



Capítulo II

30

Generalidades de los invernaderos colombianos usados en el trópico altoandino

Edwin Andrés Villagrán Munar

Introducción

Colombia es uno de los principales productores de flor cortada para comercializar en los mercados internacionales. Las especies cultivadas más comunes son rosa, clavel, crisantemo y astromelia (Rocha et al., 2021). La producción de ornamentales y flores de corte está altamente concentrada en la Sabana de Bogotá, región en la que se encuentra el 75 % del área cultivada a nivel nacional. En su totalidad, la producción de flores de corte se realiza en invernaderos de tipo pasivo: estructuras que, en climas tropicales, permiten controlar algunas variables de carácter meteorológico, como la lluvia y la radiación solar (Villa-grán, Bojacá & Akrami, 2021). La producción de otras especies, como tomate, pepino, pimentón, hortalizas de hoja y hierbas medicinales, es realizada en esta misma tipología de invernaderos (Díaz et al., 2018).

Con esta tipología se generan unas condiciones de microclima relacionadas con las características propias de la estructura del invernadero utilizado y con las condiciones de clima local (Bojacá et al., 2009). En Colombia, existen diversas tipologías de invernadero que se han establecido en la región de la Sabana de Bogotá y, por lo tanto, entre ellas hay algún grado de diferenciación en cuanto al comportamiento del microclima (Acuña et al., 2004). El microclima está directamente relacionado con el crecimiento y el desarrollo de las plantas, y con el rendimiento final de los cultivos, tanto en cantidad como en calidad, de modo que es importante conocer estas variaciones en el comportamiento microclimático (Arellano García et al., 2006). Por lo anterior, en este capítulo se discutirán algunas características relevantes de las tipologías de invernadero pasivo usadas en la Sabana de Bogotá.

Características estructurales

Antes de mencionar los materiales y componentes estructurales que deben considerarse al momento de construir una estructura de invernadero, es importante resaltar que, a diferencia de otros países donde existen áreas importantes dedicadas a la agricultura protegida, Colombia no cuenta con una reglamentación o una norma explícita en la que se establezcan los requerimientos mínimos para la construcción de un invernadero. Por lo tanto, el diseño estructural ajustado a alguna normativa queda a criterio del productor o del constructor contratado, quien podrá basarse en normas de construcción europeas o realizar los cálculos estructurales basándose en la Norma Sismo Resistente Colombiana (NSR-10).

En la NSR-10 se pueden encontrar recomendaciones de diseño para estructuras que tengan dentro de su composición concreto estructural, mampostería estructural, estructura metálica o estructura de madera. Este documento de reglamentación contiene parámetros específicos, dependiendo de la altura de la edificación y de la región del país donde se pretende construir. También es posible recurrir a la norma europea UNE-EN 13031-1, "Invernaderos. Cálculos y construcciones. Parte 1: Invernaderos para producción comercial". En ella se podrán encontrar los parámetros básicos de diseño para estructuras metálicas y las cargas de diseño que deberá soportar una tipología de estructura de invernadero. Además, establece las consideraciones generales, de uso, servicio y durabilidad de un proyecto relacionado con invernadero de producción comercial (Carreño Ortega et al., 2011).

En términos generales, es posible dividir la estructura de un invernadero en seis (6) partes específicas: pilares estructurales, cercha, pórticos, cimentación, anclajes perimetrales y amarres transversales y longitudinales. Estos elementos, en conjunto, deben garantizar la estabilidad estructural del invernadero, por lo tanto, han de ofrecer la mayor resistencia mecánica, principalmente respecto a las cargas del viento o a las del cultivo, cuando los sistemas de tutorado se integran a la estructura (Fernández-García et al., 2020).

Tipologías de invernaderos usados en el trópico alto colombiano

32

En Colombia, predominan los invernaderos pasivos. En estas estructuras, el microclima se gestiona mediante la ventilación natural, a través del manejo de las áreas de ventilación ubicadas en los costados y en el techo de los invernaderos (Villagrán, Bojacá & Akrami, 2021). Esta tipología de estructuras puede considerarse de origen local y fue concebida para el sector floricultor a comienzos de los años setenta (Bojacá et al., 2009). En los últimos 50 años, los esfuerzos de las empresas del sector floricultor se han centrado principalmente en mejorar la estabilidad estructural y la durabilidad de estas tipologías. En la actualidad, siguen siendo estructuras de bajo costo y bajo nivel tecnológico, que ofrecen algunas ventajas comparativas respecto a la producción a campo abierto bajo las condiciones climáticas que se presentan a nivel tropical (Villagrán & Bojacá, 2019c; Villagrán, Flores, Bojacá & Akrami, 2021).

Dentro de las principales tipologías de invernaderos que se pueden encontrar en la Sabana de Bogotá está el invernadero tradicional colombiano, el cual cuenta, dentro de sus variantes constructivas, con el tipo *millenium* y el tipo *tándem*: modelos de invernaderos que conservan la forma geométrica del invernadero tradicional, pero que incluyen unas áreas de ventilación sobre los caminos centrales que permiten la construcción de grandes superficies de área cubierta (Acuña et al., 2004). Asimismo, se pueden encontrar invernaderos de tipo espacial, los cuales fueron concebidos como una tipología de invernaderos que no se conforma a través de elementos estructurales en la zona de la cubierta y que, por lo tanto, genera un menor grado de sombra sobre las plantas de cultivo (Villagrán, 2016).

También es posible encontrar invernaderos de tipo colgante, que son una evolución del invernadero tradicional colombiano en la que se modifica su conformación estructural en busca de un mayor aprovechamiento de la superficie de suelo cubierta (Villagrán, 2016). Por último, se encontró el uso de invernaderos tipo túnel, los cuales pueden presentar cubiertas de diferentes forma geométricas, como el diente de sierra, los multitúnel tradicionales, los multitúnel góticos y los multitúnel con ventilación tipo mariposa (Villagrán, Baeza & Bojacá, 2019). Los invernaderos tipo túnel permiten un mayor aprovechamiento de la radiación solar y tienen un mejor comportamiento aerodinámico, lo que promueve mayores tasas de ventilación natural (Teitel et al., 2011).

