

ESTRATEGIAS DE ADAPTACIÓN Y MITIGACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO en sistemas de producción agrícola

Un enfoque desde la agricultura protegida y técnicas de biotecnología para el manejo del cultivo



ESTRATEGIAS DE ADAPTACIÓN Y MITIGACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO en sistemas de producción agrícola

Un enfoque desde la agricultura protegida y técnicas
de biotecnología para el manejo del cultivo

Edwin Andrés Villagrán Munar
Stephanie Johana Numa-Vergel
Editores

Estrategias de adaptación y mitigación al cambio climático en sistemas de producción agrícola: un enfoque desde la agricultura protegida y técnicas de biotecnología para el manejo del cultivo. / Edwin Andrés Villagrán Munar [y otros veintisiete] – Mosquera, (Colombia): AGROSAVIA, 2023.

259 páginas (Colección Alianzas AGROSAVIA)

Incluye referencias bibliográficas, ilustraciones y gráficos.

ISBN e-Book: 978-958-740-641-2

1. Sistemas de producción 2. Biotecnología vegetal 3. Adaptación al cambio climático 4. Cultivos de invernadero 5. Experimentación in vitro 6. Déficit hídrico 7. Mitigación del cambio climático.

Palabras clave normalizadas según Tesauro Multilingüe de Agricultura -Agrovoc

Catalogación en la publicación - Biblioteca Agropecuaria de Colombia

Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - AGROSAVIA

Centro de Investigación Tibaitatá, Km 14 vía Mosquera-Bogotá, Mosquera, código postal 250047, Colombia.

Esta publicación es el resultado del proyecto "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", desarrollado mediante el convenio 1994 entre la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA) y el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (Minciencias).

Autores

Edwin Andrés Villagrán Munar
Linda Gómez Arias
Douglas Andrés Gómez Latorre
Yeni Rodríguez Giraldo
Iván Edilberto Chacón Garzón
Stephanie Johana Numa Vergel
Fabián Andrés Velásquez Ayala
John Javier Espitia González
Diego Alejandro Salinas Velandia
Julio Ricardo Galindo Pacheco
Adriana Marcela Santos Díaz
Sandra Valbuena Aguilar
Tatiana Miranda Salas
Gabriela Toro Tobón
Carolina Pachón Venegas
Daniel Torres Cuesta
Germán Estrada Bonilla
Fagua Álvarez Flórez
Valerin Alison Aguirre Franco
Juan Sebastián Garcerá Riaño

Jonathan Alberto Mendoza Labrador
Paola Jimena Criollo Campos
Sergio Pardo Díaz
Daniel Fernando Rojas Tapias
Andrés Eduardo Moreno Galván
Mauricio Camelo Rusinque
Lady Rocío Molano Chávez
Ruth Rebeca Bonilla Buitrago

Equipo técnico Minciencias

Yesenia Olaya Requeme
Ministra de Ciencia, Tecnología e Innovación
Viceministerio de Conocimiento, Innovación y Productividad
Viceministerio de Talento y Apropiación Social del Conocimiento
Dirección de Gestión de Recursos para la Ciencia, la Tecnología y la Innovación (CTel).
Diana Paola Saavedra
Supervisora del convenio
Luisa Fernanda Flores Vargas
Apoyo a la supervisión del convenio

Colección Alianzas AGROSAVIA

Tipología: Libro de análisis, prácticas, experiencias y reflexiones

Fecha de entrega: 3 de junio de 2022

Fecha de evaluación: 25 de agosto de 2022

Fecha de aceptación: 15 de septiembre de 2022

Editorial AGROSAVIA
editorial@agrosavia.co

Dirección editorial:

Astrid Verónica Bermúdez Díaz

Edición: Verónica Barreto Riveros

Corrección de estilo:

Sebastián Montero Vallejo

Diseño y diagramación:

Mónica Cabiativa Daza

Fotografía: Edwin Villagrán, Julio Galindo, Stéphanie Numa, Cristian Rodríguez, Sandra Valbuena, Mónica Páramo

DOI: <https://doi.org/10.21930/agrosavia.analisis.7406412>

Primera edición: agosto de 2023

Publicado en Mosquera, Cundinamarca

Citación sugerida: Villagrán Munar, E. A., Gómez Arias, L., Gómez Latorre, D. A., Rodríguez Giraldo, Y., Chacón Garzón, I. E., Numa Vergel, S. J., Velásquez Ayala, F. A., Espitia González, J. J., Salinas Velandia, D. A., Galindo Pacheco, J. R., Santos-Díaz, A. M., Valbuena Aguilar, S., Miranda Salas, T. Toro-Tobón, G., Pachón-Venegas, C., Torres-Cuesta, D., Estrada-Bonilla, G., Álvarez-Flórez, F., Aguirre-Franco, V. A., ... Bonilla-Buitrago, R. R. (2023). *Estrategias de adaptación y mitigación al cambio climático en sistemas de producción agrícola: un enfoque desde la agricultura protegida y técnicas de biotecnología para el manejo del cultivo*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA).

