



DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v6i6.3676

**Análisis sobre la actividad científica referente a las estrategias
de climatización pasiva usada en invernaderos:
Parte 2: análisis técnico**

Gloria Alexandra Ortiz Rocha

glaortizro@unal.edu.co

<https://orcid.org/0000-0002-4137-3837>

Colombia.

Adrian Nicolas Chamorro Medina

achamorro@agrosavia.co

<https://orcid.org/0000-0001-7393-7847>

Colombia.

Linda Gómez Arias

lygomez@agrosavia.co

<https://orcid.org/0000-0002-2351-5424>

Colombia.

John Fabio Acuña Caita

jfacunac@unal.edu.co

<https://orcid.org/0000-0003-1668-5836>

Colombia.

Edwin Villagran

evillagran@agrosavia.co

<https://orcid.org/0000-0003-1860-5932>

Colombia.

Correspondencia: glaortizro@unal.edu.co

Artículo recibido 15 octubre 2022 Aceptado para publicación: 15 noviembre 2022

Conflictos de Interés: Ninguna que declarar

Todo el contenido de **Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar**, publicados en este sitio están disponibles bajo

Licencia [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) 

Cómo citar: Ortiz Rocha, G. A., Chamorro Medina, A. N., Gómez Arias, L., Acuña Caita, J. F., & Villagran, E. (2022). Análisis sobre la actividad científica referente a las estrategias de climatización pasiva usada en invernaderos: Parte 2: análisis técnico. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 6(6), 2220-2245. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v6i6.3676

RESUMEN

La producción agrícola en cultivos bajo invernadero cobra cada vez más relevancia a nivel mundial, esto no es una excepción en Latinoamérica y el Caribe, donde cada año las áreas bajo este sistema de cultivo, crecen en superficie y en diversidad de cultivos. Así mismo los efectos del cambio climático o de algunos fenómenos de variabilidad climática, propician que en el interior de las principales estructuras de invernadero implementadas en algunas ocasiones se generen condiciones de microclima inadecuadas para el crecimiento y desarrollo de las plantas, afectando los rendimientos de los cultivos y por ende en la sostenibilidad de este tipo de sistemas de producción de alimentos. También es importante mencionar que, en algunos países subdesarrollados debido a la condición económica local, no es posible la implementación de sistemas de climatización activa, así mismo en países desarrollados donde esta práctica ya está establecida hace más de 4 décadas, existe un interés permanente de reducir el uso de combustibles fósiles asociados a prácticas de climatización debido al costo económico y ambiental. Por lo tanto, en los últimos años han cobrado importancia las innovaciones tecnológicas que permiten la implementación de sistemas de climatización pasiva para la adecuación microclimática de invernaderos. En este trabajo se realizó una recopilación de más de 350 estudios desarrollados a nivel mundial desde el año 2005, de cada uno de estos trabajos se rescató y analizó la información técnica relevante. Los resultados encontrados permitieron identificar que el uso de estos sistemas puede aumentar la producción de hortalizas como el tomate en más de un 35% y permiten reducir el uso de combustibles fósiles en más del 50%, lo cual genera menores costos económicos y ambientales, contribuyendo como tal a la sostenibilidad de la producción de alimentos.

Palabras clave: *energía solar; tipo de invernadero; bomba de calor; microclima; optimización climática; agrovoltaica.*

Analysis of scientific activity on passive climate control strategies used in greenhouses: part 2: technical analysis

ABSTRACT

Agricultural production of greenhouse crops is becoming increasingly important worldwide, and this is no exception in Latin America and the Caribbean, where every year the areas under this cultivation system grow in surface area and crop diversity. Likewise, the effects of climate change or of some climate variability phenomena, cause that in the interior of the main greenhouse structures implemented in some occasions, inadequate microclimate conditions are generated for the growth and development of plants, affecting crop yields and therefore the sustainability of this type of food production systems. It is also important to mention that in some underdeveloped countries, due to local economic conditions, it is not possible to implement active climate control systems. Likewise, in developed countries where this practice has been established for more than 4 decades, there is a permanent interest in reducing the use of fossil fuels associated with climate control practices due to the economic and environmental cost. Therefore, in recent years, technological innovations that allow the implementation of passive climate control systems for greenhouse climate control have gained importance. In this work, a compilation of more than 350 studies developed worldwide since 2005 was carried out, from each of these works the relevant technical information was rescued and analyzed. The results found allowed us to identify that the use of these systems can increase the production of vegetables such as tomatoes by more than 35% and reduce the use of fossil fuels by more than 50%, which generates lower economic and environmental costs, contributing to the sustainability of food production.

Keywords: *solar energy; greenhouse type; heat pump; microclimate; climate optimization; agrovoltaic.*

INTRODUCCIÓN

Uno de los principales objetivos de la producción de alimentos bajo invernadero o bajo cualquier sistema de agricultura protegida, es proporcionar un microclima adecuado para el crecimiento y desarrollo de las plantas, también se busca extender las épocas de cultivo a meses donde las condiciones climáticas externas no permiten la producción a campo abierto (Rojas-Rishor et al., 2022; Salinas-Velandia et al., 2022). Otro de los beneficios de este método de cultivo consiste en aumentar la eficiencia del uso del agua y fertilizantes, así como limitar o evitar el ingreso de insectos plaga al área de cultivo (Baxevanou et al., 2010; Tanny et al., 2018; Villagran et al., 2020).

Esta estrategia de producción de alimentos es cada vez mas relevante en muchos países a nivel mundial, puesto que se ha convertido en una herramienta de adaptación de la agricultura al cambio climático y adicionalmente permite intensificar la producción agrícola con mayores rendimientos, lo cual es un factor diferencia en estos escenarios actuales de aumento poblacional (Akrami et al., 2020; Villagran et al., 2020). Sin embargo también es importante mencionar que en algunas regiones del mundo, en ocasiones la implementación de la producción agrícola bajo invernaderos de baja tecnología no es suficiente para garantizar la producción de alimentos a lo largo del año, por lo tanto es necesario recurrir a practicas de acondicionamiento que son altamente costosas en términos energéticos y ambientales (Gourdo et al., 2019; Villagran et al., 2021).

De otro lado en la region tropical y en países de Latinoamérica y el Caribe, el uso de invernaderos de baja tecnología, tampoco aseguran un microclima óptimo para la producción agrícola, puesto que para algunas horas del periodo diurno o nocturno, se generan condiciones de temperatura o humedad inadecuadas debido a fenómenos climático externos como son las heladas (Diaz et al., 2018; Flores-Velázquez et al., 2014; Villagrán & Bojacá, 2019). Así mismo la condición socioeconómica de los productores limitan el acceso a prácticas de alta tecnología, como lo es la climatización activa mediante, sistemas de calefacción, enfriamiento, deshumidificación e inyección de CO₂ (Gil et al., 2012; Villagran Munar et al., 2018).

