



Capítulo VI

110

Sistemas de climatización pasiva para invernaderos de cubierta plástica

Fabián Andrés Velásquez Ayala
John Javier Espitia González
Edwin Andrés Villagrán Munar

Introducción

Desde la década de los años sesenta, el crecimiento de la población mundial ha sido acelerado, por lo que el suministro mundial de alimentos per cápita tuvo un incremento de 2.200 kcal día⁻¹, en 1960, a 2.800 kcal día⁻¹, en 2009 (Paksoy & Beyhan, 2021). Además, se estima que actualmente el 12,5 % de la población mundial se encuentra en estado de desnutrición (Food and Agriculture Organization [FAO], 2013) y que para el año 2050 se puede alcanzar una cifra aproximada a los 9,8 billones de personas (Gorjian et al., 2021). Ante este panorama mundial, la seguridad alimentaria se ha consolidado como un factor crítico para garantizar la sostenibilidad alimentaria en el mundo, factor en que la inversión en agricultura es un componente crucial para superar las problemáticas mencionadas anteriormente.

En el contexto de la seguridad alimentaria, los invernaderos son una alternativa para intensificar la demanda continua de alimentos, consolidándose como un sector agrícola altamente competitivo a nivel mundial (Baddadi et al., 2019). El objetivo de un invernadero es proporcionar condiciones climáticas adecuadas para el crecimiento de las plantas y para una alta productividad. Sin embargo, estas condiciones ambientales son afectadas por los factores externos, como en el caso de los periodos de invierno o los descensos drásticos de temperatura en la noche (Bazgaou et al., 2020). Por lo tanto, se debe recurrir a diferentes fuentes de energía para mantener la favorabilidad de las condiciones climáticas dentro de estas estructuras.

La calefacción en el interior del invernadero representa la principal demanda de energía, la cual se suministra, generalmente, quemando combustibles fósiles (Paksoy & Beyhan, 2021). Esta práctica genera un incremento de los costos de energía y una preocupación ambiental asociada a la emisión de gases de efecto invernadero, por lo cual es necesario disminuir la demanda externa de energía. En este sentido, las soluciones están orientadas al aprovechamiento de las fuentes renovables para mejorar la eficiencia energética.

La energía solar es una fuente segura, limpia y abundantemente disponible, la cual es una alternativa para las aplicaciones de calefacción en invernaderos. El principio de funcionamiento consiste en la recolección y almacenamiento del exceso de energía solar térmica durante el día para ser utilizado en la noche, con el objetivo de suplir las necesidades de calefacción (Shukla et al., 2016). De acuerdo con Harjunowibowo et al. (2016), existen dos tipos de invernaderos que utilizan la energía solar para calefacción:

- Invernaderos pasivos: implementan materiales especiales de cubierta y estructura para maximizar las ganancias de calor.
- Invernaderos activos: están equipados con sistemas de recolección y almacenamiento de calor independientes al invernadero.

A continuación, se presenta la descripción de algunas tecnologías de climatización pasiva utilizadas en invernaderos de cubierta plástica.

