el establecimiento del hongo en el tejido vegetal.

### 5.3.2 Temperatura y dinámica patogénica

Las temperaturas cálidas pueden acelerar el ciclo de vida de muchos patógenos, reduciendo el periodo latente entre infección y manifestación de síntomas. En algunos casos, el aumento de temperatura asociado a microclimas mal gestionados puede inducir una mayor presión biótica al reducir la resistencia basal de las plantas hospedantes [45]. No obstante, también existen patógenos que requieren temperaturas moderadas combinadas con alta humedad para su establecimiento, lo que obliga a un monitoreo conjunto de ambas variables.

### 5.3.3 Ventilación e inoculación cruzada

Una ventilación inadecuada favorece la estratificación térmica y la acumulación de vapor de agua, promoviendo microzonas donde se desarrollan focos de infección. Además, en sistemas con ventilación forzada mal calibrada, puede ocurrir dispersión mecánica de esporas y gotículas contaminadas, generando inoculación cruzada entre sectores del invernadero [33]. Esto es especialmente relevante en cultivos con alta densidad de siembra y baja renovación de aire.

#### 5.3.4 Estrategias de mitigación microclimática

Para reducir el riesgo sanitario, se recomienda mantener la humedad relativa entre 60-80 % y establecer ciclos de ventilación controlada que eviten el estancamiento del aire. El uso de sensores distribuidos permite identificar zonas de riesgo y tomar decisiones en tiempo real. Además, la integración de modelos predictivos de enfermedades, basados en parámetros microclimáticos, constituye una herramienta prometedora para el manejo sanitario preventivo [42].

### 5.4. Respuestas del Cultivo a Microclimas Subóptimos

Las condiciones microclimáticas subóptimas dentro del invernadero pueden inducir diversas respuestas fisiológicas, morfológicas y bioquímicas en los cultivos. Estas respuestas dependen de la intensidad, duración y tipo de estrés ambiental (térmico, hídrico, lumínico o gaseoso), así como del estado fenológico de la planta y su capacidad adaptativa. En contextos de agricultura protegida, el manejo eficiente de estas respuestas permite reducir pérdidas de rendimiento y mantener la calidad del producto cosechado.

#### 5.4.1 Tolerancia al estrés térmico

Cuando la temperatura interna excede el rango óptimo, las plantas activan mecanismos de termotolerancia que incluyen la síntesis de proteínas de choque térmico (HSP), la acumulación de compuestos osmoprotectores y la modificación de la arquitectura foliar para reducir la exposición solar [46]. Sin embargo, una exposición prolongada puede llevar a la inhibición de la fotosíntesis, el aborto floral y la desnaturalización de enzimas clave, afectando el crecimiento reproductivo y vegetativo.

#### 5.4.2 Respuestas al estrés hídrico y a la humedad

El déficit hídrico, común en ambientes con alta radiación y ventilación deficiente, reduce la apertura estomática y la tasa de transpiración, afectando negativamente la asimilación del dióxido de carbono. En cambio, una humedad excesiva en el sustrato o en el ambiente promueve condiciones hipóxicas en las raíces, pudrición radicular y desbalance nutricional [24]. Las plantas pueden responder ajustando su densidad estomática o alterando la proporción raíz/parte aérea como mecanismos de adaptación.

#### 5.4.3 Adaptaciones a condiciones lumínicas no óptimas

En presencia de baja radiación o sombra excesiva, los cultivos suelen alargar sus entrenudos, reducir el grosor foliar y aumentar el contenido de clorofila para maximizar la captación de luz [15]. Sin embargo, estas adaptaciones pueden generar tejidos más frágiles, susceptibles al vuelco o a enfermedades. Por otro lado, una exposición prolongada a radiación intensa puede causar fotooxidación, pérdida de turgencia y necrosis en tejidos jóvenes.

#### 5.4.4 Impacto en la calidad del producto final

Las condiciones subóptimas del microclima no solo afectan la cantidad, sino también la calidad comercial del producto, incluyendo parámetros como tamaño, firmeza, contenido de azúcares, acidez y vida postcosecha. Por ejemplo, en cultivos frutales, un microclima mal regulado puede reducir la acumulación de compuestos fenólicos y antioxidantes, lo que impacta tanto en su valor nutricional como en su resistencia al deterioro [47].

#### 5.4.5 Mecanismos de aclimatación inducida

Los cultivos bajo condiciones subóptimas pueden desarrollar respuestas de aclimatación si el estrés es moderado y progresivo. Esto incluye la activación de genes de defensa, el reforzamiento de paredes celulares, y la reorganización del metabolismo primario y secundario [48]. Estas respuestas

deben considerarse al diseñar estrategias de manejo climático, ya que el exceso de corrección puede limitar la expresión de mecanismos naturales de resiliencia.

## 5.5. Casos de Estudio

La comprensión del microclima en invernaderos no solo se sustenta en modelos teóricos y simulaciones, sino también en estudios empíricos y experimentales que han documentado cómo las variaciones ambientales internas afectan directamente la fisiología, fenología, sanidad y rendimiento de los cultivos. Esta sección presenta una selección de casos de estudio que ejemplifican los hallazgos más relevantes relacionados con los procesos descritos en los apartados anteriores.

### 5.5.1 Microclima y fisiología vegetal

En un estudio realizado por Cho, A. et al. evaluaron el efecto de diferentes niveles de concentración de CO<sub>2</sub> y ventilación sobre el rendimiento fotosintético de lechuga cultivada en condiciones controladas [49]. Se observó que, bajo una concentración elevada de CO<sub>2</sub> (800 ppm) y ventilación moderada, la tasa de fotosíntesis neta se incrementó en un 35 %, acompañada de una mejora en la eficiencia en el uso del agua. Este caso destaca cómo la interacción entre concentración de gases y ventilación influye en múltiples procesos fisiológicos.

### 5.5.2 Condiciones microclimáticas y desarrollo fenológico

Un estudio reciente realizado por Song, J. et al. demostraron que una regulación adecuada de la temperatura nocturna, combinada con un incremento de la intensidad lumínica, mejora significativamente el crecimiento y la fotosíntesis en plántulas de tomate cultivadas en invernadero y favorece una floración más temprana y un desarrollo más uniforme del cultivo [50]. Las condiciones nocturnas térmicas más estables permiten una mejor sincronización fenológica sin afectar la calidad del fruto. Estos hallazgos destacan el papel esencial de la temperatura nocturna en la regulación de los procesos fisiológicos y biológicos de la planta.

### 5.5.3 Microclima y enfermedades en ambientes húmedos

En condiciones de clima tropical húmedo, Kruidhof, H. y Elmer, W., evaluaron la incidencia de *botritis* en cultivos de fresa bajo distintos regímenes de ventilación forzada [51]. Se encontró que los tratamientos con ciclos intermitentes de extracción de aire lograban reducir en un 45 % la humedad relativa acumulada durante la noche, disminuyendo significativamente la presencia de esporas y el avance del hongo. Este caso ilustra el valor del control dinámico del microclima en la sanidad vegetal.