Sin embargo, a nivel mundial incluso en los países desarrollados que promueven la implementación de la agricultura protegida mediante sistemas altamente tecnológicos, debido al aumento de los precios de los combustibles fósiles y las restricciones en las emisiones de CO₂, se están impulsando alternativas de climatización pasivas y

sostenibles, que puedan apoyar o sustituir los sistemas de calefacción convencionales, esto intentando garantizar la producción de alimentos bajo un concepto de sostenibilidad (Bazgaou et al., 2018, 2021; Flores-Velázquez et al., 2022).

Estos sistemas pasivos de climatización establecen su funcionamiento mediante el aprovechamiento de las principales fuentes de energías renovables, tales como la energía solar, eólica y geotérmica (Gourdo et al., 2019). Todos estos sistemas se combinan con el uso de materiales de cambio de fase o mediante la instalación de materiales de cubierta altamente eficientes en términos energéticos, así mismo la energía capturada puede ser almacenada mediante la construcción de muros pasivos de almacenamiento térmico o mediante la construcción de intercambiadores de calor tierra-aire o agua-aire (Ntinas et al., 2014). La implementación de estos sistemas permiten aumentar la temperatura nocturna en el interior de un invernadero en hasta 5°C o incluso reducir la temperatura en el día en hasta 3 °C, sin embargo la eficiencia de cada sistema debe ser evaluada en función del contexto local donde se pretende implementar (Reyes-Rosas et al., 2017; Villagrán-Munar & Bojacá-Aldana, 2019b).

Por lo tanto, el presente trabajo tiene como objetivo hacer una revisión de la producción científica desarrollada en la temática de sistemas de climatización mediante métodos pasivo y aplicada a invernaderos usados para la producción de alimentos. En este documento que es la segunda parte de la metodología de análisis se discutirán los principales aspectos técnicos encontrados en los documentos recopilados y publicados en la principales base de datos académica desde el año 2005 hasta el año 2021.

METODOLOGÍA

Para el desarrollo del este trabajo, se formuló una metodología de búsqueda organizada y estructurada (Figura 1), con el objetivo de realizar un análisis bibliométrico y técnico de la temática analizada, el análisis bibliométrico ya fue discutido en un documento publicado por Rocha et al. (2022) y en esta ocasión nos centraremos en el análisis técnico. La búsqueda estructura de información, fue utilizada para analizar los aspectos técnicos más relevantes entre los años 2005 y 2021, sobre climatización pasiva en invernaderos.

Figura 1: Metodología de la búsqueda organizada y estructurada empleada en el estudio



Los criterios de búsqueda y recopilación de datos incluyeron la selección de Scopus como base de datos científica, debido a que compila investigaciones a nivel internacional, brinda acceso a datos, métricas y herramientas analíticas confiables, con acceso a la información de forma versátil, lo que permite realizar estudios bibliométricos y técnicos del desarrollo científico en cualquier área de interés (Betancourt et al., 2013; Salinas-Velandia et al., 2022). Para la búsqueda se definieron 55 palabras clave, generando una ecuación que puede ser revisada en el trabajo recientemente publicado por Rocha et al. (2022).

ANÁLISIS TÉCNICO

En cuanto al análisis técnico, a partir de la lectura crítica de los documentos recopilados, se analizaron las particularidades y similitudes de cada estudio respecto a los parámetros característicos que responden a la descripción de los tipos de invernaderos, material de cubierta y área de los invernaderos, así mismo se discutió sobre los tipos de cultivos, variables de análisis y tipos de validación experimental desarrollados. Para este análisis se construyó una base de datos, mediante el uso del software Excel, donde se parametrizaron las características mencionadas anteriormente, permitiendo tener un panorama claro de las diferencias y similitudes entre los estudios recopilados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

DESCRIPCIÓN DE INVERNADERO

De acuerdo con el análisis técnico de los 397 documentos recopilados, se identificaron un total de 36 tipos de invernaderos (Tabla 1). De estos invernaderos se encontró que las tres estructuras más utilizadas correspondieron a; el tipo capilla reportado en 76 estudios, seguido por el invernadero tipo solar reportado en 73 estudios desarrollados en China y por último el invernadero tipo túnel con 32 reportes. De otro lado, también es importante resaltar que en 121 documentos no se reportó de forma gráfica o descrita el tipo invernadero utilizado.

Tabla 1. Principales tipologías de invernaderos reportadas en los estudios recopilados.

| Tipo de invernadero | Cantidad de documentos | Tipo de invernadero | Cantidad de documentos |
|---------------------|------------------------|---------------------------|------------------------|
| Capilla | 76 | Arco modificado | 1 |
| Solar Chino | 73 | Aro convencional | 1 |
| Túnel | 33 | Doble arco modificado | 1 |
| Solar asimétrico | 16 | Gótico multi-túnel | 1 |
| Venlo | 11 | Holandés | 1 |
| Diente de sierra | 8 | Multi-túnel | 1 |
| Canario | 5 | Raspa y amagado | 1 |
| De un solo vano | 5 | Parcialmente cerrado | 1 |
| Multi-vano | 5 | Parral | 1 |
| Cerrado | 3 | Solar hundido | 1 |
| Adosado | 3 | Monospan con muro lateral | 1 |
| Almería | 2 | Otras tipologías | 23 |
| Semi-solar | 2 | Sin reporte | 121 |

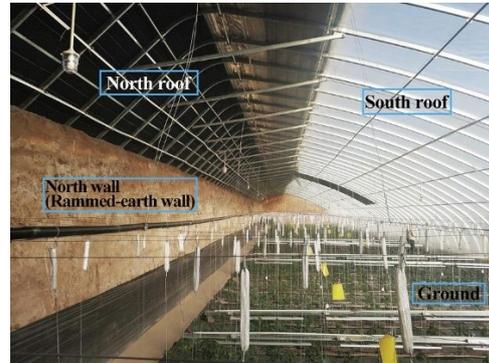
En la Figura 2, se muestran los 4 principales tipos de invernaderos reportados en los estudios recopilados, el invernadero tipo capilla, es una estructura que puede ser fabricada en cubierta de plástico o vidrio y presenta una forma de cubierta con pendiente a dos aguas (Bojaca et al., 2012). El invernadero solar chino es una estructura que se fabrica principalmente en plástico, con forma de cubierta semicircular o semi-elíptica y su principal factor diferencial, es la presencia de un muro de mampostería que sirve como un material de almacenamiento térmico que optimiza las condiciones micro climáticas del interior del invernadero (Xin Zhang et al., 2016). De otro lado el invernadero tipo túnel es una estructura que puede ser fabricada en un solo vano o con múltiples vanos adosados y es muy popular en la región del mediterráneo y por último esta el invernadero

tipo venlo que es una estructura que se fabrica con vidrio como material de cubierta principal y cerramiento, esta tipología de invernadero es usada principalmente en países de Europa central, Corea y China (Rocha et al., 2021).