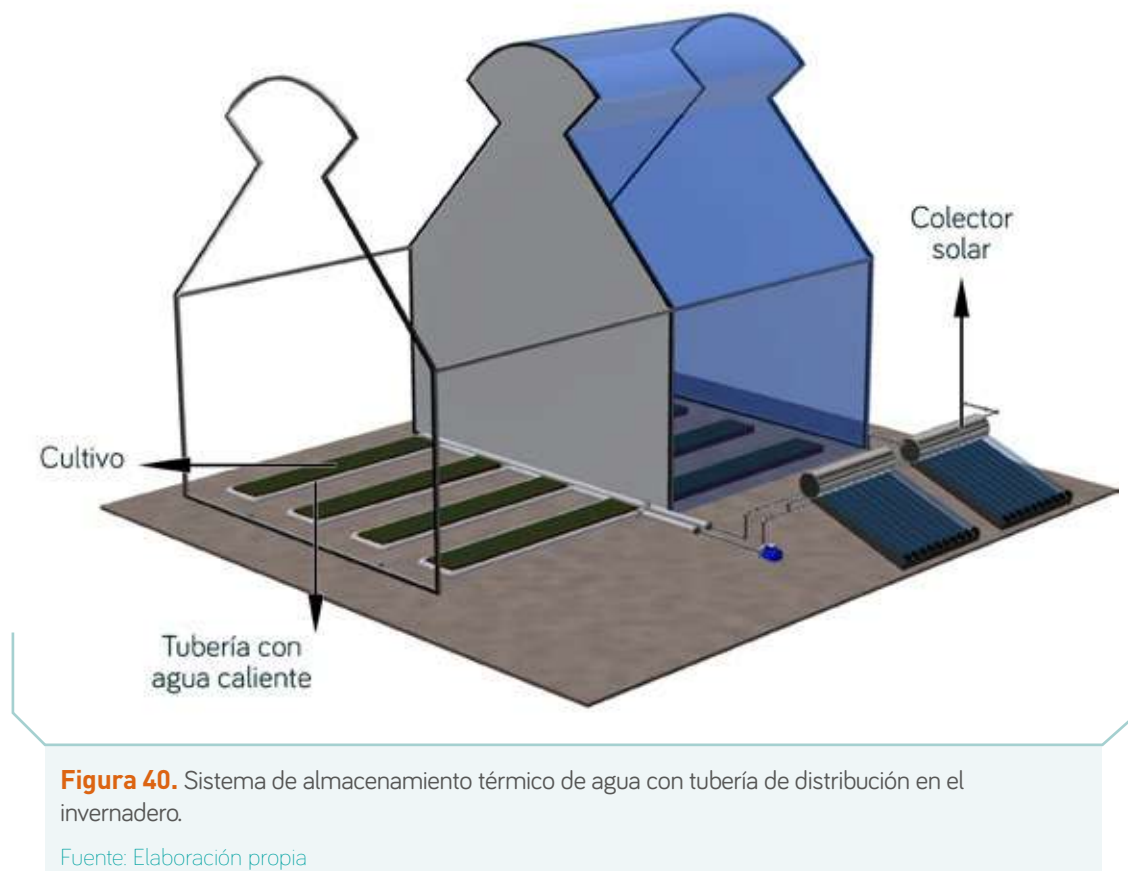
Tecnologías de climatización pasiva para uso en invernaderos

Tecnologías de almacenamiento térmico

El principio de funcionamiento de esta tecnología consiste en captar el exceso de calor del invernadero durante el día para transferirlo a un sistema de almacenamiento térmico y, posteriormente, suministrar este calor en la noche, con el fin de mantener las condiciones de climatización (Harjunowibowo et al., 2016). Los sistemas de almacenamiento de calor utilizan la capacidad calorífica de un material específico para almacenar la energía térmica de fuentes naturales o artificiales (Paksoy & Beyhan, 2021). Los más implementados son los siguientes.

Sistemas de almacenamiento de agua

Estos sistemas implican el almacenamiento de agua en empaques de polietileno (PE), contenedores de vidrio traslúcido reforzado y tanques de agua (figura 40). Estos dispositivos pueden ser dispuestos dentro de los invernaderos paralelamente a la hilera del cultivo o, en el caso de los tanques, a lo largo de la pared norte del invernadero (Sethi & Sharma, 2008). Durante el día, la energía de la radiación solar es almacenada. Por la noche, cuando la temperatura en el interior es inferior a la temperatura del agua almacenada, el calor contenido en los empaques es transferido por los mecanismos de convección y radiación hacia el invernadero (Syed & Hachem, 2019). Este tipo de sistema ha demostrado tener la capacidad de mantener la temperatura entre 2 y 4 °C más alta, en comparación con las condiciones ambientales durante el periodo nocturno (Sethi & Sharma, 2008).



Sistemas de almacenamiento en lecho de roca

Esta técnica implementa el almacenamiento de calor sensible en un lecho de roca localizado bajo tierra (figura 41). La profundidad del lecho está entre los 40 y 50 cm, y se puede encerrar en un recinto de almacenamiento de hormigón aislado (Sethi & Sharma, 2008). Durante el día, el exceso de calor en el invernadero es transferido al lecho de rocas con la ayuda de un ventilador. En la noche, el calor es transferido desde el lecho de rocas al aire frío para ser retornado al invernadero. Con el fin de utilizar de manera óptima la capacidad de almacenamiento térmico, se debe garantizar una distribución uniforme del aire en el lecho de roca (Sethi & Sharma, 2008).