### 5.5.4 Respuestas adaptativas a estrés térmico

Un estudio reciente llevado a cabo por Li, L. et al. en plántulas de pepino demostró que el estrés térmico diurno induce un incremento en los índices de daño celular como la peroxidación lipídica generando *malondialdehído* (MDA) y la conductividad eléctrica, mientras que las variedades tolerantes mostraron mayor actividad antioxidante de *Superóxido Dismutasa* (SOD), *Catalasa* (CAT) y *Peroxidasas* (POD), adaptación fisiológica que permitió amortiguar parcialmente el estrés térmico manteniendo niveles aceptables de crecimiento [52]. Aunque no se evaluó densidad de tricomas o área foliar de manera directa, el estudio resalta cómo las plantas capaces de modular sus respuestas antioxidantes y fisiológicas pueden mantener mejor la productividad bajo altas temperaturas.

## 6. Tecnologías emergentes para el monitoreo y control del Microclima

El manejo eficiente del microclima en invernaderos ha dejado de ser una tarea exclusivamente empírica para convertirse en un proceso altamente tecnificado, sustentado en datos en tiempo real y sistemas de control automatizados. En la actualidad, el avance de tecnologías emergentes como el Internet de las Cosas (IoT, por *Internet of Things*), la inteligencia artificial (IA), los algoritmos de

predicción climática y los enfoques de agricultura de precisión, ha transformado radicalmente la forma en que se monitorean, modelan y regulan las condiciones ambientales internas.

Estas tecnologías no solo permiten mantener los parámetros climáticos dentro de rangos óptimos, sino que también posibilitan una gestión proactiva basada en predicciones, adaptaciones al entorno externo y optimización de recursos. En este contexto, la innovación tecnológica ha dejado de ser un complemento para convertirse en un pilar fundamental de la agricultura protegida sostenible y resiliente. Este capítulo analiza las herramientas más recientes aplicadas al monitoreo y control del microclima, con énfasis en sus principios, ventajas, limitaciones y perspectivas de adopción.

## 6.1. Sensores y redes IoT

El uso de sensores distribuidos y redes IoT ha revolucionado la forma en que se recopila información microclimática en tiempo real. Los sensores ambientales modernos son capaces de medir variables como temperatura, humedad relativa, concentración de CO<sub>2</sub>, radiación solar, velocidad del viento y humedad del sustrato con alta precisión y frecuencia. Estos sensores se integran en nodos de comunicación que conforman redes inalámbricas (WSN de *Wireless Sensor Networks*), posibilitando la transmisión continua de datos a plataformas de análisis y gestión remota [32, 35].

Las redes IoT aplicadas en invernaderos utilizan tecnologías como Zigbee, LoRa, WiFi o NB-IoT para establecer comunicación entre sensores, actuadores y sistemas de control. Estas redes permiten no solo monitorear el estado ambiental del invernadero, sino también detectar anomalías, generar alertas, y ejecutar acciones correctivas automáticas o semi-autónomas. Además, la disponibilidad de plataformas en la nube facilita el almacenamiento y análisis histórico de datos, así como la visualización en tiempo real desde dispositivos móviles o interfaces web.

El diseño eficiente de estas redes requiere considerar aspectos como el consumo energético de los nodos, la redundancia de datos, la cobertura espacial, la robustez frente a interferencias y la calibración periódica de sensores [33]. Algunos desarrollos recientes incluyen sensores autoalimentados mediante energía solar, nodos móviles para mapeo dinámico y sistemas de autocalibración basados en algoritmos de aprendizaje.

El despliegue de sensores IoT no solo permite un control más preciso del entorno, sino que también sienta las bases para la implementación de sistemas inteligentes de agricultura, capaces de aprender de los patrones microclimáticos y ajustar dinámicamente las condiciones de cultivo en función del estado fisiológico de las plantas y del entorno externo.

## 6.2. Controladores automáticos y algoritmos de gestión climática

El desarrollo de algoritmos avanzados para la gestión del microclima en invernaderos ha permitido una regulación más precisa y eficiente de variables como la temperatura, la humedad relativa, la concentración de CO<sub>2</sub> y la radiación solar. Los enfoques contemporáneos se centran en estrategias multivariadas que integran modelos dinámicos, técnicas de aprendizaje automático y optimización basada en datos. Entre estos, destacan el Control Predictivo Basado en Modelos (MPC por *Model Predictive Control*), los algoritmos de aprendizaje por refuerzo (RL por *Reinforcement Learning*) y las arquitecturas híbridas, que combinan lo mejor de ambas estrategias.

### 6.2.1 Control Predictivo Basado en Modelos

El MPC (del inglés *Model Predictive Control*) ha sido ampliamente utilizado en el contexto de agricultura protegida debido a su capacidad para anticipar la evolución del microclima y aplicar acciones correctivas de forma proactiva. Utiliza un modelo dinámico del sistema junto con restricciones físicas y operativas para minimizar un costo objetivo. Wang, L. et al. implementaron un controlador no lineal basado en MPC utilizando una *wavelet neural network* como modelo predictivo, logrando una reducción del 21 % en el consumo energético respecto a estrategias convencionales, sin comprometer la regulación climática del invernadero [53]. Mahmood, F. et al. implementaron un

controlador predictivo basado en MPC y redes neuronales (DMPC), logrando reducciones de hasta 23,6 % en verano y 9,7 % en invierno al comparar con estrategias convencionales, manteniendo la estabilidad ambiental del invernadero y optimizando el uso energético sin pérdida de control [54].

### 6.2.2 Aprendizaje por refuerzo

El aprendizaje por refuerzo ha cobrado relevancia como alternativa a los métodos tradicionales, especialmente en escenarios donde los modelos físicos del invernadero son difíciles de calibrar o no están disponibles. Morcego, B. et al. compararon el desempeño de un controlador basado en RL con el de un MPC clásico, demostrando que RL ofrecía una mayor adaptabilidad y capacidad de respuesta ante incertidumbres climáticas, aunque a costa de requerir mayores volúmenes de datos para entrenamiento [55]. En una propuesta más reciente, Msaad, S. et al. desarrollaron un enfoque híbrido RL-Guided MPC, donde la política de RL define el costo terminal del MPC, logrando una mejor eficiencia energética y reducción del horizonte predictivo sin perder estabilidad [56].

### 6.2.3 Control jerárquico con redes neuronales

Otra línea emergente combina controladores predictivos con redes neuronales profundas (DNN, por *Deep Neural Networks*). En este esquema, una DNN se entrena para replicar las decisiones de un Control Predictivo Basado en Modelo No Lineal (NMPC, por *Nonlinear Model Predictive Control*), permitiendo ejecutar la regulación climática en tiempo real con menor carga computacional. Sathyanarayanan, K. et al. validaron este enfoque en simulaciones con cultivos de tomate, evidenciando que el sistema mantenía la precisión de control del NMPC original mientras reducía significativamente los tiempos de cómputo [57].