Invernadero tradicional colombiano

Es un prototipo de invernadero propio de Colombia y se construye con elementos de madera o en combinación de metal y madera. Este modelo es el más utilizado en la floricultura colombiana. Se calcula que este invernadero se usa en el 80 % del área productiva (Díaz et al., 2018). La gestión del microclima en esta estructura se lleva a cabo mediante el manejo de las áreas de ventilación dispuestas en los costados de los invernaderos y en la región de la cubierta (figura 4). En la tabla 4, se incluyen algunos elementos relevantes de esta tipología.

Tabla 4. Elementos relevantes del invernadero tradicional

Características	Modelo concebido en la década de los setenta. Sus dimensiones son: para el ancho de nave (A), 6,80 m; para la separación longitudinal entre pórticos (B), 4,0 m; para la altura bajo canal (C), entre 2,5 y 3,5 m, y para la altura en cumbrera (D), entre 4,5 y 5,5 m. Se pueden encontrar invernaderos con áreas cubiertas desde 3.000 hasta los 12.000 m ² .
Ventajas	Versátil en su construcción. Modelo de bajo costo. Modelo construido con materiales estructurales de origen local.
Desventajas	Requiere de mantenimiento frecuente. Posee una alta heterogeneidad térmica. Tiene limitadas tasas de ventilación. Presenta fenómenos de inversión térmica.

Fuente: Elaboración propia

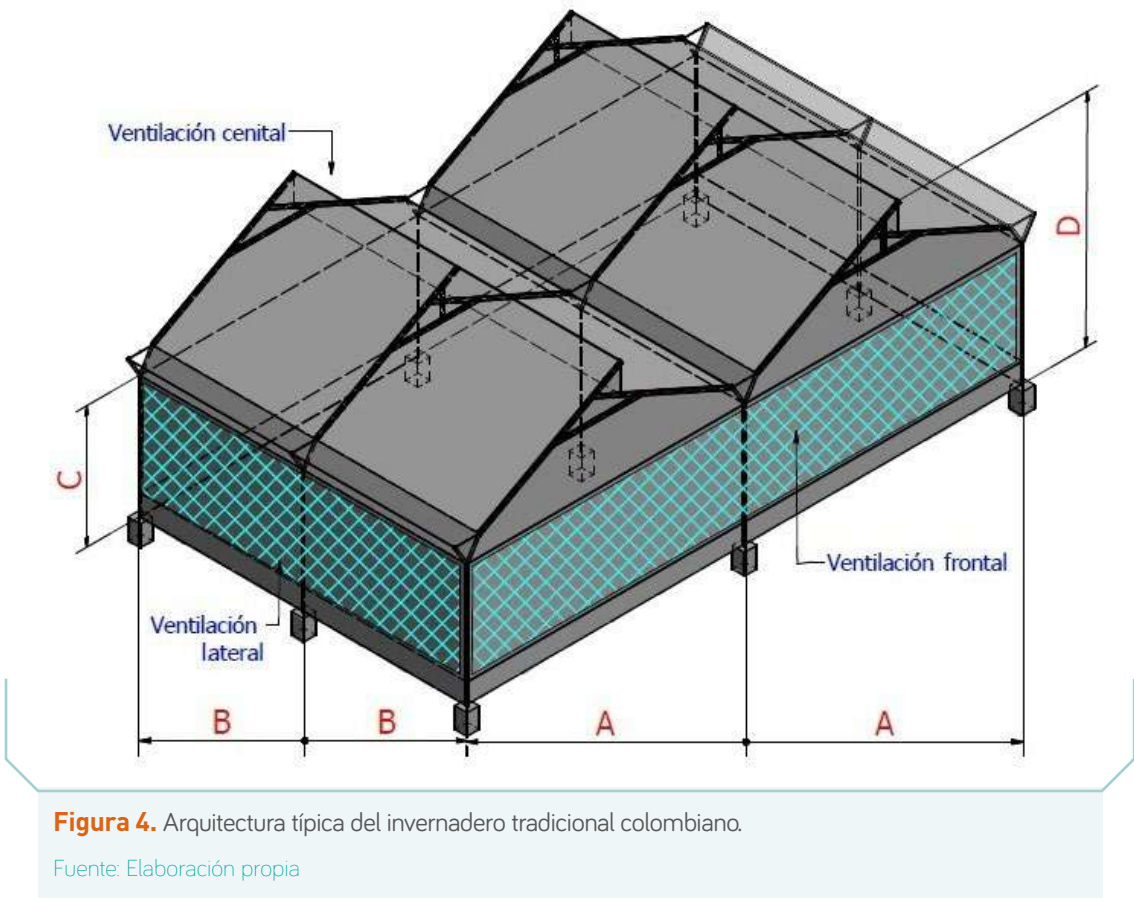


Figura 4. Arquitectura típica del invernadero tradicional colombiano.

Fuente: Elaboración propia

Invernadero colgante

Esta tipología de invernadero se origina a partir de una modificación estructural del invernadero tradicional. En este caso, se modifica el pórtico en busca de un mayor aprovechamiento de la superficie de suelo cubierta y, adicionalmente, se cuenta con menos elementos estructurales para el mantenimiento. El control de clima de este modelo se realiza mediante la gestión de las áreas de ventilación dispuestas en la estructura (figura 5).