Figura 2. Invernadero tipo capilla (izquierda superior): invernadero solar chino (derecha superior); Invernadero tipo túnel (izquierda inferior)



Tipo Capilla (C.-G. Lee et al., 2021)



Tipo Solar implementado en China (X. Zhang et al., 2019)



Tipo Túnel (Firfiris et al., 2020)



Tipo Venlo (Rasheed et al., 2021)

Así mismo se encontró que el tipo de material de cubierta mayormente utilizado en las estructuras es el plástico, el cual fue reportado en un total de 175 estudios (Tabla 2). Este material es bastante usado a nivel mundial debido a su flexibilidad y versatilidad lo cual permite cubrir grandes superficies de suelo con estructuras simples y de bajo costo (Villagrán-Munar & Bojacá-Aldana, 2019a; E. Villagrán et al., 2021). En una segunda línea se encontró al vidrio como material de cubierta y cerramiento, este material predomina en los países de Europa central y a diferencia del plástico requiere de estructuras de invernadero más robustas, por lo tanto se requiere de una mayor inversión inicial (Villagrán-Munar & Bojacá-Aldana, 2020). Aunque en términos energéticos este material de cubierta tiene mayor eficiencia térmica (Baeza & Kacira, 2017).

Tabla 2. Materiales de cubierta usados en los invernaderos.

| Material de cubierta | Cantidad de documentos |
|---|------------------------|
| Plástico | 176 |
| Vidrio | 56 |
| Plástico y Vidrio | 20 |
| Plástico reforzado con vidrio | 7 |
| Plástico reforzado con fibra de vidrio | 1 |
| Plástico, Vidrio Y Fibra de vidrio | 1 |
| Celdas fotovoltaicas policristalinas | 2 |
| Celdas solares basadas en plástico semitransparente | 1 |

Por último, en menores proporciones, se encontraron estructuras donde se combina el vidrio con el plástico como material de cubierta y cerramiento (Tabla 2), esto quizás como una alternativa de reducir costos y de fabricación del invernadero, buscando además obtener los múltiples beneficios del vidrio, dentro de los que cabe mencionar, su foto estabilidad en el tiempo y su nula transmisión de la radiación térmica en las horas de la noche, lo que permite una mayor estanqueidad de la energía almacenada en el interior del invernadero durante el día o una mayor eficiencia energética de los sistema de calefacción implementados (Flores-Velazquez et al., 2019). Así mismo se identificaron 3 estudios donde se usan materiales de cubierta, como lo son las celdas fotovoltaicas policristalinas y las celdas fotovoltaicas estructuradas sobre los plásticos semitransparentes. Este tipo de materiales de cubierta se han venido convirtiendo en una estrategia prometedora para lograr una producción de alimentos más sostenible, permitiendo la integración de la electricidad fotovoltaica con los sistemas agrícolas, esta tendencia tecnológica es conocida nivel mundial se conocen como sistemas agrovoltaicos (Waller et al., 2022).

En cuanto al tamaño del invernadero, 135 documentos no reportaron el área cubierta de la estructura (Tabla 3). Sin embargo, los documentos restantes permitieron identificar que en 193 documentos se implementaron invernaderos pequeños con áreas menores a 500 m², 50 con invernaderos medianos, con áreas entre 500 y 5.000 m² y 22 estudios de invernaderos con áreas superiores. Por su parte, 9 documentos reportaron el uso de hasta 4 invernaderos, permitiendo evaluar la variación de características propias de las estructuras, como área, tipo y material de cubierta.

Tabla 3. Área de los invernaderos usados en los estudios recopilados.

| Tamaño de invernadero (m ²) | Cantidad de documentos |
|---|------------------------|
| Menor de 500 | 193 |
| Entre 500 y 5.000 | 50 |
| Superior a 5.000 | 17 |
| Varios tamaños | 2 |

En Corea se evaluó a través de la modelación, 4 tipos de invernaderos medianos, 2 de tipo multitúnel cubiertos con plástico, un venlo y un multitúnel cada uno con cubierto vidrio, los resultados permitieron concluir que los de tipo multitúnel y venlo de cubierta de vidrio presentaron valores de carga de energía de calefacción similares, pero el multitúnel de cubierta plástica requiere de 10% más de energía que los invernaderos anteriormente mencionados (Ha et al., 2011).

SISTEMAS DE CLIMATIZACIÓN Y OPTIMIZACIÓN MICROCLIMÁTICA

Los sistemas de climatización pasiva evaluados en los documentos recopilados incluyen el aprovechamiento de fuentes de energías alternativas y sostenibles como; solar, geotérmica, biomasa, eólica, biogás e hidráulica. Dentro de los documentos recopilados los colectores solares, corresponden al sistema más evaluado, con un total de 69 investigaciones, seguido por los paneles solares fotovoltaicos con 41, las bombas de calor geotérmicas con 37, los materiales de cambio de fase con 35, el almacenamiento geotérmico con 31, el intercambiador de calor tierra-aire con 25, bombas de calor de múltiples fuentes 22, calderas de biomasa y muros colectores con 19 cada una y las cortinas o mantas térmicas, con 14 investigaciones. En las publicaciones recientes, se complementa la captación de la energía con sistemas de almacenamiento para su posterior aprovechamiento en el momento oportuno.

Dentro de la energía solar, es necesario diferenciar el uso dado a esta, por una parte, se utiliza para la generación de electricidad por medio de paneles fotovoltaicos (FV) y, por otra parte, la energía térmica (T) captada a través del uso de colectores solares; aunque en otros estudios recopilados, se evaluaron dispositivos que relacionan ambas formas de aprovechamiento. Por ejemplo, Hosseini-Fashami et al. (2019), en su estudio desarrollado en Irán, concluyó que el uso de FV permiten que la producción de fresa sea sostenible y que la eficiencia de los sistemas FV/T es menor que los sistemas FV, debido principalmente a las condiciones del clima templado del área de estudio. Otra alternativa propuesta fue considerar los paneles fotovoltaicos en un sistema de persianas en el techo

del invernadero, lo que permitió obtener una distribución de temperaturas e irradiación más homogénea en el interior del invernadero, lo que se tradujo en un aumento del rendimiento de la producción (Vadiee et al., 2016). Por su parte, en investigaciones que emplean los colectores solares reportan que su uso potencializa la producción en regiones donde predominan las temperaturas bajas durante todo el año, aunque bajo condiciones críticas con temperaturas de ambiente exterior inferiores a 5°C se deben incluir más colectores solares, y aumentar el tamaño del almacenamiento de agua caliente, para ofrecer un microclima adecuado para la producción (López-Díaz et al., 2018).

En cuanto a la energía geotérmica, esta suele ser aprovechada mediante la implementación de bombas de calor geotérmicas, que pueden ser tierra – aire o tierra-agua. Otro método de aprovechamiento, son los intercambiadores de calor subterráneos, empleados generalmente para el almacenamiento térmico combinados con suelos radiantes. Su implementación ha generado resultados satisfactorios especialmente para invernadero donde se cultivan frutas, verduras y flores, permitiendo obtener ahorros en costos y mejoras en producción. Es importante mencionar que en algunas regiones estos sistemas deben ser analizados ambientalmente, puesto que algunos autores, han cuestionado si el almacenamiento térmico es una fuente de energía renovable y sostenible, ya que, en el caso específico de una isla volcánica, se ha planteado la posibilidad de que los sistemas geotérmicos, sean responsables de la contaminación de las aguas subterráneas y hundimientos en el suelo por falla estructural debido a la sobreexplotación de los acuíferos (J.-Y. Lee & Choi, 2012).