### 6.2.4 Optimización bioinspirada y lógica difusa

También han surgido enfoques bioinspirados que integran algoritmos evolutivos con lógica difusa. Por ejemplo, Jawad, M. et al. aplicaron la Colonia de Abejas Artificiales (ABC) junto con un sistema difuso para controlar humedad, temperatura, concentración de CO<sub>2</sub> y luz, en invernaderos inteligentes, logrando una mejora sustancial en eficiencia energética respecto a métodos convencionales, y demostrando capacidad de adaptación a múltiples objetivos y condiciones ambientales [58].

## 6.3. Inteligencia artificial y sistemas expertos

La integración de inteligencia artificial (IA) en invernaderos ha revolucionado el monitoreo y control del microclima, promoviendo sistemas capaces de aprender, adaptarse y tomar decisiones autónomas basadas en el análisis de datos. Estas soluciones van desde redes neuronales hasta métodos de clasificación, pasando por arquitecturas generativas y sistemas expertos híbridos.

### 6.3.1 Redes neuronales para modelado y predicción microclimática

Las redes neuronales artificiales (ANN, sus siglas en inglés, *Artificial Neural Network*) se utilizan extensamente para modelar relaciones no lineales entre variables ambientales. Ećim-Đurić, O. et al. desarrollaron una ANN multicapa que alcanzó un R<sup>2</sup> superior a 0,94 en la predicción de temperatura y humedad, mejorando la precisión respecto a métodos lineales tradicionales [11]. Ahn, J. et al. comparan modelos LSTM (en inglés, *Long Short-Term Memory*), un tipo especializado de RNN (en inglés, *Recurrent Neural Network*) con modelos lineales y de tipo transformer, encontrando que las RNN alcanza R<sup>2</sup> de hasta 0,938–0,935 en predicción de temperatura interna con errores de RMSE (en inglés, *Root Mean Square Error*) entre 0,293–0,597 °C según el horizonte (1 h) [59].

### 6.3.2 Sistemas expertos híbridos basados en lógica difusa y aprendizaje automático

También se han desarrollado sistemas expertos híbridos basados en lógica difusa y aprendizaje automático. Por ejemplo, Lachouri, C. et al. implementaron un sistema ANFIS (*Adaptive*

*Neuro-Fuzzy Inference System*) para modelar y controlar el clima interno de invernaderos, utilizando variables como temperatura, humedad, radiación y concentración de CO<sub>2</sub>; el modelo demostró eficiencia y estabilidad frente a controladores PID tradicionales [60]. Asimismo, Khafajeh, H. et al. diseñaron un sistema experto que combina lógica difusa optimizada mediante algoritmo genético (GA de *Genetic Algorithm*) para ajustar temperatura, humedad y concentración de CO<sub>2</sub> en un invernadero hidropónico, logrando mejoras significativas en las condiciones ambientales [61].

### 6.3.3 Clasificación de estados microclimáticos con Machine Learning

La clasificación de modos microclimáticos permite activar automáticamente estrategias como enfriamiento o ventilación según las condiciones. Cletus, F. y John, A. emplearon *Random Forest* y *Gradient Boosting Machine* (GBM) para categorizar microclimas en invernaderos, alcanzando precisiones de clasificación superiores al 99,98 % ( $R^2 \approx 0,9998$ ) con errores mínimos (MAE  $\sim 0,0001$ ), destacando la eficacia de los métodos ensemble en estas tareas [62]. Paralelamente, Esparza Gómez, J. et al. compararon XGBoost y una Red Neuronal Recurrente del tipo LSTM para predecir la temperatura interna de un invernadero con resolución horaria; aunque no es clasificación directa, el uso de XGBoost logró una predicción extremadamente precisa ( $R^2 \approx 0,9994$ , RMSE  $\approx 0,27$  °C), lo que evidencia su potencial como clasificador multiestado en el contexto microclimático [63].

### 6.3.4 Modelos generativos para simulación de escenarios climáticos

Los modelos generativos adversarios (en inglés, GAN, *Generative Adversarial Networks*) y los transformadores están abriendo nuevas vías para la síntesis de secuencias microclimáticas sintéticas realistas. Por ejemplo, Ahn, J. et al. entrenaron modelos basados en transformadores (como Autoformer y SegRNN) con datos de temperatura, humedad y concentración de CO<sub>2</sub> del invernadero, logrando predicciones tan precisas que pueden usarse para generar escenarios sintéticos para entrenar sistemas de control climático automatizado [59]. Además, Wei, X. et al. aplicaron técnicas de aprendizaje automático como *Least Squares Support Vector Machines* (LSSVM), *Radial Basis Function* (RBF) y optimización por enjambre de partículas, generando predicciones microclimáticas con  $R^2$  de hasta 0,952 en humedad y 0,923 en temperatura, lo cual sugiere que la red puede interpretar condiciones futuras del invernadero con error medio inferior al 5 % [64].

### 6.3.5 Aprendizaje profundo para detección de anomalías

Los enfoques de aprendizaje profundo han demostrado gran eficacia en la detección de anomalías microclimáticas en entornos agrícolas. Adkisson, M. et al. desarrollaron un autocodificador (en inglés, *autoencoder*) profundo no supervisado para identificar patrones atípicos en series temporales de sensores ambientales, logrando una precisión superior al 98 % en la detección de fallas o desviaciones en variables como temperatura, humedad y concentración de CO<sub>2</sub> [65]. Mientras que Islam, M. et al. implementaron una red convolucional profunda (TheLNet270v1) para segmentar imágenes térmicas del *dosel* (área de hojas y ramas que crean sombra) vegetal en invernaderos, detectando zonas con posible estrés térmico o hídrico con una precisión superior al 95 % [66].

### 6.3.6 Optimización basada en algoritmos de refuerzo y evolutivos

Aunque el aprendizaje por refuerzo (RL) se debate como controlador por sí mismo, también se integra dentro de sistemas expertos para ajustar reglas o políticas de control. Mallick, S. et al. implementaron un marco de *Reinforcement Learning-Guided Model Predictive Control* (MPC-RL) que ajusta parámetros del MPC en línea según datos operativos, logrando mejorar la eficiencia energética en control climático de invernaderos mediante simulaciones que superan tanto al MPC clásico como al RL puro [67]. En otro enfoque, Adesanya, M. et al. utilizaron *Deep Reinforcement Learning* (DRL) para ajustar parámetros de un controlador PID en un sistema HVAC de invernadero, obteniendo reducciones en el consumo energético entre 8.8 % y 13 %, con mejoras significativas en adherencia al punto de referencia climático o *set point* [68].