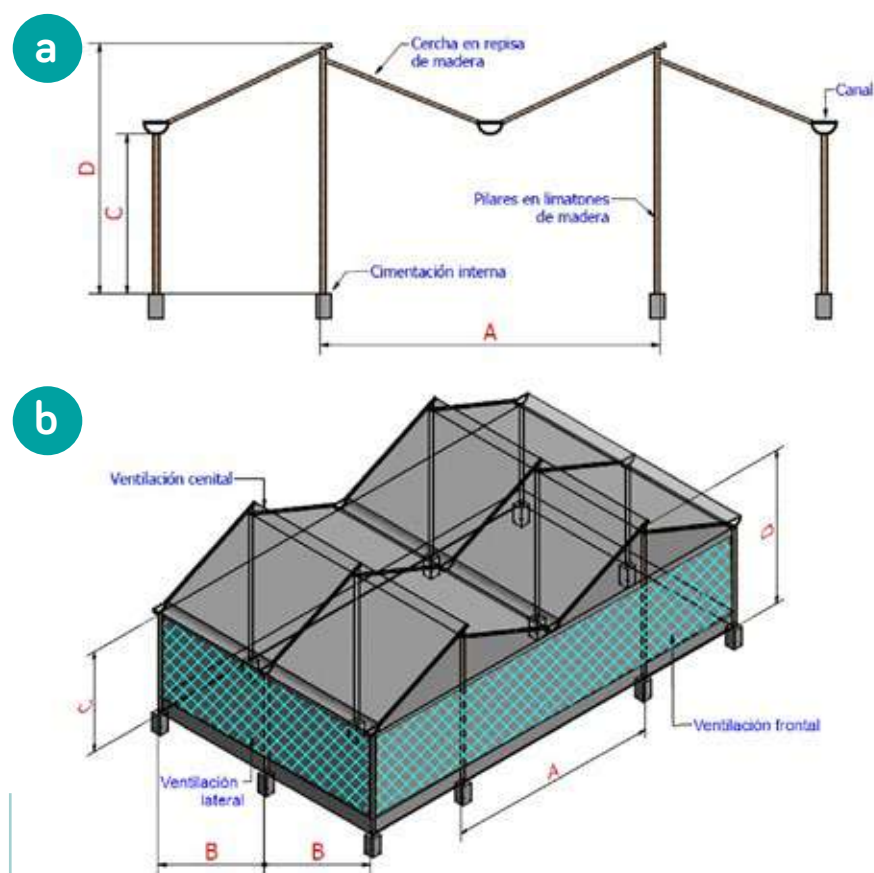


Figura 5. Esquema general del invernadero colgante a. Esquema geométrico del pórtico; b. Arquitectura típica del invernadero colgante.

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 5, se incluyen algunos aspectos generales de esta tipología de invernadero.

Tabla 5. Aspectos generales del invernadero de tipo colgante

Características	Sus dimensiones son: para el ancho de nave (A), 6,80 m; para la separación longitudinal entre pórticos (B), 4,0 m; para la altura bajo canal (C), entre 3,5 y 4,5 m, y para la altura en cumbrera (D), entre 5,0 y 6,0 m. Se pueden encontrar invernaderos con áreas cubiertas de 4.000 hasta los 9.000 m ² .
Ventajas	Modelo de bajo costo. Modelo construido con materiales estructurales de origen local. Tiene una mayor inercia térmica, en comparación con el invernadero tradicional. Mejor aprovechamiento de la superficie de suelo cubierto.
Desventajas	Requiere de mantenimiento frecuente. Posee una alta heterogeneidad térmica. Tiene limitadas tasas de ventilación. Presenta fenómenos de condensación sobre los cultivos.

Fuente: Elaboración propia

Invernadero espacial

Esta es una tipología de invernaderos totalmente diferente: no existen elementos estructurales en la región de la cubierta, por lo tanto, cuenta con un mayor aprovechamiento de la radiación solar respecto a los dos tipos de invernaderos descritos anteriormente. El microclima se gestiona mediante el manejo de las áreas de ventilación dispuestas en los costados de la estructura.

Este tipo de invernadero se construye con postes de concreto preformado, y la fijación de la cubierta se realiza mediante la conformación de un entramado de cables. Se trata de una adaptación tropical del invernadero tipo parral usado en Almería (España) (figura 6). En la tabla 6, se incluyen algunos aspectos generales de esta tipología de invernadero.

Tabla 6. Aspectos generales del invernadero de tipo espacial

Características	Sus dimensiones son: para el ancho de nave (A), entre 6,0 y 8,0 m; para la separación longitudinal entre pórticos (B), 30,0 m; para la altura bajo canal (C), entre 2,5 y 4,0 m, y para la altura en cumbrera (D), entre 5,0 y 6,5 m. Se pueden encontrar invernaderos con áreas cubiertas de 5.000 hasta los 16.000 m ² .
Ventajas	Modelo con menos elementos estructurales para mantenimiento. Mejor aprovechamiento de la superficie de suelo cubierto respecto a los invernaderos tradicionales. Menor nivel de sombra sobre la región donde se desarrollan los cultivos.

Continúa en la página 37...

... continuación tabla 6.

Desventajas

- Mayor complejidad en su construcción.
- Requiere de mayor experticia para la instalación del plástico.
- Posee una limitante en áreas de ventilación cenital.
- Tiene limitadas tasas de ventilación.
- Presenta fenómenos de inversión térmica.
- Presenta fenómenos de condensación sobre los cultivos.