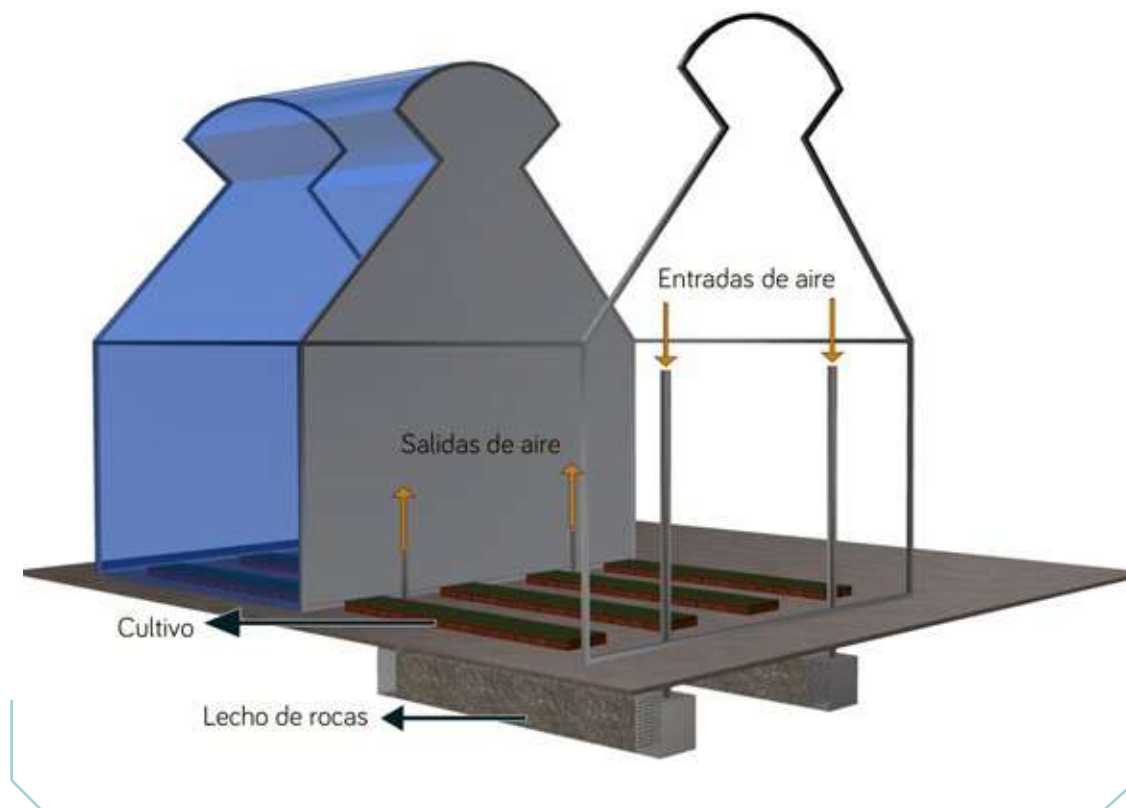


Figura 41. Sistema de almacenamiento térmico en lecho de roca en invernadero.

Fuente: Elaboración propia

La implementación de este sistema ha demostrado mejorar el microclima de los invernaderos en la noche. De acuerdo con el estudio reportado por Bazgaou et al., (2018), la presencia del sistema de calefacción por lecho de roca logró un aumento del aire interior en $2,6^{\circ}\text{C}$ y una reducción de la humedad relativa del 10 %. Además, se reporta que el uso de este tipo de sistema repercutió positivamente en el desarrollo de las plantas de tomate y en la calidad de sus frutos. También mejoró su rendimiento en un 29 %.

Material de cambio de fase

El principio de funcionamiento de los materiales de cambio de fase (MCF) está basado en la absorción y liberación de energía por el cambio de estados físicos debido al uso de calor latente (Gorjian et al., 2021). Por lo tanto, los MCF son implementados para capturar la energía térmica de la atmósfera entre las temperaturas máximas y mínimas diarias, mostrando una capacidad de almacenamiento y suministro de energía uniforme (Takudzwa Muzhanje et al., 2022).