## 6.4 Enfoques basados en agricultura de precisión

En el contexto de la agricultura protegida, la agricultura de precisión ha emergido como una estrategia integral que permite gestionar el microclima del invernadero con un alto grado de especificidad espacial y temporal. Esta aproximación se basa en la recopilación, análisis e interpretación de datos geo-referenciados y en tiempo real, lo que posibilita una toma de decisiones localizada y optimizada. Mediante la integración de sensores avanzados, análisis geoespacial, imágenes multiespectrales y modelos predictivos, los productores pueden identificar zonas heterogéneas dentro del invernadero y aplicar estrategias diferenciadas de manejo climático. Así, los enfoques basados en agricultura de precisión no solo mejoran la eficiencia del uso de recursos y el rendimiento de los cultivos, sino que también contribuyen a una producción más resiliente y sostenible. En esta sección se analizan las principales tecnologías y metodologías asociadas con esta visión de manejo microclimático localizado.

### 6.4.1 Monitoreo espacial-temporal con sensores distribuidos

El monitoreo espacio-temporal del microclima en invernaderos ha alcanzado niveles de precisión hasta ahora inexplorados gracias al uso de redes densas de sensores que capturan variables como temperatura, humedad relativa, presión de vapor e irradiancia en distintas alturas y posiciones. Brentarolli, E. et al. implementaron una metodología de mapeo microclimático basada en interpolación geoespacial y aprendizaje automático que permitió obtener mapas virtuales en 2D con coeficientes de determinación mayores al 0,98 para temperatura y humedad en invernaderos comerciales mediante sensores temporales y *kriging* (método de interpolación espacial que se originó en el campo de la geología minera) combinado con regresiones locales [69]. Šalagovič, J. et al., en otro estudio, una malla tridimensional de sensores reveló microgradientes internos de temperatura y déficit de presión de vapor en invernaderos de tomate, señalando zonas con estrés térmico y potencial de condensación que no serían detectados por sensores tradicionales centralizados [70].

### 6.4.2 Cartografía de variabilidad y zonificación de manejo

La zonificación microclimática permite definir unidades homogéneas de gestión dentro del invernadero para aplicar estrategias de control localizadas que optimicen el uso de recursos. Mejía Parada, C. et al. emplearon un análisis geoestadístico combinado con agrupamiento (en inglés, *clustering*) jerárquico y análisis de componentes principales para segmentar microclimas en regiones con gradientes altitudinales, alcanzando más de 90 % de coherencia interna en la identificación de zonas homogéneas que podrían servir como modelo para diseños similares en invernadero [71].

### 6.4.3 Sistemas de soporte a decisiones integrados

Los sistemas de soporte a decisiones (en inglés DSS, *Decision Support Systems*) integrados en agricultura de precisión aprovechan datos ambientales y agronómicos en tiempo real para apoyar decisiones climáticas automatizadas. Por ejemplo, Săcăleanu, D. et al. propusieron un DSS IoT que recopila datos de sensores de temperatura, humedad y concentración de CO<sub>2</sub> dentro del invernadero y ajusta parámetros de ventilación y enfriamiento vía LoRaWAN mediante una plataforma web, demostrando la viabilidad del sistema en implementación real [72].

### 6.4.4 Integración de imágenes multiespectrales y térmicas

Las imágenes multiespectrales y térmicas ofrecen una vía no invasiva pero eficaz para evaluar el estado fisiológico y térmico de los cultivos dentro del invernadero. Alordzinu, K. et al. utilizaron imágenes hiperespectrales y térmicas para estimar estrés hídrico en plantas de tomate, empleando el índice de vegetación de diferencia Normalizada (en inglés, NDVI, *Normalized Difference Vegetation Index*) y el índice de vegetación de diferencia Renormalizada (en inglés, RDVI, *Renormalized Difference Vegetation Index*) y logrando correlaciones altas ( $R^2 \sim 0,92$ ) con indicadores fisiológicos

antes de la aparición de síntomas visuales en las hojas [73]. Además, Stutsel, B. et al. aplicaron sensores térmicos combinados con imágenes ópticas desde plataformas aéreas para mapear estrés en cultivos, demostrando cómo la integración de termografía y sensores multispectrales permite una detección temprana del estrés hídrico incluso sin síntomas visibles [74].

#### 6.4.5 Automatización basada en datos geo-referenciados

La automatización climática basada en datos georreferenciados permite tomar decisiones localizadas que optimizan uso de recursos y mejoran la uniformidad térmica. Por ejemplo, Brentarolli, E. et al. desarrollaron una metodología de mapeo 3D del microclima en invernaderos comerciales, generando mapas precisos de temperatura y humedad con  $R^2$  superiores al 0,98 mediante técnicas de interpolación espacial y aprendizaje automático; esto facilitó la zonificación operativa para control climático diferenciado por secciones [69]. Asimismo, Chen, S. et al. integraron sensores distribuidos y algoritmos de agrupamiento espacial para automatizar la operación de ventiladores por zonas microclimáticas detectadas dinámicamente, logrando una mejora del 15 % en consistencia térmica frente a ventilación uniforme [10].

### 7. Retos y perspectivas futuras

Se ha podido constatar a lo largo de esta revisión que el análisis de los retos y perspectivas futuras de los invernaderos pasa indiscutiblemente por el control del microclima, el cual tiene una estrecha relación con el medio ambiente. No es un secreto que hoy el mundo está transitando por un cambio climático, donde las condiciones extremas (del clima) se presentan constantemente evidenciándose mucha sequía o grandes volúmenes de aguaceros, o condiciones acentuadas de calor en una determinada zona mientras en otras se producen muy bajas temperaturas, o advenimientos sostenidos de numerosos ciclones, tsunamis, terremotos, etc. Todo este contexto actúa como condiciones de fronteras en el manejo del microclima en los invernaderos y constituyen las principales limitaciones actuales en el manejo del microclima; y reto a la vez que obliga cada día hacer un uso más preciso de la ciencia y la técnica en aras de lograr una producción sostenible de variados alimentos durante todo el año. En esta dirección es precisamente que los invernaderos vienen a cubrir, en muchos países, ese espacio que está dejando el cambio climático. Si se toma en consideración que el control y manejo del microclima no se puede ver como un fenómeno aislado ya que este está en una estrecha relación dinámica con el medio donde se encuentre el invernadero, se hace necesario introducir la agricultura de precisión con un uso racional del control automático y la digitalización.

Una de las brechas de las investigaciones de hoy en día, en esta dirección, es no tratar de importar los métodos y algoritmos de los países más desarrollados, sino que cada país y en especial aquellos en vía de desarrollo y donde se evidencia de forma más acentuada ese cambio climático, sea capaz de desarrollar sus propias herramientas y encontrar soluciones sustentables y de bajo costo para asegurar microclimas adecuados y reproducibles. Este será el mayor reto en el control del microclima en los invernaderos, pues las perspectivas futuras apuntan, junto con el uso de la IA, el Internet de las cosas, la automatización, el manejo de grandes volúmenes de datos entre otros, a un uso más intensivos de los invernaderos.