Cláusula de responsabilidad: AGROSAVIA no es responsable de las opiniones ni de la información recogidas en el presente texto. Los autores asumen de manera exclusiva y plena toda responsabilidad sobre su contenido, ya sea este propio o de terceros, declarando en este último supuesto que cuentan con la debida autorización de terceros para su publicación. Igualmente, expresan que no existe conflicto de interés alguno con relación a los resultados de la investigación propiedad de tales terceros. En consecuencia, los autores serán responsables civil, administrativa o penalmente, frente a cualquier reclamo o demanda por parte de terceros, relativa a los derechos de autor u otros derechos que se vulneren como resultado de su contribución.

Línea de atención al cliente:
018000121515
atencionalcliente@agrosavia.co
www.agrosavia.co



Contenido

Agradecimientos	9
Introducción	10

Capítulo I. Generalidades de la relación entre agricultura y cambio climático 15

Edwin Andrés Villagrán Munar, Linda Gómez Arias, Douglas Andrés Gómez-Latorre, Yeni Rodríguez Giraldo

Introducción	16
Clima y agricultura	17
Cambio climático	18
Emisiones de gases de efecto invernadero producidas en actividades agrícolas	19
Impacto del cambio climático en la agricultura	20
Mitigación del cambio climático en la agricultura	22
Adaptación al cambio climático en la agricultura	24
Conclusiones	26
Referencias	27

Capítulo II. Generalidades de los invernaderos colombianos usados en el trópico altoandino 30

Edwin Andrés Villagrán Munar

Introducción	31
Características estructurales	31
Tipologías de invernaderos usados en el trópico alto colombiano	32
Control de clima pasivo (ventilación natural)	42



Conclusiones	45
Referencias	45

Capítulo III. Criterios para la selección de la ubicación adecuada para la construcción de una estructura de invernadero 48

Edwin Andrés Villagrán Munar, Iván Edilberto Chacón Garzón, Linda Gómez Arias

Introducción	49
Estrategias de producción en invernaderos	49
Microclima generado	50
Ubicación del invernadero	52
Conclusiones	60
Referencias	60

Capítulo IV. Materiales de cubierta y cerramiento para la construcción de invernaderos: criterios técnicos para su selección 63

Edwin Andrés Villagrán Munar, Stephanie Johana Numa-Vergel, Yeni Rodríguez Giraldo

Introducción	64
Tipologías de materiales para cubierta de invernaderos.....	65
Materiales de cerramiento	77
Selección de una malla antiinsecto	81
Conclusiones	83
Referencias	83

Capítulo V. Estrategias de climatización activa para uso en invernaderos del trópico altoandino colombiano. . . 64

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

Introducción	87
Variables de microclima relacionadas con la producción agrícola bajo invernadero	88



Estrategias de control de clima activo	92
Tendencias en climatización de invernaderos	104
Conclusiones	105
Referencias	105

Capítulo VI. Sistemas de climatización pasiva para invernaderos de cubierta plástica 110

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

Introducción	111
Tecnologías de climatización pasiva para uso en invernaderos	112
Invernadero cerrado o semicerrado	119
Conclusiones	121
Referencias	121

Capítulo VII. Avances de un modelo de producción hidropónico en agricultura vertical para hortalizas de hoja bajo ambiente protegido en la Sabana del occidente de Bogotá 124

*Diego Alejandro Salinas Velandia, Julio Ricardo Galindo Pacheco,
Edwin Andrés Villagrán Munar*

Introducción	125
Agricultura vertical como sistema de producción de alimentos	128
Técnicas de cultivo vertical	129
Tipologías de granja vertical	129
Experiencia con un modelo de producción de lechuga en agricultura vertical	132
Balance del sistema	146
Reflexiones y perspectivas	147
Referencias	148