Fuente: Elaboración propia

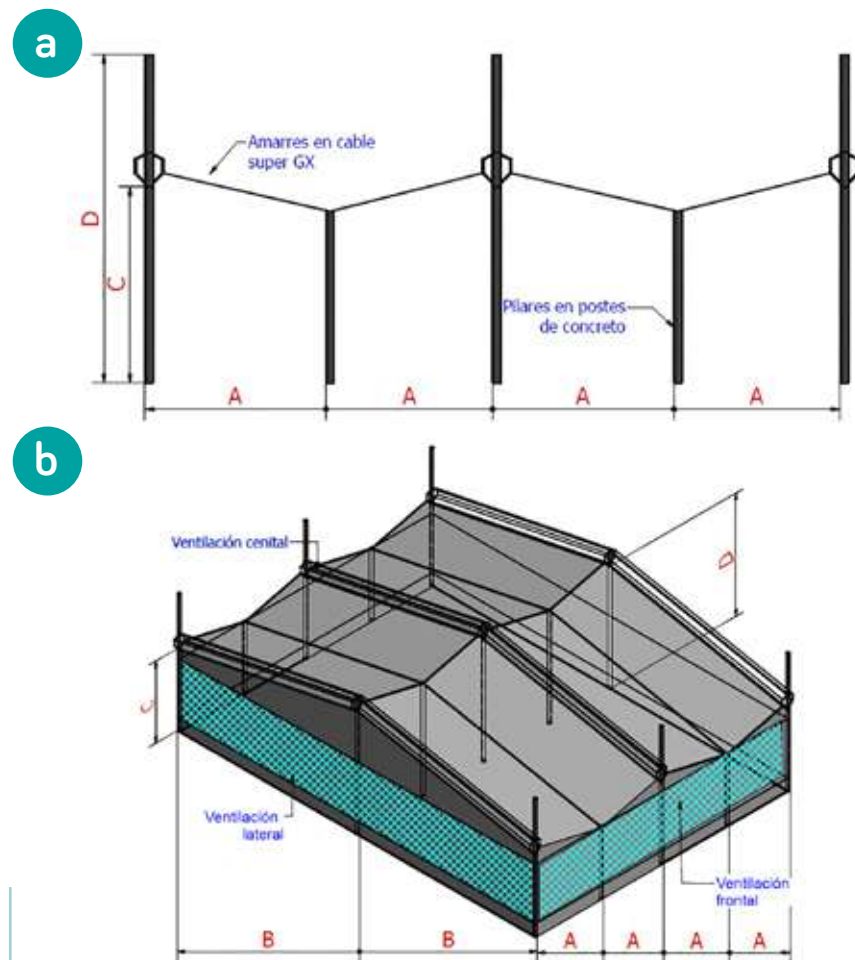


Figura 6. Esquema general del invernadero espacial a. Esquema geométrico del pórtico; b. Arquitectura típica del invernadero espacial.

Fuente: Elaboración propia

Invernaderos tipo túnel

Los invernaderos tipo túnel son estructuras fabricadas principalmente en acero, donde se reducen los elementos estructurales de la cercha y se pueden realizar sujeciones de tipo soldado (figura 7). El acero tiene una mayor durabilidad en el tiempo y una mayor resistencia mecánica de los elementos estructurales. La gestión climática es totalmente dependiente de la ventilación natural. En la tabla 7, se incluyen algunos aspectos generales de este tipo de invernadero.

Tabla 7. Aspectos generales del invernadero tipo túnel

Características	Sus dimensiones son: para el ancho de nave (A), entre 6,8 y 8,0 m; para la separación longitudinal entre pórticos (B), 4,0 m; para la altura bajo canal (C), entre 3,0 y 4,0 m, y para la altura en cumbrera (D), entre 5,5 y 6,5 m. Se pueden encontrar invernaderos con áreas cubiertas de 5.000 hasta los 10.000 m ² .
Ventajas	Tiene una mayor inercia térmica en comparación con el invernadero tradicional. Menores costos económicos asociados a mantenimiento de la estructura. Mejor comportamiento de los flujos de aire. Mayor aprovechamiento de la radiación solar. Mejor aprovechamiento de la superficie de suelo cubierto. Permite la instalación de mayores áreas de ventilación. Mejor versatilidad para la construcción de la estructura.
Desventajas	Estructura metálica que requiere de inversión económica más alta. Tiene tasas de ventilación aceptables. Fenómenos de inversión térmica cuando no se cierran las áreas de ventilación cenital fijas.

Fuente: Elaboración propia

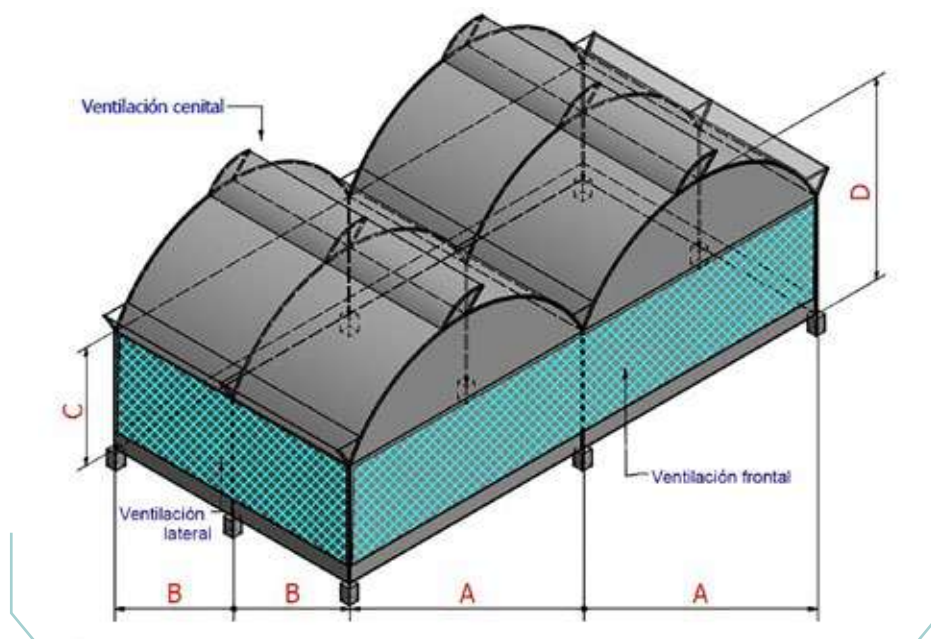


Figura 7. Arquitectura típica del invernadero tipo túnel.