### 8. Conclusiones

En el presente trabajo se llevó a cabo una revisión bibliográfica de los factores principales para el control del microclima en invernaderos. Se analizaron diferentes causas que influyen en la dinámica de los microclimas abarcando desde las técnicas más clásicas hasta las más recientes, las cuales están fuertemente influenciadas por el uso de las herramientas informáticas y la automatización, la inteligencia artificial, donde el aprendizaje profundo para el modelaje del comportamiento del microclima en un contexto de cambio climático brinda la posibilidad de obtener una aproximación

estrecha del comportamiento del microclima en un tiempo razonable y con un mínimo de recursos. Se constató que este tipo de enfoque es cada vez más usado en todos los países constituyendo reto y desafío en aquellos (países) en vía de desarrollo. En esta revisión se pudo ver que una de las brechas de hoy en día es no tratar de importar los métodos y algoritmos de los países más desarrollados, sino que cada país y en especial aquellos en vía de desarrollo (donde se evidencia de forma más acentuada el cambio climático) sea capaz de desarrollar sus propias herramientas y encontrar soluciones sustentables y de bajo costo para asegurar microclimas adecuados y reproducibles.

El valor diferencial de esta revisión con respecto a otras relacionadas con esta temática es que en el presente trabajo se enfatiza la necesidad de la integración de varias disciplinas de gran actualidad, como son el procesamiento digital de imágenes y la IA en su espectro más amplio direccionado a los países en vía de desarrollo en un entorno de bajos recursos, lo cual le confiere (a este artículo) un valor práctico en el contexto del cambio climático

## 9. Referencias

- [1]. Nagarsheth, S., Agbossou, K., Henao, N., & Bendouma, M., *The Advancements in Agricultural Greenhouse Technologies: An Energy Management Perspective*. Sustainability, 2025. **17**(8): p. 3407. DOI: <https://doi.org/10.3390/su17083407>
- [2]. Velazquez-Gonzalez, R. S., Garcia-Garcia, A. L., Ventura-Zapata, E., Barceinas- Sanchez, J. D. O., & Sosa-Savedra, J. C., *A Review on Hydroponics and the Technologies Associated for Medium- and Small-Scale Operations*. Agriculture, 2022. **12**(5): p. 646. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture12050646>
- [3]. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2011. *FAO in the 21st century - Executive Summary: Ensuring food security in a changing world*. USA: FAO. ISBN: 978-925-106913-4. Disponible en: <https://openknowledge.fao.org/items/19ff0dd8-ce02-42ad-b56d-39ceab731b2e>
- [4]. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2022. *Introduction and advantages of protected cultivation systems*. USA: FAO. Disponible en: <https://www.fao.org/family-farming/detail/en/c/1697565/>
- [5]. Mujeebur Rahman Khan, Tanveer Fatima Rizvi, M. Shahid Anwar Ansari, Chapter 28 - *Nematode problems in vegetables and ornamentals under protected cultivation and their sustainable management. Nematode Diseases of Crops and their Sustainable Management*, 2023. Academic Press, p. 685-706. ISBN: 9780323912266. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91226-6.00002-X>
- [6]. Shubham Jain, Deepak S. Kore, Kishorkumar G. K., Amrita Mohapatra, Hari Baksh, Vipin Kumar, Sukirti Mohanty, and Songthat William H., *A Comprehensive Review on Protected Cultivation of Horticultural Crops: Present Status and Future Prospects*. International Journal of Environment and Climate Change 2023. **13**(11): p. 3521-3531. DOI: 10.9734/IJECC/2023/v13i113528. <https://doi.org/10.9734/ijecc/2023/v13i113528>
- [7]. Ajani, O. S., Usigbe, M. J., Aboyeji, E., Uyeh, D. D., Ha, Y., Park, T., & Mallipeddi, R., *Greenhouse Micro-Climate Prediction Based on Fixed Sensor Placements: A Machine Learning Approach*. Mathematics, (2023). **11**(14): p. 3052. DOI: <https://doi.org/10.3390/math11143052>

- [8]. Kokieva, G. E., Trofimova, V. S. and Fedorov, I. R., *Greenhouse microclimate control*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020. **1001**(1): p. 012136. DOI: <https://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/1001/1/012136>
- [9]. Yadav, K., Arora, I., Kumar, A., Rana, M., Kumar, V., Kapil, & Amit, *Integrated Greenhouse Microclimate Management: A Review*. Journal of Scientific Research and Reports, 2024. **30**(7): 103–114. DOI: <https://doi.org/10.9734/jsrr/2024/v30i72127>
- [10]. Chen, S., Liu, A., Tang, F., Hou, P., Lu, Y., & Yuan, P., *A Review of Environmental Control Strategies and Models for Modern Agricultural Greenhouses*. Sensors, 2025. **25**(5): p. 1388. DOI: <https://doi.org/10.3390/s25051388>
- [11]. Ećim-Đurić, O., Milanović, M., Dimitrijević-Petrović, A., Mileusnić, Z., Dragičević, A., & Miodragović, R., *Prediction of Greenhouse Microclimatic Parameters Using Building Transient Simulation and Artificial Neural Networks*. Agronomy, 2024. **14**(6): 1147. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy14061147>
- [12]. Tiwari, N. J., Dubey, S., Kumar, A., Amala, E., Sangmesh, P., Yadav, A., Jain, R., & Giri, B., *A Comprehensive Review on Protected Cultivation of Horticultural Crops: Advances and Sustainability*. International Journal of Environment and Climate Change, 2025. **15**(2), 466–476. DOI: <https://doi.org/10.9734/ijecc/2025/v15i24740>
- [13]. Ortiz Rocha, G. A., Chamorro Medina, A. N., Gómez Arias, L., Acuña Caita, J. F., & Villagran, E., *Análisis sobre la actividad científica referente a las estrategias de climatización pasiva usada en invernaderos: Parte 2: análisis técnico*. Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, 2022. **6**(6): p. 2220-2245. DOI: [https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v6i6.3676](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v6i6.3676)
- [14]. Li, G. and Tang, L. and Zhang, X. and Dong, J and Xiao, M., *Factors affecting greenhouse microclimate and its regulating techniques: A review*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018. **167**(1): p. 012019. DOI: <https://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/167/1/012019>
- [15]. Peña-Fernández, A., Colón-Reynoso, M. A., & Mazuela, P., *Geometric Analysis of Greenhouse Roofs for Energy Efficiency Optimization and Condensation Drip Reduction*. Agriculture, 2024. **14**(2): p. 216. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture14020216>
- [16]. Zheng, L., Zhang, Q., Zheng, K., Zhao, S., Wang, P., Cheng, J., Zhang, X., & Chen, X., *Effects of Diffuse Light on Microclimate of Solar Greenhouse, and Photosynthesis and Yield of Greenhouse-grown Tomatoes*. HortScience horts, 2020. **55**(10): p. 1605-1613. DOI: <https://doi.org/10.21273/HORTSCI15241-20>
- [17]. Abid, H., Ketata, A., Lajnef, M., Chiboub, H., & Driss, Z., *Numerical investigation of greenhouse climate considering external environmental factors and crop position in Sfax central region of Tunisia*. Solar Energy, 2023. **264**: p. 112032. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.112032>
- [18]. Dewi, V., Setiawan, B., Waspodo, R., & Liyantono, L., *Microclimate Condition in the Natural Ventilated Greenhouse*. Journal Tanah dan Iklim, 2020. **4**(1): p. 31-36. DOI: <https://epublikasi.pertanian.go.id/berkala/index.php/jti/article/view/3255/3291>
- [19]. Ghoulam, M., Moueddeb, K., Nehdi, E., Boukhanouf, R., & Calautit, J., *Greenhouse design and cooling technologies for sustainable food cultivation in hot climates: Review of current practice and future status*. Biosystems Engineering. 2019. **183**: p. 121-150. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.BIOSYSTEMSENG.2019.04.016>