Otra de las alternativas explorada por los investigadores, es el aprovechamiento de la energía eólica, con la cual se calienta agua a través de agitadores mecánicos eólicos. Esta agua caliente posteriormente es recirculada a un piso radiante ubicado en el suelo del invernadero, logrando incrementar los niveles de temperatura en el interior del invernadero, garantizando el desarrollo de los cultivos, un aumento de rendimiento y calidad de los productos cosechados y finalmente se logra una mejora de los ingresos de los productores, optimizando los tiempos de producción y reduciendo los costos de operación (Ma, 2019).

Otra de las tendencias identificadas corresponde a las tecnologías de almacenamiento de energía térmica (TES) como complemento a los sistemas de captación, debido a que

permiten un mayor control sobre la temperatura interna, mayor rendimiento, cosechas más prolongadas, ahorros de energía y mejores condiciones de trabajo; todo lo anterior permite tener sistemas de producción bajo invernadero más rentables con mayores capacidades de producción de forma económica y sostenible. Dentro de las TES se encuentra el almacenamiento subterráneo de energía térmica (UTES), que se ha estudiado principalmente en acuíferos y pozos profundos; los materiales de cambio de fase (PCM) (Paksoy & Beyhan, 2015). Las TES, son una alternativa técnicamente viable y de gran importancia, especialmente para ser usadas en climas con grandes diferencias entre la temperatura del diaria y nocturna (Haldorai et al., 2019).

Los sistemas de almacenamiento térmico pueden basar su funcionamiento en el principio de calor sensible o latente. Los lechos de roca, ladrillo, concreto y agua son algunos ejemplos de materiales usados para el almacenamiento de calor sensible, mientras que la parafina, sal de Glauber y los materiales de cambio de fase orgánicos e inorgánicos corresponden a materiales de almacenamiento de calor latente, pues estos almacenan calor en el cambio de fase de sólido a líquido, calor que posteriormente se libera al ambiente del invernadero al solidificarse o congelarse (Haldorai et al., 2019; Sethi & Sharma, 2008).

De acuerdo con la aplicación, los TES se pueden clasificar en sistemas de calefacción o sistemas de enfriamiento, entre los primeros, se cuentan el almacenamiento en agua, lecho de roca, PCM, y aislamiento, con el uso de cortinas o pantallas térmicas y variaciones en los materiales de cobertura. Mientras que, entre los sistemas de enfriamiento se emplea la ventilación natural o forzada, la sombra o reflexión y sistemas por evaporación como las almohadillas o la nebulización. Cabe destacar que el almacenamiento en acuíferos y pozos se ha implementado con ambos fines de aplicación (Sethi & Sharma, 2008)

El agua subterránea también es usada para realizar prácticas de enfriamiento y calefacción de ambientes de producción agrícola como es el caso de los invernaderos, su uso está ligado a la temperatura constante del fluido la cual está relacionada con la temperatura media de la ubicación geográfica; su implementación requiere poca energía y sus resultados implican ahorros energéticos considerables. Cuando su uso no es posible, se suele optar por el almacenamiento en pozos con intercambiadores de calor, empleando líquidos que pueden contener anticongelantes (Paksoy & Beyhan, 2015),

Tanto los sistemas de acuíferos como los de pozos, permiten un almacenamiento térmico prolongado y usan intercambiadores de calor para efectuar la transferencia térmica al invernadero para lograr el aumento o reducción de la temperatura [56].

Los invernaderos solares implantados en china se caracterizan por poseer un muro norte, el cual convencionalmente se construye en arcilla, sin embargo, recientes investigaciones han evaluado el cambio o complementación con diferentes materiales, a fin de mejorar las capacidades de almacenamiento de este y usarlo como herramienta pasiva para el control climático, por ejemplo, al reemplazar los muros convencionales por muros de paja, se logró aumentar el almacenamiento térmico y el índice de inercia térmica, elevando la temperatura interior de un invernadero en 2°C, logrando reducir el consumo de energía y las emisiones de CO₂ asociadas a labores de climatización (J. Zhang et al., 2017).

Los PCM, suelen implementarse como complemento a los sistemas de calefacción, pues se recomienda su ubicación cerca al condensador y al evaporador de las bombas de calor, en los colectores solares y en los UTES, para mitigar picos de transferencia cuando se emplean en almacenamientos prologados, que puede ser estacional y no a corto plazo, así como en los materiales de cobertura y empaquetados cerca de las plantas, como control de temperatura y protección frente a heladas (Paksoy & Beyhan, 2015).

Para el almacenamiento de energía térmica en tanques de agua, se debe considerar el aislamiento de estos, por lo que se han evaluado diferentes materiales e incluso se ha considerado enterrarlos o limitar sus colores a negro y gris oscuro para capturar mayor cantidad de energía solar. Su implementación es bastante común, ya que permiten la captación del agua lluvia, se logra aumentar la masa térmica, generando un ahorro de energía y su consecuente reducción de los costos de calefacción (Kwag & Krarti, 2012). Una variación de esta metodología es el almacenamiento de energía térmica en cortinas de agua, su implementación se ha realizado en la producción de tomate Cherry, donde los beneficios micro climáticos obtenidos permitieron reducir el ciclo de cultivo en 20 días calendario sin afectar los rendimientos por planta (Y. Zhang et al., 2012).

También es importante mencionar que la implementación de pantallas térmicas en algunas regiones tropicales es adecuada y puede disminuir el uso de los combustibles fósiles en hasta un 58%, la optimización microclimática por su lado permite disminuir la presencia de enfermedades como la Botritis y el tizón tardío, e incluso para algunos

periodos del año no es necesario incurrir en la quema de combustibles fósiles para adelantar labores de calefacción del invernadero (Taki et al., 2016).

Para finalizar este apartado se debe mencionar que las tecnologías recientes implementadas para el almacenamiento de la energía solar se apoyan en la producción de hidrogeno (H_2), para la activación de una bomba de calor geotérmica como complemento a la energía fotovoltaica (Blanco et al., 2014). Todas estas tendencias de desarrollo para climatización de invernaderos han permitido que a nivel mundial existan invernaderos autosuficientes con generación de energía a través de diversas metodologías (Paksoy & Beyhan, 2015).

VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DE METODOS DE CLIMATIZACION PASIVOS.

Se realizó un análisis de diferentes componentes de los estudios como son las variables utilizadas y el tipo de validación realizada en los ensayos experimentales, se logró identificar que 231 estudios, realizaron validación experimental de estos 76 se enfocaron en el análisis a partir de la modelación y simulación computacional por diferentes metodologías. En las validaciones experimentales, la validación mediante determinación de la temperatura fue considerada en 204 de las investigaciones estudiadas, seguida por la radiación solar con 146, la humedad relativa con 91, y en menor medida la velocidad del viento con 61 reportes en los estudios recopilados.