Fuente: Elaboración propia

Invernaderos tipo túnel gótico y doble ventilación cenital

Este tipo de invernadero es una modificación arquitectónica del invernadero tipo túnel. En general, se diferencia por poseer mayor altura general y unas mejores áreas de ventilación en la región del techo (figuras 8 y 9). Su rendimiento climático presenta menores gradientes térmicos y comportamientos espaciales más homogéneos, en comparación con los invernaderos tradicionales. Asimismo, las tasas de ventilación llegan a niveles óptimos bajo las condiciones climáticas del trópico altoandino colombiano (Villagrán & Bojacá, 2019b; Villagrán & Bojacá, 2019c). En la tabla 8, se incluyen algunos aspectos generales de esta tipología de invernadero.

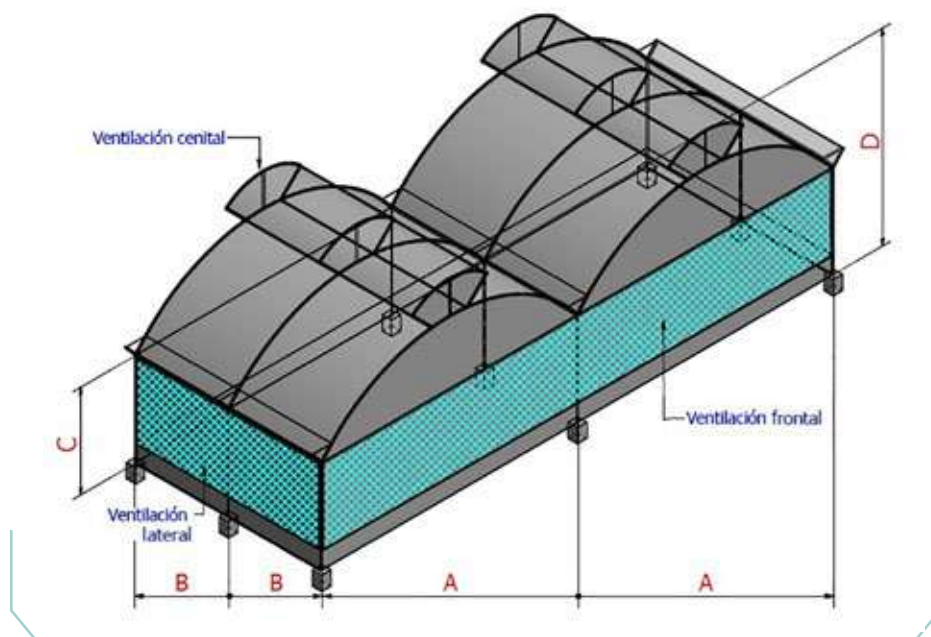


Figura 8. Arquitectura del invernadero tipo túnel con doble ventilación cenital fija.

Fuente: Elaboración propia

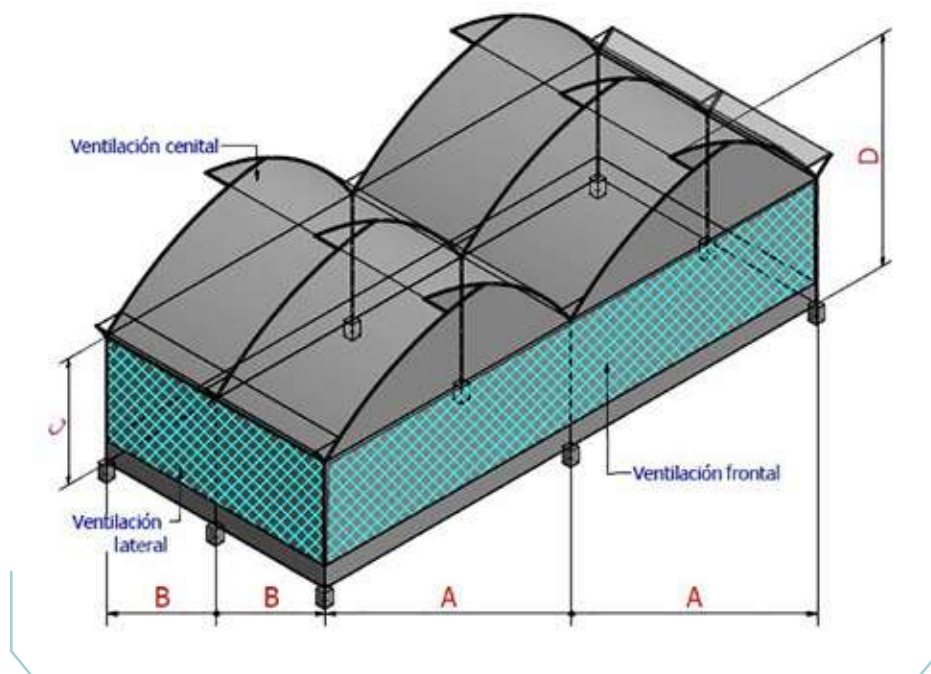


Figura 9. Arquitectura del invernadero tipo túnel con cubierta gótica.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 8. Aspectos generales de los invernaderos góticos y de doble ventilación cenital

Características	Sus dimensiones son: para el ancho de nave (A), entre 7,0 y 11,0 m; para la separación longitudinal entre pórticos (B), 4,3 m; para la altura bajo canal (C), entre 4,5 y 6,5 m, y para la altura en cumbrera (D), entre 8,5 y 10,5 m. Se pueden encontrar invernaderos con áreas cubiertas de 3.000 hasta los 5.000 m².
Ventajas	Tiene una mayor inercia térmica en comparación con los invernaderos tradicionales. Menores costos económicos asociados a mantenimiento de la estructura. Mejor comportamiento de los flujos de aire. Mayor aprovechamiento de la radiación solar. Permite la instalación de mayores áreas de ventilación. Presenta tasas de ventilación adecuadas para un invernadero ventilado de forma natural. Mejor ventilación por efecto chimenea.
Desventajas	Estructura metálica que requiere de mayor inversión económica y de elementos estructurales más robustos debido a sus mayores alturas.