Capítulo VIII. Uso de invernaderos en la ejecución de investigaciones aplicadas a la evaluación de artrópodos plaga en Colombia. 151

Stephanie Johana Numa-Vergel, Adriana Marcela Santos-Díaz

Introducción	151
Requerimientos básicos para el diseño de invernaderos útiles en la ejecución de bioensayos con artrópodos	151
Buenas prácticas en la ejecución de investigaciones bajo invernaderos	158
Diseño de experimentos biológicos en invernadero	159
Experiencias en el mantenimiento de crías de artrópodos bajo invernadero	163
Experiencias en el desarrollo de bioensayos para la evaluación de microorganismos entomopatógenos	164
Conclusiones	170
Referencias	170

Capítulo IX. Proceso de aclimatación y acondicionamiento de material vegetal con potencial productivo en condiciones protegidas semicontroladas . . . 175

Linda Gómez Arias, Sandra Valbuena Aguilar, Tatiana Miranda Salas, Edwin Andrés Villagrán Munar

Introducción	176
Aclimatación de plantas producidas mediante la técnica <i>in vitro</i>	176
Condiciones de adaptación <i>ex vitro</i>	177
Adaptación de plantas <i>in vitro</i> a condiciones de invernadero . . .	179
Criterios de calidad de los inventarios entregados al cliente final . .	182
Conclusiones	186
Referencias	186

Capítulo X. Respuestas fisiológicas, bioquímicas y moleculares al estrés por déficit hídrico en especies forrajeras 188

Gabriela Toro-Tobón, Carolina Pachón-Venegas, Daniel Torres-Cuesta, Germán Estrada-Bonilla, Fagua Álvarez-Flórez

Introducción	189
Respuestas al estrés por déficit hídrico	190
Respuestas bioquímicas	196
Respuestas moleculares.	198
Estrategias para la mitigación del estrés por déficit hídrico en forrajes	200
Referencias	203

Capítulo XI. Bacterias endófitas de plantas: establecimiento de la interacción 212

Valerín A. Aguirre-Franco, Juan S. Garcerá-Riaño, Jonathan A. Mendoza-Labrador, Paola J. Criollo-Campos, Sergio Pardo-Díaz, Daniel F. Rojas-Tapias

Introducción	213
Motilidad bacteriana: desplazamiento espacial hacia la raíz	214
Quimiotaxis: respuesta a gradientes químicos.	218
Adherencia: formación de un contacto estrecho entre la bacteria y la planta	220
Invasión de la endosfera: colonización del tejido vegetal	223
Evasión de la respuesta inmune: consolidación de la interacción	224
Referencias	227

Capítulo XII. Bacterias endófitas de plantas: mecanismos de mitigación del déficit hídrico en planta 232

Andrés E. Moreno-Galván, Daniel F. Rojas-Tapias, Mauricio Camelo-Rusínque, Lady R. Molano-Chávez, Ruth R. Bonilla-Buitrago, Germán A. Estrada-Bonilla

Introducción	235
Producción de exopolisacáridos (EPS).	235



Modulación de sustancias reguladoras del crecimiento vegetal.....	236
Modulación bacteriana de la actividad enzimática antioxidante ..	240
Biosíntesis de solutos compatibles: prolina, trehalosa y glicina betaína.....	241
Referencias	242
Los autores	249



Agradecimientos

A la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA) y al Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (Minciencias), por la financiación del proyecto desarrollado mediante el convenio 1994, 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”. A todo el equipo técnico del proyecto, y a la jefe del Departamento de Laboratorios de Investigación y Servicios, María Angélica Pichimata. A los directores de Investigación y Desarrollo, Rodrigo Alfredo Martínez; de Planeación, Tatiana Rivero Espitia, y del Centro de Investigación Tibaitatá, Juan Diego Palacio.



Introducción

En un sistema económico mundial dinámico, caracterizado por la aparición de nuevos productos y servicios, el comercio mundial de alimentos representa uno de los desafíos más relevantes de la sociedad actual y de la futura. En este contexto, los países en desarrollo deben enfocarse en aumentar sus capacidades técnicas y su nivel tecnológico como estrategia para producir alimentos de calidad. También es importante mencionar que la agricultura moderna tiene el desafío de desarrollarse mediante prácticas sostenibles que permitan conservar los recursos naturales y limitar los efectos adversos generados por los fenómenos de variabilidad y cambio climático.