La radiación representa la energía emitida por el sol, siendo una variable de gran importancia en diferentes tipos de estrategias de climatización, así como en el manejo diario de los cultivos (Flores-Velazquez et al., 2022). Esta variable por su disponibilidad tiene influencia en el aprovechamiento de diversas fuentes de energía, pero principalmente en el aprovechamiento de la energía solar. Así mismo en el aprovechamiento de la energía eólica, ya que las corrientes de viento son el resultado de diferencias de presiones y temperaturas generadas por la radiación solar. Por último, la radiación también impacta sobre el aprovechamiento de la energía geotérmica, ya que esta la radiación influye en la temperatura del suelo, temperatura que puede limitar o potencializar la optimización microclimática que puede obtenerse de fuentes geotérmicas (Sepúlveda, 2014).

En los procesos de validación de los estudios recopilados, se identificó que en algunos se presta un total interés en el contenido de humedad de aire. En un estudio donde se aumentó la temperatura en 3°C, se demostró que es posible reducir en 10% la humedad

relativa del aire del invernadero aun con la presencia de cultivo, esta optimización del ambiente permitió incrementar en 35% la producción de tomate y a su vez se generó una disminución de plagas y enfermedades; estas dos últimas, atribuidas principalmente a la disminución de humedad (Gourdo et al., 2019).

Finalmente, en la mayoría de los casos la temperatura, fue la variable de mayor interés experimental en las investigaciones. Chen et al. (2018), implementó un muro de ventilación activo-pasivo con PCM, como una solución para aumentar la capacidad de almacenamiento de calor, los resultados mostraron que es posible aumentar la temperatura del aire interior del invernadero hasta en 4.16°C y la temperatura del suelo en 1.09°C, lo que se tradujo en un incremento en el rendimiento del 28% y se redujo el ciclo de cultivo en aproximadamente en 15 días.

VALIDACION EXPERIMENTAL CON EL PRESENCIA DE CULTIVO

Se logro identificar en los documentos recopilados, que 213 estudios tuvieron en cuenta la presencia del cultivo en sus investigaciones, dentro de los cuales, 148 reportaron el cultivo empleado; destacándose el cultivo de Tomate, el cual fue evaluado en 52 publicaciones. En cuanto a las hortalizas estas representan el tipo de cultivo que más se evaluó con 110 documentos, seguidos por frutas y ornamentales con 60 y 21 documentos respectivamente. Es importante mencionar que también hubo investigaciones donde se reportaron, cultivos de cereales, leguminosas, aromáticas, hongos, algodón e incluso plantas leñosas.

Considerar los cultivos dentro de este tipo de estudios es de gran importancia, pues se ha demostrado que los cultivos modifican las necesidades energéticas del invernadero (Chahidi et al., 2021), siendo necesario conocer a fondo los mecanismos involucrados en la transpiración, a fin de estimar su tamaño e influencia en el consumo de energía (Nimmermark, 2015). Se ha demostrado que el sombreado no es suficiente para mantener los niveles de temperatura y presión de vapor adecuada para los cultivos, aunque existe un valor óptimo para cada cultivo, que depende no sólo de las condiciones climáticas, si no las características del invernadero y otras variables; por ejemplo, el 35% de sombra puede mejorar los niveles de producción del tomate en Grecia, sin embargo, un valor superior o inferior se refleja en la cantidad de frutos recién formados y abortados, pues a una cantidad excesiva de luz causa fotoinhibición que promueve la fotooxidación del cloroplasto afectando el crecimiento de la planta y por ende la

producción y la limitación de la luz excesiva reduce la fotosíntesis, generando un desbalance entre la oferta de las plantas y la demanda de las flores y frutos de los recursos vegetales como el carbono (Kitta et al., 2012).

Así mismo, se identificó que la implementación de bombas de calor aire-aire para la refrigeración en verano en invernaderos pequeños, afecta a las plantas debido a escapes de aire a bajas temperaturas, aproximadamente 8°C, emitidos durante las horas de la tarde que siguieron a los días cálidos, evidenciando daños del 23% de los tallos y obteniendo rendimientos inferiores al 50% con respecto al invernadero enfriado con ventilación natural con ventanas en el techo (Auce et al., 2021).

Por otro lado, la utilización de un sistema adecuado de climatización puede llevar a mejoras significativas, como en el caso de la utilización de un invernadero de doble efecto desarrollado en china, con una manta térmica entre dos capas y una placa sándwich de policarbonato transparente en la mitad del techo y pared trasera, para conservar la energía en el periodo nocturno, complementado con un sistema de bomba de calor de energía solar con colectores solares de tipo bolsa y cortina de agua modulares y almacenamiento en piscina; sistema con el que se controla la temperatura y humedad del invernadero. Se evaluó el sistema con mediciones de temperatura mínima, temperatura promedio, intensidad de luz, humedad relativa, y rendimientos por área y por planta; los resultados demostraron que el sistema logró mantener una temperatura mínima de 12.5°C y una humedad relativa inferior al 80%, incrementó la temperatura promedio en 3.8°C con respecto al invernadero de referencia y la calidad de los productos y el rendimiento de las hortalizas hasta 55% en la producción por unidad de área; finalmente se recomienda este invernadero para zonas similares al norte de china pues mejoró las condiciones microclimáticas, disminuyendo las enfermedades y las pérdidas por frío, a la vez que aumenta la producción y los ingresos (Qiu et al., 2014).

De forma similar, recientemente se evaluó la efectividad de un invernadero tipo túnel, pequeño, con suelo radiante, para lo cual se recolectó energía solar y se almacenó a 1 m de profundidad en una tubería de 110 mm de diámetro; logrando mantener el invernadero a temperaturas entre 3-35 °C lo que permito realizar una plantación más temprana de las hortalizas al no depender de las condiciones climáticas externas, y una prolongación de la vida de las plantas debido a un uso eficiente de la Radiación Fotosintéticamente Activa (PAR), con una temperatura adecuada al nivel de la planta se

reflejó en el aumento de rendimientos y buena calidad de las hortalizas (Belov et al., 2020). Así mismo, en otra investigación se concluyó que la producción de hortalizas en invernaderos con colectores solares puede ser más sostenible con respecto a invernaderos convencionales, debido a que se presentan ahorros en energía, agua, fertilizantes y emisiones de CO₂, con mejores rendimientos comercializables, asociados a una mayor concentración de CO₂, por la naturaleza semicerrada del invernadero, además con mejoras en la huella de carbono, incluso con valores negativos, al considerar el exceso de energía captada como energía de exportación (Georgios K Ntinis et al., 2020).