Los materiales más importantes para aplicaciones en invernaderos son los que presentan puntos de fusión entre 15 y 65 °C (Sethi & Sharma, 2008). Los MCF han demostrado aumentar la temperatura de 2 a 8 °C, de acuerdo con la localización y diseño del invernadero (Sethi & Sharma, 2008; Syed & Hachem, 2019). Sin embargo, algunas de las desventajas asociadas a estos materiales son la baja conductividad térmica, las variaciones en las propiedades termofísicas en ciclos extendidos, la segregación de fases, el subenfriamiento, el cambio de volumen y los altos costos (Gorjian et al., 2021).

Como se muestra en la figura 42, los MCF se pueden clasificar en tres clases: como compuestos orgánicos, inorgánicos y mezclas eutécticas (Gorjian et al., 2021; Nishad & Krupa, 2022; Sethi & Sharma, 2008). Los MCF orgánicos incluyen parafinas, aceites vegetales y ácidos grasos, mientras que los inorgánicos comprenden sales hidratadas y metales, y son adecuados para aplicaciones de alta temperatura (Nishad & Krupa, 2022). Por otra parte, las mezclas eutécticas son combinaciones de dos o más MCF, que pueden ser inorgánico-inorgánico y orgánico-inorgánico (Nishad & Krupa, 2022) (figura 42).

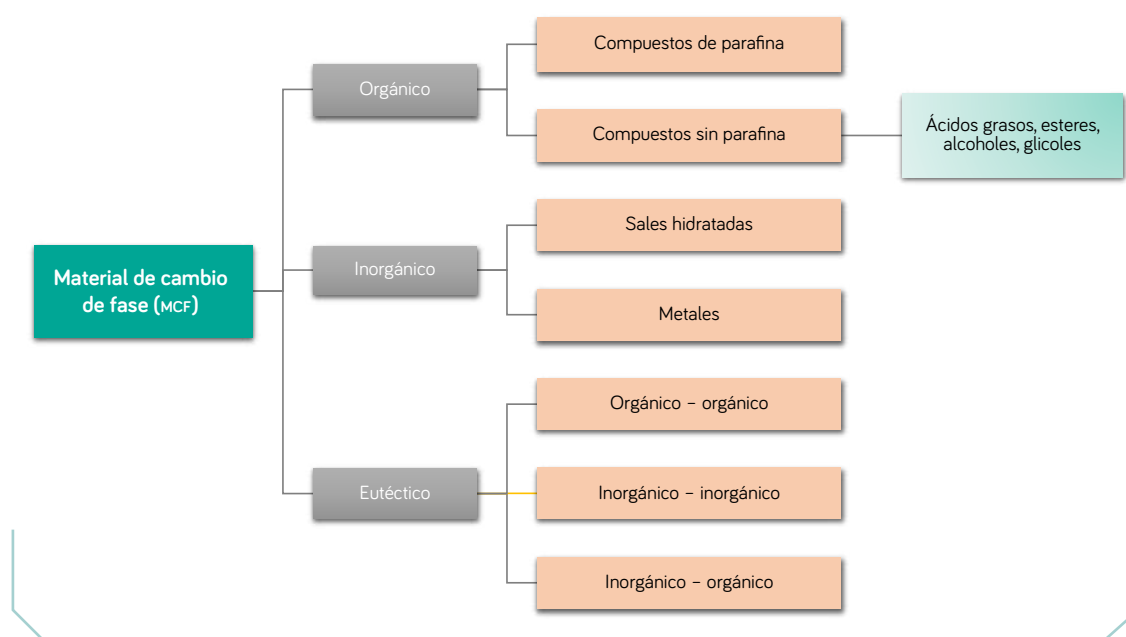


Figura 42. Clasificación de los materiales de cambio de fase.

Fuente: Elaboración propia con base en Nishad & Krupa (2022).

Colectores solares térmicos

La energía solar es una fuente de energía renovable ampliamente extendida que puede utilizarse en los invernaderos mediante la implementación de colectores solares que convierten la energía de irradiación solar en energía térmica. Posteriormente, esta energía es transferida a un fluido de trabajo (aire, agua o aceite) (Tian & Zhao, 2013). El calor transportado por el fluido de trabajo es usado como medio de calefacción durante la noche o en los días de invierno.