- [20]. Soussi, M., Chaibi, M., Buchholz, M., & Saghrouni, Z., *Comprehensive Review on Climate Control and Cooling Systems in Greenhouses under Hot and Arid Conditions*. *Agronomy*, 2022. **12**(3): p. 626. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy12030626>
- [21]. Hemming, S., Mohammadkhani, A., & Dueck, T., *Diffuse greenhouse cover materials - material technology, measurements and evaluation of optical properties*. *Acta Horticulturae*, 2008. **797**: p. 469–475. DOI: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2008.797.68>
- [22]. Kimura, K., Yasutake, D., Koikawa, K., & Kitano, M., *Spatiotemporal variability of leaf photosynthesis and its linkage with microclimates across an environment- controlled greenhouse*. *Biosystems Engineering*, 2020. **195**: p. 97-115. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.05.003>
- [23]. Zhang, F., Zhang, D., Li, L., Zhang, Z., Liang, X., Wen, Q., Chen, G., Wu, Q., & Zhai, Y., *Effect of Planting Density on Canopy Structure, Microenvironment, and Yields of Uniformly Sown Winter Wheat*. *Agronomy*, 2023. **13**(3): p. 870. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy13030870>
- [24]. Qiu, R., Katul, G., Zhang, L., Qin, S., & Jiang, X., *The Effects of Changing Environments, Abiotic Stresses, and Management Practices on Cropland Evapotranspiration: A Review*. *Reviews of Geophysics*, 2024. **63**(1). DOI: <https://doi.org/10.1029/2024rg000858>
- [25]. Farvardin, M., Taki, M., Gorjian, S., Shabani, E., & Sosa-Savedra, J. C., *Assessing the Physical and Environmental Aspects of Greenhouse Cultivation: A Comprehensive Review of Conventional and Hydroponic Methods*. *Sustainability*, 2024. **16**(3): p. 1273. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16031273>
- [26]. Felek, T., & Kürklü, A., *Climate Control and Irrigation Automation Systems in Turkish Greenhouses: A Comparative Study*. *Asian Journal of Agricultural and Horticultural Research*, 2023. **10**(4). DOI: <https://doi.org/10.9734/ajahr/2023/v10i4281>
- [27]. Li, W., Xu, X., Yao, J., Chen Q., Sun Z., Makvandi M. and Yuan P., *Natural ventilation cooling effectiveness classification for building design addressing climate characteristics*. *Sci Rep* 2024. **14**: p. 16168. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-66684-9>
- [28]. Li H., Guo Y., Zhao H., Wang Y., Chow D., *Towards automated greenhouse: A state of the art review on greenhouse monitoring methods and technologies based on internet of things*. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2021. **191**: p. 106558. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106558>
- [29]. Castro, R. P., Dinho da Silva, P., & Pires, L. C. C., *Advances in Solutions to Improve the Energy Performance of Agricultural Greenhouses: A Comprehensive Review*. *Applied Sciences*, 2024. **14**(14): 6158. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14146158>
- [30]. Tran, T., Ouammi, A., & A-Dessaint, L., *A Near-Zero Energy Smart Greenhouse Integrated Into a Microgrid for Sustainable Energy and Microclimate Management*. *IEEE Access*, 2025. **13**: p. 22243-22258. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3537536>
- [31]. Wei, X., Li, B., Lu, H., Guo, J., Dong, Z., Yang, F., Lü, E., & Liu, Y., *Distribution Characteristics and Prediction of Temperature and Relative Humidity in a South China Greenhouse*. *Agronomy*, 2024. **14**(7): p. 1580. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy14071580>
- [32]. Tang, R., Aridas, N. K., & Abu Talip, M. S., *Design of Wireless Sensor Network for Agricultural Greenhouse Based on Improved Zigbee Protocol*. *Agriculture*, 2023. **13**(8): p. 1518. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture13081518>

- [33]. Aguilar-González, R., Cárdenas-Juárez, M., Rodríguez-Ortiz, J. C., & Romero-Méndez, M. J., *Monitoring of Temperature Through a Sensor Network to Improve the Water Usage in Agriculture*. Revista Terra latinoamericana, 2023. **41**. DOI: <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1626>
- [34]. Liu, J., Chen, Y., Wang, B., Wu, X., & Na, Y., *Simulation and Experimental Study of Light and Thermal Environment of Photovoltaic Greenhouse in Tropical Area Based on Design Builder*. Applied Sciences, 2021. **11**(22): 10785. DOI: <https://doi.org/10.3390/app112210785>
- [35]. Ferentinos, K., Katsoulas, N., Tzounis, A., Bartzanas, T., & Kittas, C., *Wireless sensor networks for greenhouse climate and plant condition assessment*. Biosystems Engineering, 2017. **153**: p. 70-81. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.BIOSYSTEMSENG.2016.11.005>
- [36]. Scheelbeek, P., Bird, F., Tuomisto, H., Green, R., Harris, F., Joy, E., Chalabi, Z., Allen, E., Haines, A., & Dangour, A., *Effect of environmental changes on vegetable and legume yields and nutritional quality*. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2018. **115**: p. 6804 - 6809. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1800442115>
- [37]. Boulard, T., & Baille, A., *Modelling of air exchange rate in a greenhouse equipped with continuous roof vents*. Journal of Agricultural Engineering Research, 1995. **61**(1): p. 37–48. DOI: <https://doi.org/10.1006/jaer.1995.1028>
- [38]. Tap, R.F., van Willigenburg, L.G. and van Straten, G., *Experimental results of receding horizon optimal control of greenhouse climate*. Acta Hortic, 1996. **406**: p. 229-238. DOI: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1996.406.23>
- [39]. Norton, T., Sun, D.-W., Grant, J., Fallon, R., & Dodd, V., *Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the modeling and design of ventilation systems in the agricultural industry: A review*. Biosystems Engineering, 2007. **98**(3): p. 237–266. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.11.025>
- [40]. Fatnassi, H., Boulard, T., Poncet, C., & Chave, M. *Optimisation of greenhouse insect screening with computational fluid dynamics*. Biosystems Engineering, 2006. **93**(3): p. 301–312. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2005.11.014>
- [41]. Kittas, C., Katsoulas, N., Bartzanas, T., & Bakker, J. C., 2013. *Greenhouse climate control and energy use*. In W. Baudoin, R. Nono-Womdim, N. Lualadio, A. Hodder, N. Castilla, C. Leonardi, S. De Pascale, & M. Qaryouti (Eds.), *Good Agricultural Practices for greenhouse vegetable crops: Principles for Mediterranean climate areas* (pp. 63-95). (FAO Plant Production and Protection Paper; No. 217). Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/018/i3284e/i3284e.pdf#page=79>
- [42]. Thwin, K., Phatrapornnant, T., Horanont, T., Thepsilvisut, O., & Duy, H., *Hybrid Machine Learning Approach for Microclimate Prediction in Equipment-Operated Open Ventilated Greenhouse*. 21st International Joint Conference on Computer Science and Software Engineering, 2024. p. 418-423. DOI: <https://doi.org/10.1109/JCSSE61278.2024.10613662>
- [43]. Zhang G., Ding X., Li T., Pu W., Lou W., Hou J., *Dynamic energy balance model of a glass greenhouse: An experimental validation and solar energy analysis*. Energy, 2020. **198**(1): p. 117281. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117281>
- [44]. Si, C., Qi, F., Ding, X., He, F., Gao, Z., Feng, Q., & Zheng, L., *CFD Analysis of Solar Greenhouse Thermal and Humidity Environment Considering Soil–Crop–Back Wall Interactions*. Energies, 2023. **16**(5): 2305. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16052305>