En la investigación de Sellami et al. (2019), cuyo objetivo fue comparar la producción del tomate en un invernadero pequeño empleando un calentador de aire solar con almacenamiento latente (SAHLS) con una bomba de calor geotérmica con intercambiador de calor (GSHP). Para esta comparación tomaron mediciones de altura y diámetro del tallo, fechas de floración, número de inflorescencias y flores, así como la fecha de madurez y la calidad de los frutos en función del peso. Como resultado se obtuvo que el SAHLS proporcionó un microclima adecuado para el crecimiento y desarrollo del cultivo logrando una producción de calidad con rendimiento óptimo 2 semanas antes con respecto al sistema GSHP, pues el intercambiador de calor limitó el crecimiento del cultivo, al interferir con la luminosidad. Así mismo, al implementar el muro de tres capas a través de simulaciones y con validación experimental con alta concordancia, se determinó que el almacenamiento térmico con el uso de materiales de cambio de fase mejora el ambiente térmico del invernadero, incrementando el rendimiento por metro cuadrado en 71.4 %, el diámetro, la longitud, el peso y la cantidad de frutas producidas (Guan et al., 2015).

También se estudió un sistema de colector solar con sistema de almacenamiento subterráneo a través de tuberías en "U", en la producción de arándanos en un invernadero pequeño, concluyendo que su implementación, dio como resultado una producción 120% más alta y un precio en 50-100% más alto, debido a la influencia de la temperatura en la producción y en la floración, debido a que las plantas en el invernadero controlado pueden llegar a florecer hasta 2 meses antes, llegando al mercado con valores por encima de los correspondientes a las fechas de producción cotidianas (L. Zhang et al., 2015). De igual forma se mejoraron los rendimientos, siendo superiores a 11.550 kg/hm²

y se estabilizó la calidad, excediendo el 80% de alta calidad de las cerezas dulces al implementar un sistema de horno de calefacción de leña complementado con el aprovechamiento de energía solar en un suelo radiante, se logra mantener la temperatura óptima para aumentar y estabilizar una alta calidad de los frutos y debido a su funcionamiento semiautomático disminuye significativamente la intensidad de trabajo (D. Zhang et al., 2014).

Por otro lado, se investigó la implementación de un sistema fotovoltaico que genera energía eléctrica de 6288 kWh/año, siendo suficiente para satisfacer las necesidades energéticas del invernadero, adicionalmente al incluir un sistema de enfriamiento en el área fotovoltaica al instalar el cultivo a 1 m de altura, se mejora la productividad de los hongos, debido a la baja radiación solar, pues la intensidad de la luz tiene efecto en el diámetro del sombrero, la altura del tallo de las setas y el peso, a la vez que se garantizaron las condiciones de temperatura y humedad óptimas para la producción (Kolaly et al., 2020).

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este trabajo permiten concluir que a nivel mundial los sistemas de producción de alimentos bajo invernadero están enfocados en tendencias permanentes que buscan el aprovechamiento de las energías renovables, para optimizar el microclima generado en el interior de las estructuras y la generación de energía limpia para otras actividades, esto en conjunto ayudara a mejorar la sostenibilidad de estos sistemas de producción.

El aprovechamiento de la energía solar es una de las fuentes energéticas mayormente aplicadas en estrategias de climatización pasiva usados en invernaderos de cubierta plástica y de vidrio. Seguidos de esta alternativa se encuentran las alternativas basadas en energía geotérmica y eólica o un conjunto de todas estas fuentes energéticas, que en países tropicales pueden ayudar a reducir el uso de combustibles fósiles asociados a labores de climatización de invernaderos en hasta un 58%.

La implementación de sistemas de climatización pasiva en invernaderos puede ayudar a optimizar las condiciones de temperatura y humedad relativa generando un aumento de hasta el 35% de la producción de tomate, así mismo el control de las condiciones de micro climáticas ayudan a limitar la aparición de plagas y enfermedades, por lo tanto, se promueve la producción limpia de alimentos.

Por último, es importante mencionar que este trabajo de revisión es una base técnica relevante tanto para el grupo de investigación que desarrollo este trabajo y algunos otros grupos de Latinoamérica, puesto que en este documento se compilan los principales avances técnicos que ha tenido la climatización pasiva de invernaderos y sus beneficios técnicos y ambientales.

AGRADECIMIENTOS.

Los autores agradecen a la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria—AGROSAVIA por el apoyo técnico en la realización de esta investigación. Este estudio fue financiado por el Ministerio de Ciencia Tecnología e Innovación de Colombia—Minciencias a través del proyecto denominado “*Fortalecimiento de las capacidades de I + D + i del centro de investigación Tibaitatá para la generación, apropiación y divulgación de nuevo conocimiento como estrategia de adaptación al cambio climático en sistemas de producción agrícola ubicados en las zonas agroclimáticas del trópico alto colombiano*”.

LISTA DE REFERENCIAS

- Akrami, M., Javadi, A. A., Hassanein, M. J., Farmani, R., Dibaj, M., Tabor, G. R., & Negm, A. (2020). Study of the effects of vent configuration on mono-span greenhouse ventilation using computational fluid dynamics. *Sustainability (Switzerland)*. <https://doi.org/10.3390/su12030986>
- Auce, A., Jermuss, A., Rucins, A., Ivanovs, S., & Grinbergs, U. (2021). Study of the Distribution of Air Temperature in a Greenhouse Heated By Air to Air Heat Pump. *ENVIRONMENT. TECHNOLOGIES. RESOURCES. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, 1*, 17–22.
- Baeza, E. J., & Kacira, M. (2017). Greenhouse technology for cultivation in arid and semi-arid regions. *Acta Horticulturae*, 1170, 17–29. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2017.1170.2>
- Baxevanou, C., Fidaros, D., Bartzanas, T., & Kittas, C. (2010). Numerical simulation of solar radiation, air flow and temperature distribution in a naturally ventilated tunnel greenhouse. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 12(3–4), 48–67. <http://www.cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/1643>
- Bazgaou, A., Fatnassi, H., Bouharroud, R., Ezzaeri, K., Gourdo, L., Wifaya, A., Demrati, H., Elame, F., Carreño-Ortega, Bekkaoui, A., Aharoune, A., & Bourden, L. (2021). Effect of active solar heating system on microclimate, development, yield and fruit quality

- in greenhouse tomato production. *Renewable Energy*.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.11.007>
- 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*.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.10.027>
- Belov, V. V., Belov, E. L., & Sharonova, T. V. (2020). Evaluation of the effectiveness of a helio-greenhouse with soil heating. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 604(1), 12021.
- Betancourt, K. G., de Zayas Pérez, M. R., & Guitián, M. V. G. (2013). Análisis bibliométrico de las publicaciones relacionadas con proyectos de innovación y su gestión en Scopus, en el período 2001-2011. *Revista Cubana de Información En Ciencias de La Salud (ACIMED)*, 24(3), 281–294.
- Blanco, I., Pascuzzi, S., Anifantis, A. S., & Scarascia-Mugnozza, G. (2014). Study of a pilot photovoltaic-electrolyser-fuel cell power system for a geothermal heat pump heated greenhouse and evaluation of the electrolyser efficiency and operational mode. *Journal of Agricultural Engineering*, 45(3), 111–118.
- Bojaca, C.R., Monsalve, O., Casilimas. H., Villagran, E.A., Gil, R. , Arias, L.A., Fuentes, L. E. (2012). *Manual de producción de pimenton bajo invernadero* (2012th ed.). http://avalon.utadeo.edu.co/servicios/ebooks/manual_pimenton/files/assets/common/downloads/Manual de producci.pdf
- Chahidi, L. O., Fossa, M., Priarone, A., & Mechaqrane, A. (2021). Energy saving strategies in sustainable greenhouse cultivation in the mediterranean climate—A case study. *Applied Energy*, 282, 116156.
- Chen, C., Ling, H., Zhai, Z. J., Li, Y., Yang, F., Han, F., & Wei, S. (2018). Thermal performance of an active-passive ventilation wall with phase change material in solar greenhouses. *Applied Energy*, 216, 602–612.
- Diaz, D. C., Bojacá, C. R., & Schrevens, E. (2018). Modeling the suitability of the traditional plastic greenhouse for tomato production across Colombian regions. *Acta Horticulturae*. <https://doi.org/10.17660/actahortic.2018.1205.109>
- El Kolaly, W., Ma, W., Li, M., & Darwesh, M. (2020). The investigation of energy