El principio de funcionamiento de los colectores térmicos puede variar según el tipo de colector utilizado. En este caso, los principales aspectos para tener en cuenta son la temperatura objetivo, el requerimiento de energía, el criterio económico y la disponibilidad de espacio (Carrión-Chamba et al., 2022). Generalmente, los colectores solares se clasifican en dos categorías, de acuerdo con las relaciones de concentración (Tian & Zhao, 2013):

Colectores no concentradores

Presentan la misma área de interceptación y absorción, y operan a bajo rango de temperatura ($< 120^{\circ}\text{C}$). Dentro de este tipo de colectores se pueden encontrar el colector de placa plana y el de tubos de vacío. El colector de placa plana (figura 43a) consta de cubiertas de vidrio, placas absorbentes, capas de aislamiento y tubos de recuperación que contienen el fluido de trabajo; suele estar en una posición fija, contando con una orientación adecuada (Tian & Zhao, 2013). Los colectores de tubos de vacío (figura 43b) constan de un número determinado de tubos de cristal, los cuales están constituidos por dos tubos concéntricos sellados al vacío (Carrión-Chamba et al., 2022). El objetivo del vacío es reducir las pérdidas de calor por conducción-convección y operar el dispositivo a temperaturas superiores a los 120°C .

Colectores concentradores

Este tipo de concentrador tiene superficies reflectantes cóncavas que interceptan y enfocan la radiación solar en un área receptora. En consecuencia, se logra un aumento del flujo de calor, para alcanzar una mayor eficiencia de Carnot cuando se trabaja a temperaturas más altas (Tian & Zhao, 2013). Dentro de este tipo de colectores se destacan los de campo de heliostatos, de plato parabólico y cilindroparabólicos. Esta tecnología es comúnmente utilizada para la generación de energía eléctrica.

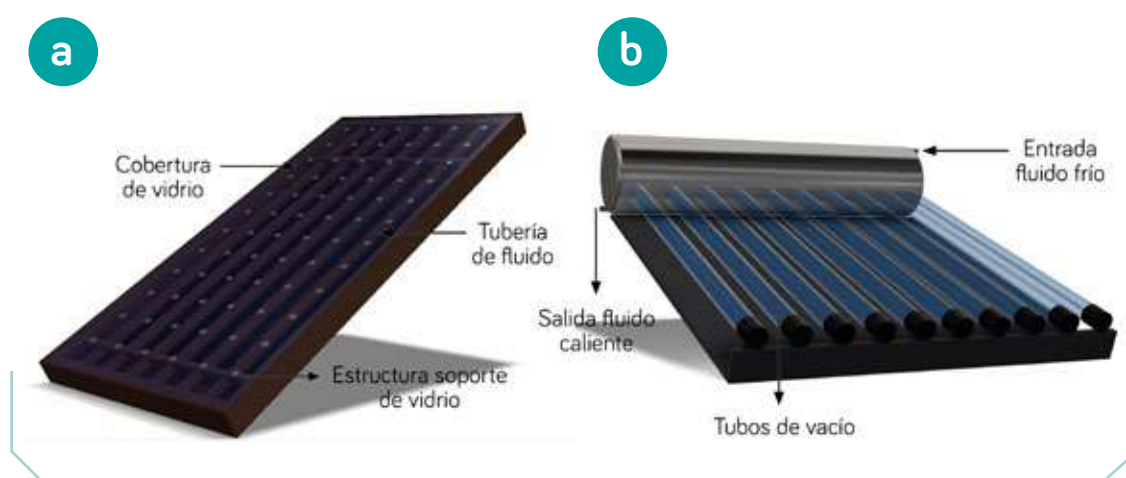


Figura 43. Colectores solares. a. De placa plana; b. De tubos de vacío.

Fuente: Elaboración propia

Aislamiento móvil - pantallas térmicas

Los invernaderos presentan una alta tasa de pérdida de calor a través de las paredes y el techo, por lo tanto, se han implementado técnicas de aislamiento móvil en estas zonas, con el fin de garantizar la factibilidad energética y controlar las condiciones de microclima (Harjunowibowo et al., 2016). El aislamiento móvil suele consistir en una cortina o una pantalla térmica colocada dentro o fuera de la cubierta del invernadero para reducir la pérdida de calor al ambiente (figura 44). Durante el día, estos aislamientos se descubren para permitir el calentamiento térmico del invernadero, mientras que en la noche las cortinas generan una resistencia térmica adicional que reduce la tasa de transferencia de calor al entorno (Sethi & Sharma, 2008).