- [45]. López-Cruz, I. L., Fitz-Rodríguez, E., Salazar-Moreno, R., Rojano-Aguilar, A., & Kacira, M., *Development and analysis of dynamical mathematical models of greenhouse climate: A review*. European Journal of Horticultural Science, 2018. **83**(5): p. 269-279. DOI: <https://doi.org/10.17660/eJHS.2018/83.5.1>
- [46]. Seth, P., Sebastian, J., *Plants and global warming: challenges and strategies for a warming world*. Plant Cell Rep. 2024. **43**(27). DOI: <https://doi.org/10.1007/s00299-023-03083-w>
- [47]. Ding, X., Jiang, Y., Hui, D., He, L., Huang, D., Yu, J., & Zhou, Q., *Model Simulation of Cucumber Yield and Microclimate Analysis in a Semi-closed Greenhouse in China*. HortScience, 2019. **54**(3): p.547–554. DOI: <https://doi.org/10.21273/HORTSCI13703-18>
- [48]. Cheng X., Li D., Shao L., Ren Z., *A virtual sensor simulation system of a flower greenhouse coupled with a new temperature microclimate model using three- dimensional CFD*. Computers and Electronics in Agriculture, 2021. **181**: p. 105934. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105934>
- [49]. Cho, A.R., Chung, S.W. and Kim, Y.J., *CO<sub>2</sub> enrichment with light control improves photosynthetic response and flower quality in Phalaenopsis Queen Beer 'Mantefon'*. Acta Hort. 2020. **1296**: p. 645-650. DOI: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2020.1296.82>
- [50]. Song, J., Chen, Z., Zhang, A., Wang, M., Jahan, M. S., *The positive effects of increased light intensity on growth and photosynthetic performance of tomato seedlings in relation to night temperature level*. Agronomy, 2022. **12**(2): p. 343. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy12020343>
- [51]. Kruidhof, H.M., Elmer, W.H., *Cultural Methods for Greenhouse Pest and Disease Management*. In: Gullino, M., Albajes, R., Nicot, P. (eds) Integrated Pest and Disease Management in Greenhouse Crops. Plant Pathology in the 21st Century, 2020. **9**. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-22304-5\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-030-22304-5_10)
- [52]. Li, L., Chen, G., Yuan, M., Guo, S., Wang, Y., & Sun, J., *CsbZIP2-miR9748-CsNPF4.4 module mediates high temperature tolerance of cucumber through jasmonic acid pathway*. Frontiers in Plant Science, 2022. **13**: 883876. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.883876>
- [53]. Wang, L. N., Zhang, Y., Xu, M. J., Liu, Q. H., & Wang, B. R., *Predictive control for greenhouse temperature and humidity and energy optimization by improved NMPC objective function algorithm*. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2024. **17**(5): p.128–136. DOI: <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20241705.8241>
- [54]. Mahmood, F., Govindan, R., Bermak, A., Yang, D., & Al-Ansari, T., *Data-driven robust model predictive control for greenhouse temperature control and energy utilisation assessment*. Applied Energy, 2023. **343**: 121190. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121190>
- [55]. Morcego, B., Yin, W., Boersma, S., van Henten, E., Puig, V., & Sun, C., *Reinforcement learning versus model predictive control on greenhouse climate control*. Computers and Electronics in Agriculture, 2023. **215** 108372. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.108372>
- [56]. Msaad, S., Harraway, M., & McAllister, R. D., *RL-guided MPC for autonomous greenhouse control*. arXiv. 2025. 2506.13278. DOI: <https://arxiv.org/abs/2506.13278>
- [57]. Sathyanarayanan, K., Sauerteig, P., & Streif, S., *Deep neural network based optimal control of greenhouses* (arXiv preprint arXiv:2311.04077v2). 2023. DOI: <https://arxiv.org/abs/2311.04077v2>