Fuente: Elaboración propia

Invernaderos tipo diente de sierra

Esta tipología de invernadero se construye sobre un pórtico que se conforma sobre una cercha con geometría de 1/4 de circunferencia; puede tener un radio de curvatura, dependiendo de la altura de los pilares (figura 10). En la tabla 9, se incluyen algunos aspectos generales de este tipo de invernadero.

Tabla 9. Aspectos generales del invernadero tipo diente sierra

Características	Sus dimensiones son: para el ancho de nave (A), entre 5,0 y 7,0 m; para la separación longitudinal entre pórticos (B), 4,0 m; para la altura bajo canal (C), entre 3,5 y 4,5 m, y para la altura en cumbrera (D), entre 5,7 y 7,7 m. Se pueden encontrar invernaderos con áreas cubiertas de 2.000 hasta los 10.000 m².
Ventajas	Menores costos económicos asociados a mantenimiento de la estructura. Amplia área de ventilación. Adecuada aerodinámica de los flujos de aire bajo velocidades de viento exterior moderadas*.

Continúa en la página 42...

... continuación tabla 9.

Desventajas	Presenta alto nivel de sombra por la forma de su cubierta.
	Complejidad de su construcción.
	Menor inercia térmica que los invernaderos tipo túnel.
	Requiere de una alternativa de manejo para la ventilación superior en momentos de lluvia.

* Se debe evaluar experimentalmente bajo las condiciones climáticas de Colombia y con un número de sensores significativo.

Fuente: Elaboración propia

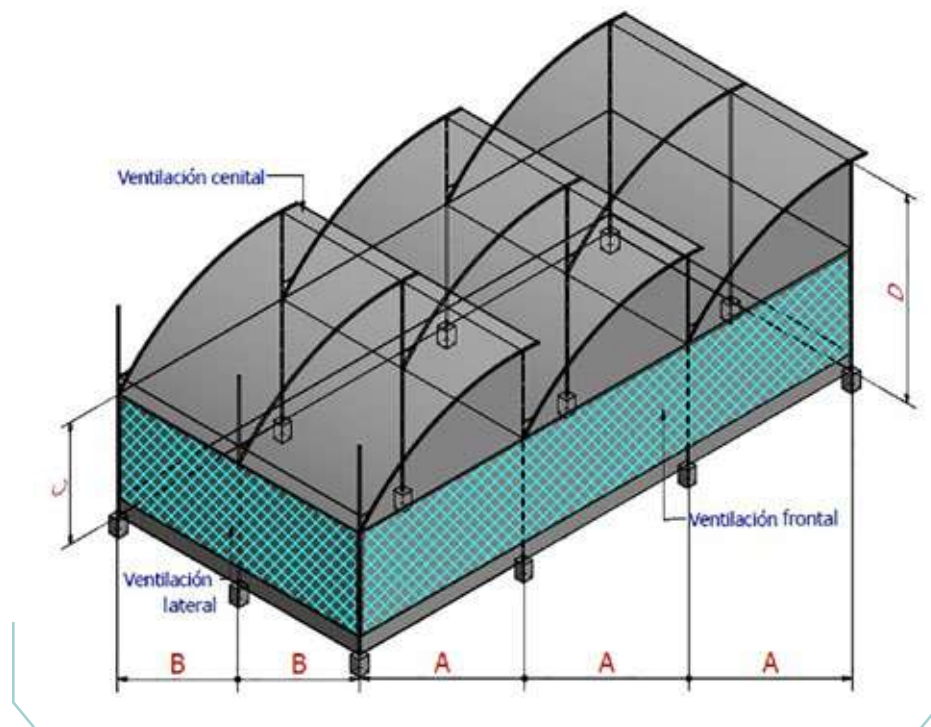


Figura 10. Arquitectura del invernadero tipo diente sierra.

Fuente: Elaboración propia

Control de clima pasivo (ventilación natural)

En los invernaderos usados en el sector ornamental y hortofrutícola colombiano, el manejo del microclima se lleva a cabo por medio de la ventilación natural, la cual es una alternativa económica y sostenible que permite controlar los excesos térmicos y la humedad dentro de esta tipología de estructuras; adicionalmente, es la única vía de enriquecimiento de carbono del aire dentro del invernadero (Bournet, 2014).

La ventilación natural depende de dos fuerzas impulsoras: la convección forzada (o ventilación dinámica) y la convección libre (o ventilación térmica). El componente de convección forzada es dependiente de la velocidad del viento exterior y de la configuración de ventilación del invernadero. Mientras que el componente de convección libre es generado a partir del efecto de flotabilidad, aquel ocurre debido al gradiente térmico que se presenta en el aire en el ambiente interior y exterior del invernadero. Esto, a su vez, genera diferenciales de densidad y presión, que producen un movimiento vertical del aire, o efecto chimenea, dentro de la estructura (López et al., 2011). Este movimiento de aire permite regular las condiciones de temperatura y humedad, y evita fenómenos como la condensación en el interior del invernadero. Asimismo, el flujo de aire proveniente del ambiente exterior es la única fuente de enriquecimiento carbónico en las estructuras de tipo pasivo, por lo tanto, es un factor que afecta positiva o negativamente los procesos fotosintéticos de las plantas (De Pedro, 2015; Molina-Aiz et al., 2017).