- production and mushroom yield in greenhouse production based on mono photovoltaic cells effect. *Renewable Energy*, 159, 506–518.
- Firfiris, V. K., Fragos, V. P., Kotsopoulos, T. A., & Nikita-Martzopoulou, C. (2020). Energy and environmental analysis of an innovative greenhouse structure towards frost prevention and heating needs conservation. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 40. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100750>
- Flores-Velazquez, J., Akrami, M., & Villagrán, E. (2022). The Role of Radiation in the Modelling of Crop Evapotranspiration from Open Field to Indoor Crops. *Agronomy*, 12(11), 2593.
- Flores-Velázquez, J., Villarreal-Guerrero, F., Rojano-Aguilar, A., & Rojano, F. (2014). Greenhouse air dynamics in foliage. *Acta Horticulturae*, 1037, 1035–1042. <https://doi.org/10.17660/actahortic.2014.1037.136>
- Flores-Velazquez, J., Villarreal-Guerrero, F., Rojano-Aguilar, A., & Schdmith, U. (2019). CFD to analyze energy exchange by convection in a closed greenhouse with a pipe heating system. *Acta Universitaria*. <https://doi.org/10.15174/au.2019.2112>
- Flores-Velázquez, Jorge, Rojano, F., Aguilar-Rodríguez, C. E., Villagran, E., & Villarreal-Guerrero, F. (2022). Greenhouse Thermal Effectiveness to Produce Tomatoes Assessed by a Temperature-Based Index. *Agronomy*, 12(5), 1158.
- Gil, R., Bojacá-Aldana, C. R., Casilimas, H., Schrevens, E., & Suay, R. (2012). Assessment of sidewall and roof vents opening configurations to improve airflow inside greenhouses. *Acta Horticulturae*, 952, 141–146. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.952.16>
- Gourdo, L., Fatnassi, H., Bouharroud, R., Ezzaeri, K., Bazgaou, A., Wifaya, A., Demrati, H., Bekkaoui, A., Aharoune, A., Poncet, C., & Bouirden, L. (2019). Heating canarian greenhouse with a passive solar water–sleeve system: Effect on microclimate and tomato crop yield. *Solar Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.07.004>
- Guan, Y., Chen, C., Han, Y., Ling, H., & Yan, Q. (2015). Experimental and modelling analysis of a three-layer wall with phase-change thermal storage in a Chinese solar greenhouse. *Journal of Building Physics*. <https://doi.org/10.1177/1744259114526350>
- Ha, T., Lee, I., Hwang, H., Hong, S. W., Seo, I., & Bitog, J. P. (2011). Development of an Assessment Model for Greenhouse Using Geothermal heat pump system. 2011

Louisville, Kentucky, August 7-10, 2011, 1.

- Haldorai, S., Gurusamy, S., & Pradhapraj, M. (2019). A review on thermal energy storage systems in solar air heaters. *International Journal of Energy Research*, 43(12), 6061–6077.
- Hosseini-Fashami, F., Motevali, A., Nabavi-Pelesaraei, A., Hashemi, S. J., & Chau, K. (2019). Energy-Life cycle assessment on applying solar technologies for greenhouse strawberry production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 116, 109411.
- Kitta, E., Katsoulas, N., & Savvas, D. (2012). Shading effects on greenhouse microclimate and crop transpiration in a cucumber crop grown under Mediterranean conditions. *Applied Engineering in Agriculture*, 28(1), 129–140.
- Kwag, B. C., & Krarti, M. (2012). Energy Efficiency Design Strategies for Greenhouse in Colorado. *Energy Sustainability*, 44816, 111–117.
- Lee, C.-G., Cho, L.-H., Kim, S.-J., Park, S.-Y., & Kim, D.-H. (2021). Comparative analysis of combined heating systems involving the use of renewable energy for greenhouse heating. *Energies*, 14(20). <https://doi.org/10.3390/en14206603>
- Lee, J.-Y., & Choi, H.-M. (2012). Use of underground air for a heating and cooling energy source on Jeju Volcanic Island of Korea. *International Journal of Green Energy*, 9(7), 597–611.
- López-Díaz, J. H., Fitz-Rodríguez, E., & Rosales-Vicelis, J. E. (2018). Evaluation of heat-pipe solar collectors for heating a single-span greenhouse. *2018 ASABE Annual International Meeting*, 1.
- Ma, J. (2019). Direct wind heating greenhouse underground heating system. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 300(4), 42056.
- Nimmermark, S. (2015). Measured energy use in a greenhouse with tomatoes compared to predicted use by a mechanistic model including transpiration. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*.
- Ntinis, G. K., Fragos, V. P., & Nikita-Martzopoulou, C. (2014). Thermal analysis of a hybrid solar energy saving system inside a greenhouse. *Energy Conversion and Management*. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.02.058>
- Ntinis, Georgios K, Dannehl, D., Schuch, I., Rocks, T., & Schmidt, U. (2020). Sustainable greenhouse production with minimised carbon footprint by energy export. *Biosystems Engineering*, 189, 164–178.