- [58]. Jawad, M., Wahid, F., Ali, S., Ma, Y., Alkhyyat, A., Khan, J., & Lee, Y., *Energy optimization and plant comfort management in smart greenhouses using the artificial bee colony algorithm*. Scientific Reports, 2025. **15**:1752. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-84141-5>
- [59]. Ahn, J. Y., Kim, Y., Park, H., Park, S. H., & Suh, H. K., *Evaluating Time-Series Prediction of Temperature, Relative Humidity, and CO<sub>2</sub> in the Greenhouse with Transformer-Based and RNN-Based Models*. Agronomy, 2024. **14**(3): p. 417. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy14030417>
- [60]. Lachouri, C. E., Mansouri, K., Belmeguenai, A., & Lafifi, M. M., *Adaptive neuro-fuzzy inference systems for modeling greenhouse climate*. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 2016. **7**(1): p. 114-119. DOI: <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2016.070114>
- [61]. Khafajeh, H., Banakar, A., Minaei, S., & Delavar, M., *A hydroponic greenhouse fuzzy control system: design, development and optimization using the genetic algorithm*. Spanish Journal of Agricultural Research, 2023. **21**(1): e0201. DOI: <https://doi.org/10.5424/sjar/2023211-19392>
- [62]. Cletus, F., & John, A. E., *Comparative analysis of machine learning models for greenhouse microclimate prediction*. Brilliance, 2023. **4**(1): 3783. DOI: <https://doi.org/10.47709/brilliance.v4i1.3783>
- [63]. Esparza-Gómez, J. M., Luque-Vega, L. F., Guerrero-Osuna, H. A., Carrasco-Navarro, R., García-Vázquez, F., Mata-Romero, M. E., Olvera-Olvera, C. A., Carlos-Mancilla, M. A., & Solís-Sánchez, L. O., *Long short-term memory recurrent neural network and extreme gradient boosting algorithms applied in a greenhouse's internal temperature prediction*. Applied Sciences, 2023. **13**(22): 12341. DOI: <https://doi.org/10.3390/app132212341>
- [64]. Wei, X., Luo, Y., Zhou, X., Zhao, J., Lu, H., & Li, B., *Temperature and relative humidity prediction in South China greenhouse based on machine learning*. Scientific Reports, 2025. **15**: 24855. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-08964-6>
- [65]. Adkisson, M., Kimmel, J. C., Gupta, M., & Abdelsalam, M., *Autoencoder-based anomaly detection in smart farming ecosystem*. IEEE International Conference on Big Data, 2021. p. 3390–3396. DOI: <https://doi.org/10.1109/BigData52589.2021.9671613>
- [66]. Islam, M. P., Nakano, Y., Lee, U., & Tokuda, K. *TheLNet270v1 – A novel deep-network architecture for the automatic classification of thermal images for greenhouse plants*. Frontiers in Plant Science, 2021. **12**: 630425. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.630425>
- [67]. Mallick, S., Airaldi, F., Dabiri, A., Sun, C., & De Schutter, B., *Reinforcement learning-based model predictive control for greenhouse climate control*. Smart Agricultural Technology, 2024. **10**(1): 100751. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100751>
- [68]. Adesanya, M. A., Obasekore, H., Rabiou, A., Na, W. H., Ogunlowo, Q. O., Akpenpuun, T. D., Kim, M. H., Kim, H. T., Kang, B. Y., & Lee, H. W., *Deep reinforcement learning for PID parameter tuning in greenhouse HVAC system energy optimization: A TRNSYS-Python cosimulation approach*. Expert Systems with Applications, 2024. **252**: 124126. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.124126>
- [69]. Brentarolli, E., Locatelli, S., Nicoletto, C., Sambo, P., Quaglia, D., & Muradore, R., *A spatio-temporal methodology for greenhouse microclimatic mapping*. PLoS ONE, 2024. **19**(9): e0310454. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0310454>

- [70]. Šalagovič, J., Vanhees, D., Verboven, P., Holsteens, K., Verlinden, B., Huysmans, M., Van de Poel, B., & Nicolai, B., *Microclimate monitoring in commercial tomato (Solanum lycopersicum L.) greenhouse production and its effect on plant growth, yield and fruit quality*. *Frontiers in Horticulture*, 2024. **3**: 1425285. DOI: <https://doi.org/10.3389/fhort.2024.1425285>
- [71]. Mejía Parada, C. A., Soto-Paz, J., Mora-Ruiz, V., & Attia, S. *Microclimate zoning based on double clustering method for humid climates with altitudinal gradient variations: A case study of Colombia*. *Atmosphere*, 2023. **15**(6): 709. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos15060709>
- [72]. Săcăleanu, D.-I., Matache, M.-G., Roșu, Ș.-G., Florea, B.-C., Manciu, I.-P., & Perișoară, L.-A., *IoT-Enhanced Decision Support System for Real-Time Greenhouse Microclimate Monitoring and Control*. *Technologies*, 2024. **12**(11): 230. DOI: <https://doi.org/10.3390/technologies12110230>
- [73]. Alordzinu, K. E., Li, J., Lan, Y., Appiah, S. A., Al Aasmi, A., Wang, H., Liao, J., Sam-Amoah, L. K., & Qiao, S., *Ground-based hyperspectral remote sensing for estimating water stress in tomato growth in sandy loam and silty loam soils*. *Sensors*, 2021. **21**(17): 5705. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21175705>
- [74]. Stutsel, B., Johansen, K., Malbêteau, Y. M., McCabe, M. F., & van Wittenberghe, S. *Detecting plant stress using thermal and optical imagery from an unoccupied aerial vehicle*. *Frontiers in Plant Science*, 2021. **12**: 2225. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.734944>
- [75]. Ortiz, G. A., Chamorro, A. N., Acuña-Caita, J. F., López-Cruz, I. L. & Villagran, E. (2023). *Calibration and Implementation of a Dynamic Energy Balance Model to Estimate the Temperature in a Plastic-Covered Colombian Greenhouse*. *AgriEngineering*, **5**(4), 2284–2302. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriengineering5040140>
- [76]. Beaulac, A., Lalonde, T., Haillot, D. & Monfet, D. (2024). *Energy Modeling, Calibration, and Validation of a Small-Scale Greenhouse Using TRNSYS*. *Applied Thermal Engineering*, **248**, 123195. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.123195>
- [77]. Zhang, Y., Sun, W., Jin, L., Yang, H., Wang, J. & Shu, S. (2025). “Computational Fluid Dynamics-Based Simulation of Ventilation in a Zigzag Plastic Greenhouse.” *Horticulturae*, **11**(2), 175. DOI: <https://doi.org/10.3390/horticulturae11020175>
- [78]. Wei, X., Ou, Y., Li, Z., Guo, J., Lü, E., Yang, F., Liu, Y. & Li, B. (2025). Optimization of Greenhouse Structure Parameters Based on Temperature and Velocity Distribution Characteristics by CFD—A Case Study in South China. *Agriculture*, **15**(15), 1660. <https://doi.org/10.3390/agriculture15151660>

## Agradecimientos

El Dr. Sosa realiza una estancia de investigación en la Universidad del caribe y agradece la hospitalidad de dicha institución, además, a la SIP y COTEBAL del IPN, por el permiso otorgado para realizar dicha estancia de investigación. La Dra. Estela Cerezo Acevedo (†) participó activamente en el desarrollo de esta investigación. Dedicamos este artículo a su memoria en reconocimiento a su valiosa aportación.

### Contribución de los autores

**Julio Cesar Sosa Savedra.** ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2318-2957>

Participó en la conceptualización del documento, adquisición de fondos, administración del proyecto, redacción del manuscrito y edición.

**Victor Romero.** ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-1034-6458>

Participó en la conceptualización del documento, investigación, redacción del manuscrito y edición.

**Estela Cerezo Acevedo.** ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3459-4033>

Participó en la redacción del manuscrito y edición.

**Roberto-Sostrand Velázquez-González.** ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9137-255X>

Participó en la redacción del manuscrito y edición.

**Roberto Rodríguez Morales.** ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3022-1747>

Participó en la redacción del manuscrito y edición, supervisión y autor de correspondencia.