La eficiencia de la ventilación natural será dependiente de los factores propios y externos de cada tipo de estructura de agricultura protegida, dentro de los cuales cabe resaltar el tamaño y la altura del invernadero, la forma y el tamaño de las áreas de ventilación de la estructura, las condiciones de dirección y velocidad del viento exterior, la presencia de estructuras o invernaderos adyacentes, el uso de las mallas antiinsecto en las áreas de ventilación y el tipo de cultivo y su estado fenológico (Espinoza et al., 2017; Villagrán, 2021). Considerando estos factores que influyen en la ventilación natural, se ha llegado a la conclusión de que es un fenómeno físico de difícil comprensión. Por tal razón, su entendimiento mediante el uso de los diferentes modelos matemáticos y técnicas de medición ofrece un punto de partida para la toma de decisiones en el diseño y la gestión de las estructuras de agricultura protegida usadas en la producción agrícola (De Pedro, 2015; Ruiz-García et al., 2015).

En este aspecto, se debe mencionar que los principales modelos de invernaderos colombianos han sido evaluados por medio de técnicas de simulación numérica, mediante dinámica de fluidos computacionales (CFD). Resultados de estas investigaciones han permitido concluir que las tasas de ventilación de los invernaderos tradicional, colgante, espacial y tipo túnel, característicos del sector ornamental, no alcanzan el nivel mínimo de 40 renovaciones horarias que debería tener un invernadero ventilado naturalmente (Villagrán & Bojacá, 2019b). Estas tasas de ventilación ineficientes se presentan debido a las escasas áreas de ventilación cenital en las zonas de las cubiertas de los invernaderos, y a la altura limitada que tienen este tipo de estructuras (Villagrán et al., 2019).

Por esta razón, es común observar patrones de distribución de flujo con velocidades muy bajas en el interior (figura 11), lo que se traduce en comportamientos térmicos bastante heterogéneos, con diferenciales en el interior de la estructura que superan los 10 °C (figura 12), lo cual no es adecuado para productos de alta calidad, como las flores de exportación (Villagrán & Bojacá, 2020).

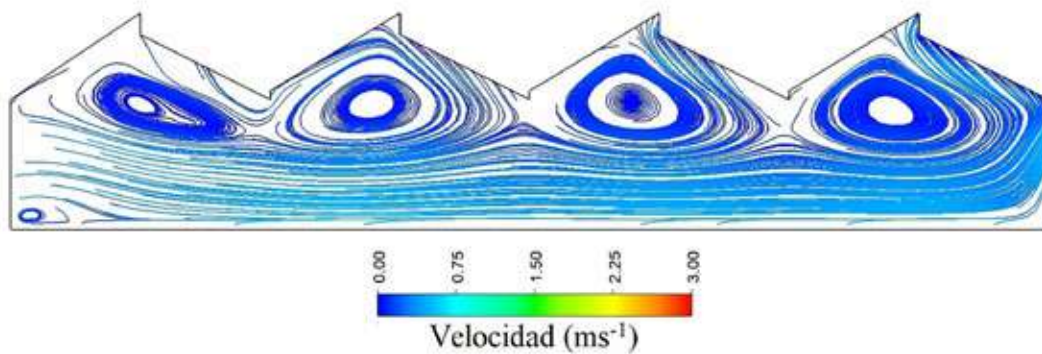


Figura 11. Flujo de aire en un invernadero tradicional colombiano.

Fuente: Elaboración propia

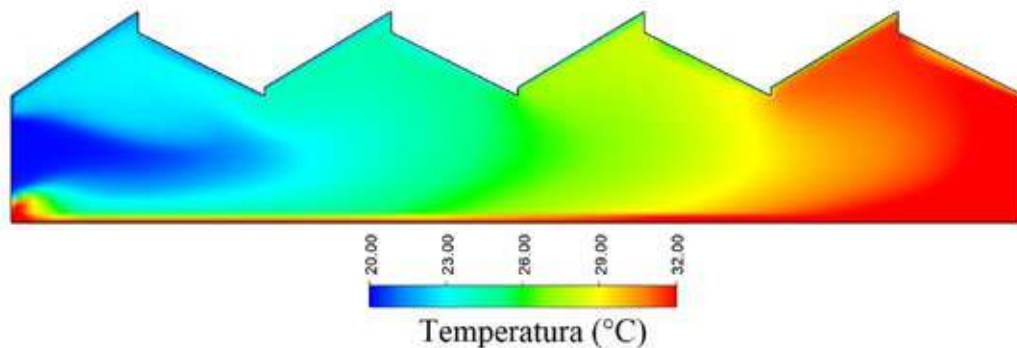


Figura 12. Distribución espacial de la temperatura en el interior de un invernadero tradicional colombiano.

Fuente: Elaboración propia

Por lo anterior, se recomienda seguir investigando para encontrar estrategias que permitan mejorar las tasas de ventilación de los principales prototipos de invernaderos colombianos, por medio del análisis de posibilidades de optimización arquitectónica que puedan ser implementadas en estas tipologías de estructuras.

Conclusiones

En Colombia, la agricultura protegida es un sistema de producción alternativa a la producción a campo abierto; asimismo, puede ser una opción muy interesante para la intensificación agrícola en el contexto de adaptación y mitigación al cambio climático. Sin embargo, para que los modelos de producción sean exitosos, deben partir del diseño e implementación de estructuras de invernadero proyectadas para las condiciones climáticas locales y en función de las demandas ecofisiológicas de los cultivos a establecer. Si bien es cierto que el sector floricultor ha impulsado el desarrollo de prototipos de invernadero para las condiciones de la Sabana de Bogotá, estos diseños fueron concebidos para una mayor durabilidad y resistencia estructural, y no siempre ofrecen un rendimiento microclimático adecuado para el desarrollo de los cultivos.