De acuerdo con Syed y Hachem, (2019), la aplicación de varias pantallas térmicas puede reducir la pérdida de calor en un 35 % y, además, puede lograr un ahorro del 23 al 60 % del costo de energía en calefacción de los invernaderos. Los diseños de pantallas térmicas son variados y pueden comprender: espuma líquida entre dos capas de polietileno, láminas de poliéster luminizado, vidrio, policarbonato, fibra de vidrio, entre otros materiales (Sethi & Sharma, 2008; Syed & Hachem, 2019).



Figura 44. Pantalla interna de aislamiento térmico.

Fuente: Elaboración propia

Torres de aireación

Las torres de aireación son un sistema de control de viento tradicionalmente utilizado con fines de ventilación y refrigeración de edificios en países con climas cálidos. Este sistema funciona con la ventilación impulsada por el viento y con efecto de chimenea, donde la diferencia de presión entre la entrada y la salida del captador de viento actúa como fuerza motriz para suministrar el flujo de aire a un espacio interno. De esta manera, se elimina el aire caliente y estancado (figura 45) (Ghoulem et al., 2020b). Este gradiente de temperatura entre aire exterior e interior genera el movimiento del flujo de aire.

Una característica principal de las torres de aireación es que son consideradas una tecnología ambientalmente sostenible, por el uso de energía renovable, bajo consumo de energía y alta confiabilidad, ya que no incluyen componentes móviles (Harjunowibowo et al., 2016; Jomehzadeh et al., 2017). La implementación de este tipo de sistemas en invernaderos ha demostrado la capacidad de proporcionar mayores tasas de flujo de aire y disminuir la temperatura del aire entre 10 y 16 °C (Ghoulem et al., 2020a, 2020b). Sin

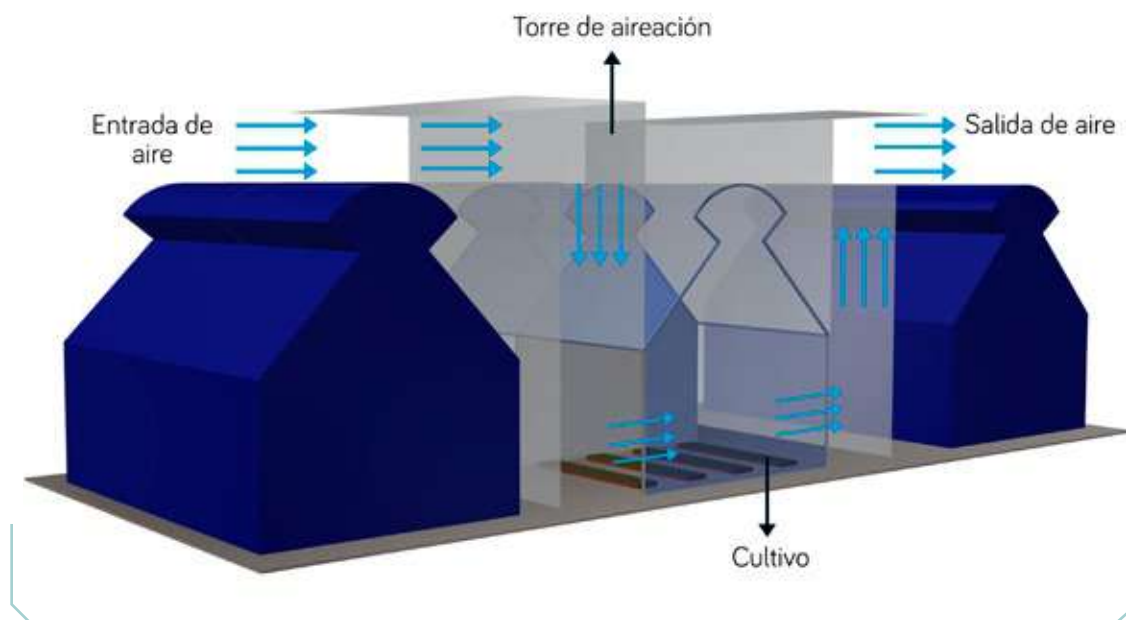


Figura 45. Torre de aireación en invernadero.