- Paksoy, H. Ö., & Beyhan, B. (2015). Thermal energy storage (TES) systems for greenhouse technology. In *Advances in thermal energy storage systems* (pp. 533–548). Elsevier.
- Qiu, Z., Song, M., Wang, J., Zhang, X., Liu, H., Meng, T., & Song, Y. (2014). Experiment effect of application to new assembly type solar double effect greenhouse. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, *30*(19), 232–239.
- Rasheed, A., Na, W. H., Lee, J. W., Kim, H. T., & Lee, H. W. (2021). Development and validation of air-to-water heat pump model for greenhouse heating. *Energies*, *14*(15), 1–22. <https://doi.org/10.3390/en14154714>
- Reyes-Rosas, A., Molina-Aiz, F. D., Valera, D. L., López, A., & Khamkure, S. (2017). Development of a single energy balance model for prediction of temperatures inside a naturally ventilated greenhouse with polypropylene soil mulch. *Computers and Electronics in Agriculture*. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.08.020>
- Rocha, G. A. O., Medina, A. N. C., Arias, L. G., Caita, J. F. A., & Villagran, E. (2022). Análisis sobre la actividad científica referente a las estrategias de climatización pasiva usada en invernaderos: Parte 1: Análisis bibliométrico. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, *6*(5), 4596–4623.
- Rocha, G. A. O., Pichimata, M. A., & Villagran, E. (2021). Research on the Microclimate of Protected Agriculture Structures Using Numerical Simulation Tools: A Technical and Bibliometric Analysis as a Contribution to the Sustainability of Under-Cover Cropping in Tropical and Subtropical Countries. *Sustainability 2021, Vol. 13, Page 10433*, *13*(18), 10433. <https://doi.org/10.3390/SU131810433>
- Rojas-Rishor, A., Flores-Velazquez, J., Villagran, E., & Aguilar-Rodríguez, C. E. (2022). Valuation of Climate Performance of a Low-Tech Greenhouse in Costa Rica. *Processes*, *10*(4), 693.
- Salinas-Velandia, D. A., Romero-Perdomo, F., Numa-Vergel, S., Villagrán, E., Donado-Godoy, P., & Galindo-Pacheco, J. R. (2022). Insights into Circular Horticulture: Knowledge Diffusion, Resource Circulation, One Health Approach, and Greenhouse Technologies. In *International Journal of Environmental Research and Public Health* (Vol. 19, Issue 19). <https://doi.org/10.3390/ijerph191912053>
- Sellami, D., Boughanmi, H., Bouadila, S., Ghorbel, A., & Salem-Fnayou, A. Ben. (2019). Comparative study of the performance of two greenhouse heating techniques: Solar air heater and heat pump. *Heat Transfer Research*, *50*(12).

- Sepúlveda, S. (2014). Radiación solar: Factor clave para el diseño de sistemas fotovoltaicos. *Mundo FESC*, 4(8), 60–65.
- 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>
- Taki, M., Ajabshirchi, Y., Ranjbar, S. F., Rohani, A., & Matloobi, M. (2016). Modeling and experimental validation of heat transfer and energy consumption in an innovative greenhouse structure. *Information Processing in Agriculture*. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2016.06.002>
- Tanny, J., Lukyanov, V., Neiman, M., Cohen, S., Teitel, M., & Seginer, I. (2018). Energy balance and partitioning and vertical profiles of turbulence characteristics during initial growth of a banana plantation in a screenhouse. *Agricultural and Forest Meteorology*. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.02.028>
- Vadiee, A., Yaghoubi, M., Martin, V., & Bazargan-Lari, Y. (2016). Energy analysis of solar blind system concept using energy system modelling. *Solar Energy*, 139, 297–308.
- Villagrán-Munar, E. A., & Bojacá-Aldana, C. R. (2019a). CFD simulation of the increase of the roof ventilation area in a traditional Colombian greenhouse: Effect on air flow patterns and thermal behavior. *International Journal of Heat and Technology*, 37(3), 881–892. <https://doi.org/10.18280/ijht.370326>
- Villagrán-Munar, E. A., & Bojacá-Aldana, C. R. (2019b). Numerical evaluation of passive strategies for nocturnal climate optimization in a greenhouse designed for rose production (*Rosa* spp.). *Ornamental Horticulture*, 25(4), 351–364. <https://doi.org/10.1590/2447-536X.v25i4.2087>
- Villagrán-Munar, E. A., & Bojacá-Aldana, C. R. (2020). Study using a CFD approach of the efficiency of a roof ventilation closure system in a multi-tunnel greenhouse for nighttime microclimate optimization. *Revista Ceres*, 67(5), 345–356. <https://doi.org/10.1590/0034-737x202067050002>
- Villagran, E. A., Matarrita, R. R., & Noreña, J. E. J. (2020). Comportamiento microclimático diurno, en temporada seca, de tres estructuras para agricultura protegida en el trópico seco. *UNED Research Journal*, 12(2), e2854–e2854.
- Villagran, E., Bojacá, C., & Akrami, M. (2021). Contribution to the Sustainability of Agricultural Production in Greenhouses Built on Slope Soils: A Numerical Study of

- the Microclimatic Behavior of a Typical Colombian Structure. *Sustainability*, 13(9), 4748.
- Villagrán, E., Flores-Velazquez, J., Akrami, M., & Bojacá, C. (2021). Influence of the Height in a Colombian Multi-Tunnel Greenhouse on Natural Ventilation and Thermal Behavior: Modeling Approach. *Sustainability*, 13(24), 13631.
- Villagran, E., Ramirez, R., Rodriguez, A., Pacheco, R. L., & Jaramillo, J. (2020). Simulation of the thermal and aerodynamic behavior of an established screenhouse under warm tropical climate conditions: A numerical approach. *International Journal of Sustainable Development and Planning*. <https://doi.org/10.18280/ijSDP.150409>
- Villagrán, M. E. A., & Bojacá, A. C. R. (2019). Numerical evaluation of passive strategies for nocturnal climate optimization in a greenhouse designed for rose production (*Rosa* spp.). *Ornamental Horticulture*, 25(4), 351–364. <https://doi.org/10.1590/2447-536X.V25I4.2087>
- Villagran Munar, E. A., Bojacá Aldana, C. R., & Rojas Bahamon, N. A. (2018). DETERMINATION OF THE THERMAL BEHAVIOR OF A COLOMBIAN SPATIAL GREENHOUSE THROUGH COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS. *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica*, 21(2), 415–426.
- Waller, R., Kacira, M., Magadley, E., Teitel, M., & Yehia, I. (2022). Evaluating the Performance of Flexible, Semi-Transparent Large-Area Organic Photovoltaic Arrays Deployed on a Greenhouse. *AgriEngineering*, 4(4), 969–992.
- Zhang, D., Zhu, D., Wang, J., Wei, H., Zong, X., Tan, Y., & Liu, Q. (2014). Design and experiment of semi-automatic double-heat source forcing cultivation of temperature control for sweet cherry. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 30(17), 228–234.
- Zhang, J., Wang, J., Guo, S., Wei, B., He, X., Sun, J., & Shu, S. (2017). Study on heat transfer characteristics of straw block wall in solar greenhouse. *Energy and Buildings*, 139, 91–100.
- Zhang, L., Xu, P., Mao, J., Tang, X., Li, Z., & Shi, J. (2015). A low cost seasonal solar soil heat storage system for greenhouse heating: Design and pilot study. *Applied Energy*, 156, 213–222.
- Zhang, X., Lv, J., Dawuda, M. M., Xie, J., Yu, J., Gan, Y., Zhang, J., Tang, Z., & Li, J. (2019). Innovative passive heat-storage walls improve thermal performance and energy

efficiency in Chinese solar greenhouses for non-arable lands. *Solar Energy*, 190, 561–575. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.08.056>

Zhang, Xin, Wang, H., Zou, Z., & Wang, S. (2016). CFD and weighted entropy based simulation and optimisation of Chinese Solar Greenhouse temperature distribution. *Biosystems Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.11.006>

Zhang, Y., Yang, Q., & Fang, H. (2012). Research on warming effect of water curtain system in Chinese solar greenhouse. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 28(4), 188–193.