Referencias

- Acuña, J. F., Bustamante, N., Casallas, L. F., & Gutiérrez, N. (2004). Caracterización de los invernaderos para cultivo de flores en la Sabana de Bogotá (pp. 57-64). En *Memorias del VI Congreso Latinoamericano para el Desarrollo y Aplicación de Plásticos en la Agricultura*. Cidapa.
- Arellano García, M., Valera Martínez, D., Urrestarazu Gavilán, M., García Garza, S., Sánchez Salas, J., & Soria Ruiz, J. (2006). Estudio del microclima en dos subtipos de invernaderos Almería. *Agricultura Técnica en México*, 23(2), 225-234. <https://www.redalyc.org/pdf/608/60832210.pdf>
- Bojacá, C. R., Gil, R., Gómez, S., Cooman, A., & Schrevers, E. (2009). Analysis of greenhouse air temperature distribution using geostatistical methods. *Transactions of the ASABE*, 52(3), 957-968. <https://doi.org/10.13031/2013.27393>
- Bojacá, C. R., Gil, R., & Cooman, A. (2009). Use of geostatistical and crop growth modelling to assess the variability of greenhouse tomato yield caused by spatial temperature variations. *Computers and Electronics in Agriculture*, 65(2), 219-227. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2008.10.001>
- Bournet, P. E. (2014). Assessing greenhouse climate using CFD: a focus on air humidity issues. *Acta Horticulturae*, 1037, 971-986. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2014.1037.129>
- Carreño Ortega, A., Vázquez Cabrera, J., Pérez-Alonso, J., Sánchez Espinosa, E., & Callejón-Ferre, A. J. (2011). *Análisis estructural 3D de los invernaderos multitúnel del sudeste de España. Elementos horizontales* [Ponencia], VI Congreso Ibérico de Agroingeniería, Portugal, Universidade de Évora.

- De Pedro, L. F. (2015). *Invernaderos en regiones tropicales y sub-tropicales: balance de energía, diseño y manejo del ambiente físico*. Universidad Nacional de Formosa-Instituto Universitario de Formosa.
- Díaz, D. C., Bojacá, C. R., & Schrevers, E. (2018). Modeling the suitability of the traditional plastic greenhouse for tomato production across Colombian regions. *Acta Horticulturae*, 1205. <https://doi.org/10.17660/actahortic.2018.1205.109>
- Espinoza, K., López, A., Valera, D. L., Molina-Aiz, F. D., Torres, J. A., & Peña, A. (2017). Effects of ventilator configuration on the flow pattern of a naturally-ventilated three-span Mediterranean greenhouse. *Biosystems Engineering*, 164, 13-30. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.10.001>
- Fernández-García, M. S., Vidal-López, P., Rodríguez-Robles, D., Villar-García, J. R., & Agujetas, R. (2020). Numerical simulation of multi-span greenhouse structures. *Agriculture*, 10(11), 1-31. <https://doi.org/10.3390/agriculture10110499>
- López, A., Valera, D. L., & Molina-Aiz, F. D. (2011). Sonic anemometry to measure natural ventilation in greenhouses. *Sensors*, 11(10), 9820-9838. <https://doi.org/10.3390/s111009820>
- Molina-Aiz, F. D., Norton, T., López, A., Reyes-Rosas, A., Moreno, M. A., Marín, P., Espinoza, K., & Valera, D. L. (2017). Using computational fluid dynamics to analyze the CO₂ transfer in naturally ventilated greenhouses. *Acta Horticulturae*, 1182, 283-292. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2017.1182.34>
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial [MADR]. (2010). NSR-10, Reglamento colombiano de construcción sismo resistente. *Diario Oficial* 47.663.
- Rocha, G. A. O., Pichimata, M. A., & Villagrán, E. A. (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, 13(18), 10433. <https://doi.org/10.3390/SU131810433>
- Ruiz-García, A., López-Cruz, I. L., Arteaga-Ramírez, R., & Ramírez-Arias, J. A. (2015). Tasas de ventilación natural de un invernadero del centro de México estimadas mediante balance de energía. *Agrociencia*, 49(1), 87-100.
- Teitel, M., Montero, J. I., & Baeza, E. J. (2011). Greenhouse design: concepts and trends. *Acta Horticulturae*, 952, 605-620.
- Villagrán, E. A. (2016). *Diseño y evaluación climática de un invernadero para condiciones de clima intertropical de montaña*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/56572/1072644298.2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Villagrán, E. A. (2021). Implementation of ventilation towers in a greenhouse established in low altitude tropical climate conditions: numerical approach to the behavior of the natural ventilation. *Revista Ceres*, 68(1), 10-22. <https://doi.org/10.1590/0034-737x202168010002>
- Villagrán, E. A., & Bojacá, 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, E. A., & Bojacá, C. R. (2019b). Effects of surrounding objects on the thermal performance of passively ventilated greenhouses. *Journal of Agricultural Engineering*, 50(1), 20-27. <https://doi.org/10.4081/jae.2019.856>
- Villagrán, E. A., & Bojacá, C. R. (2019c). Study of natural ventilation in a Gothic multi-tunnel greenhouse designed to produce rose (*Rosa* spp.) in the high-Andean tropic. *Ornamental Horticulture*, 25(2), 133-143. <https://doi.org/10.14295/oh.v25i2.2013>
- Villagrán, E. A., & Bojacá, C. R. (2020). Analysis of the microclimatic behavior of a greenhouse used to produce carnation (*Dianthus caryophyllus* L.). *Ornamental Horticulture*, 26(2), 109-204. <https://doi.org/10.1590/2447-536X.v26i2.2150>
- Villagrán, E. A., Bojacá, C. R., & 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. A., Flores, J., Bojacá, C. R., & Akrami, M. (2021). Evaluation of the microclimate in a traditional Colombian greenhouse used for cut flower production. *Agronomy*, 11(7), 1330.
- Villagrán, E. A., Baeza Romero, E. J., & Bojacá, C. R. (2019). Transient CFD analysis of the natural ventilation of three types of greenhouses used for agricultural production in a tropical mountain climate. *Biosystems Engineering*, 188, 288-304. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.10.026>