Fuente: Elaboración propia

embargo, esta tecnología presenta inconvenientes relacionados con los costos de implementación, puesto que puede requerir estructuras que alcanzan los 10 m (Ghoulem et al., 2020b). Por otra parte, es posible que la variación en las condiciones provoque altas humedades y temperaturas que atraen enfermedades y plagas de insectos. En consecuencia, se debe considerar la implementación de otro tipo de estrategia de enfriamiento (Ghoulem et al., 2020b; Harjunowibowo et al., 2016).

Invernadero cerrado o semicerrado

El concepto es ampliamente usado con el objetivo de ahorrar energía y reducir emisiones de CO_2 . La figura 46 muestra un invernadero cerrado con ventanas de control de flujo de aire. El ahorro de energía se logra gracias a las bajas de ventilación, que reducen las pérdidas. Además (Sapounas et al., 2020), el exceso de calor en forma sensible y latente se recolecta y almacena para cubrir la demanda de calefacción en un momento posterior (Harjunowibowo et al., 2016). De igual manera, los invernaderos cerrados o semicerrados

permiten tener un control de la temperatura, la humedad y la concentración de CO_2 de forma independiente. Así, se pueden lograr combinaciones de condiciones climáticas, como, por ejemplo, controlar suministro de intensidad de luz o modular las tasas de suministro de CO_2 (Sapounas et al., 2020).



Figura 46. Invernadero cerrado con ventanas superiores y laterales para el control de flujo de aire.

Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, los invernaderos semicerrados ofrecen otros beneficios potenciales, como un mejor control del ambiente, reducción en el consumo de agua debido a una menor pérdida de vapor de agua a través de la ventilación, y disminución de la incidencia de insectos y esporas de hongos, que conlleva un menor uso de pesticidas (Sapounas et al., 2020). En general, se ha demostrado que estos conceptos pueden reducir el uso de energía en un 20 % y mejorar la eficiencia energética en un 50 % (Harjunowibowo et al., 2016; Opdam et al., 2004), y, por lo tanto, se perfilan como una tendencia desde el punto de vista de flexibilidad en el control climático, mayores rendimientos y disminución del consumo energético.

Conclusiones

Los sistemas de climatización pasiva tienen la capacidad de brindar las condiciones climáticas adecuadas en el interior del invernadero, por ende, se pueden lograr mayores rendimientos en el cultivo. De igual manera, estos sistemas contribuyen al ahorro de energía y disminuyen la dependencia de los combustibles fósiles y las emisiones de CO₂.

En los países en vía de desarrollo, estos sistemas pueden alcanzar beneficios sostenibles a nivel económico (ahorro de energía) y productivo (mayor capacidad de producción), por lo tanto, son una buena estrategia para garantizar la seguridad alimentaria. A nivel nacional, se requieren esfuerzos de investigación para determinar la viabilidad técnica y económica de la implementación de los sistemas de almacenamiento térmico para las diferentes zonas climáticas que existen en el país. En la actualidad, mediante el uso de herramientas de modelado y simulación, se planteó el diseño geométrico y energético de un sistema de climatización pasiva que se construirá en el Centro de Investigación Tibaitatá de AGROSAVIA, y con el cual se espera optimizar las condiciones microclimáticas diurnas y nocturnas de un invernadero de cubierta plástica.

Referencias

- Baddadi, S., Bouadila, S., & Guizani, A. (2019). Beneficial use of two packed beds of latent storage energy for the heating of a hydroponic greenhouse. *Energy Procedia*, 162, 156-163. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.04.017>
- Bazgaou, A., Fatnassi, H., Bouharroud, R., Elame, F., Ezzaeri, K., Gourdo, L., Wifaya, A., Demrati, H., Tiskatine, R., Bekkaoui, A., Aharoune, A., & Bouirden, L. (2020). Performance assessment of combining rock-bed thermal energy storage and water filled passive solar sleeves for heating Canarian greenhouse. *Solar Energy*, 198, 8-24. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.01.041>
- Bazgaou, A., Fatnassi, H., Bouhroud, R., Gourdo, L., Ezzaeri, K., Tiskatine, R., Demrati, H., Wifaya, A., Bekkaoui, A., Aharoune, A., & Bouirden, L. (2018). An experimental study on the effect of a rock-bed heating system on the microclimate and the crop development under Canarian greenhouse. *Solar Energy*, 176, 42-50. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2018.10.027>
- Carrión-Chamba, W., Murillo-Torres, W., & Montero-Izquierdo, A. (2022). Una revisión de los últimos avances de los colectores solares térmicos aplicados en la industria. *Ingenius. Revista de Ciencia y Tecnología*, 27, 59-73.
- Food and Agriculture Organization [FAO]. (2013). *FAO statistical yearbook 2013: world food and agriculture*. FAO.

- Ghoulem, M., el Moueddeb, K., Nehdi, E., Zhong, F., & Calautit, J. (2020a). Design of a passive down-draught evaporative cooling windcatcher (PDEC-WC) system for greenhouses in hot climates. *Energies*, 13(11), 2934.
- Ghoulem, M., el Moueddeb, K., Nehdi, E., Zhong, F., & Calautit, J. (2020b). Analysis of passive down-draught evaporative cooling windcatcher for greenhouses in hot climatic conditions: parametric study and impact of neighbouring structures. *Biosystems Engineering*, 197, 105-121. <https://doi.org/10.1016/J.BIOSYSTEMSENG.2020.06.016>
- Gorjian, S., Ebadi, H., Najafi, G., Singh Chandel, S., & Yildizhan, H. (2021). Recent advances in net-zero energy greenhouses and adapted thermal energy storage systems. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 43, 100940. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100940>
- Harjunowibowo, D., Cuce, E., Omer, S. A., & Riffat, S. B. (2016). *Recent passive technologies of greenhouse systems: a review* [Conferencia]. 15th International Conference on Sustainable Energy Technologies.
- Jomehzadeh, F., Nejat, P., Calautit, J. K., Yusof, M. B. M., Zaki, S. A., Hughes, B. R., & Yazid, M. N. A. W. M. (2017). A review on windcatcher for passive cooling and natural ventilation in buildings, part 1: Indoor air quality and thermal comfort assessment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 736-756. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2016.11.254>
- Nishad, S., & Krupa, I. (2022). Phase change materials for thermal energy storage applications in greenhouses: a review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 52, 102241. <https://doi.org/10.1016/J.SETA.2022.102241>
- Opdam, J. J. G., Schoonderbeek, G. G., Heller, E. M. B., & de Gelder, A. (2004). Closed greenhouse: a starting point for sustainable entrepreneurship in horticulture. *Acta de Horticultura*, 691, 517-524. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2005.691.61>
- Paksoy, H. Ö., & Beyhan, B. (2021). 25 - thermal energy storage systems for greenhouse technology. En L. F. Cabeza (Ed.), *Advances in thermal energy storage systems* (2da ed.) (pp. 699-715). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819885-8.00025-5>
- Sapounas, A., Katsoulas, N., Slager, B., Bezemer, R., & Lelieveld, C. (2020). Design, Control, and Performance Aspects of Semi-Closed Greenhouses. *Agronomy*, 10(11), 1739.
- Sethi, V. P., & Sharma, S. K. (2008). Survey and evaluation of heating technologies for worldwide agricultural greenhouse applications. *Solar Energy*, 82(9), 832-859. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.02.010>
- Shukla, A., Sharma, A., & Kant, K. (2016). Solar greenhouse with thermal energy storage: a review. *Current Sustainable/Renewable Energy Reports*, 3(3), 58-66. <https://doi.org/10.1007/s40518-016-0056-y>
- Syed, A. M., & Hachem, C. (2019). Review of design trends in lighting, environmental controls, carbon dioxide supplementation, passive design, and renewable energy systems for agricultural greenhouses. *Journal of Biosystems Engineering*, 44(1), 28-36. <https://doi.org/10.1007/s42853-019-00006-0>

Takudzwa Muzhanje, A., Hassan, M. A., & Hassan, H. (2022). Phase change material based thermal energy storage applications for air conditioning: review. *Applied Thermal Engineering*, 214, 118832. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118832>

Tian, Y., & Zhao, C. Y. (2013). A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications. *Applied Energy*, 104, 538-553. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.11.051>