En este aspecto, se debe mencionar que en el territorio nacional los fenómenos de El Niño y La Niña han afectado la agricultura colombiana y que se proyectan para los próximos años condiciones de alta variabilidad climática, con predominancia de altas temperaturas y eventos de precipitación errática. Lo anterior puede generar que algunas regiones productivas presenten condiciones de sequía, inundación, salinización y pérdida de fertilidad de los suelos. Asimismo, habría una mayor prevalencia de plagas y enfermedades, lo que generaría grandes pérdidas económicas por el aumento de los costos de producción en las principales áreas de cultivo. También es posible que se generen restricciones de productividad que, sin duda, pondrían en riesgo la seguridad alimentaria de algunas regiones. Por lo tanto, con el desarrollo del presente libro, este grupo de investigadores de AGROSAVIA tiene como particular objetivo brindar información relevante sobre prácticas de mitigación y adaptación al cambio climático, como lo son la agricultura protegida y las estrategias sostenibles para el manejo del recurso hídrico en plantas cultivadas bajo condiciones de estrés abiótico.

En el primer capítulo, titulado “Generalidades de la relación existente entre agricultura y cambio climático”, Edwin Villagrán, Linda Gómez, Douglas Gómez y Yeni Rodríguez cuentan brevemente las relaciones históricas que hay entre la agricultura, el clima y la variabilidad climática natural, y cómo estas

han impulsado en cierta medida la evolución técnica de la agricultura. También se mencionan y se dan algunos valores de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) generadas directamente de las actividades agrícolas y pecuarias, y se relacionan estas emisiones con el aumento del efecto invernadero y, por ende, del calentamiento global generalizado. Adicionalmente, se describen algunas alteraciones que sobre el desarrollo de los cultivos pueden ocasionar el aumento de temperatura, el cambio en los patrones de precipitación y el aumento de la concentración de CO₂. Para finalizar, se indican y recomiendan algunas estrategias de mitigación y adaptación de la agricultura al cambio climático. Dentro de estas se encuentra la potencialidad de la agricultura protegida y de las actividades enfocadas en el mejoramiento del manejo del recurso agua y suelo bajo condiciones de estrés.

En el capítulo II, “Generalidades de los invernaderos colombianos usados en el trópico altoandino”, Edwin Villagrán hace una descripción generalizada de las principales tipologías de invernaderos usadas en la región del trópico alto, asociada a la Sabana de Bogotá. Se menciona el origen de estos invernaderos de tipo pasivo, y se realiza una descripción de las características principales, ventajas y desventajas de siete de los modelos de invernaderos usados a nivel local. Dentro de la información consignada en este capítulo se pueden encontrar los diseños arquitectónicos de cada uno de los invernaderos descritos, se hace énfasis en la limitada gestión microclimática que poseen estas estructuras y se recomienda establecer estrategias para maximizar las tasas de ventilación —estas estrategias deben partir de la concepción del diseño arquitectónico del invernadero—. Lo anterior es relevante, ya que la optimización del microclima permitirá aumentar la viabilidad y sostenibilidad de los cultivos bajo ambientes protegidos.

En el tercer capítulo, titulado “Criterios para la selección de la ubicación adecuada para la construcción de una estructura de invernadero”, Edwin Villagrán, Iván Chacón y Linda Gómez presentan una serie de recomendaciones técnicas para la selección del sitio adecuado donde se construirá el invernadero. Se describen en este texto factores climáticos, topográficos, de disponibilidad y de calidad de los recursos de agua y suelo. Se hace énfasis en la polución y en la contaminación de las cubiertas, o el sombreado de estas, puesto que la calidad de la luz es un factor clave para la producción de alimentos bajo cubierta. Para facilitar la comprensión, los autores acompañaron con material gráfico cada una de las recomendaciones técnicas.

En el capítulo IV, “Materiales de cubierta y cerramiento para la construcción de invernaderos: criterios técnicos para su selección”, Edwin Villagrán, Stephanie Numa y Yeni Rodríguez hacen una descripción técnica de los materiales

disponibles para cubierta y cerramiento usados en la fabricación de invernaderos. Los autores señalan las ventajas y desventajas de cada uno, e incluyen la información de las características físicas, mecánicas, ópticas y térmicas de materiales rígidos, como el vidrio, y flexibles, como el plástico. En cuanto a los materiales plásticos que son usualmente utilizados en Colombia, se hace una descripción técnica de todas las películas plásticas disponibles comercialmente a nivel local y se dan criterios para su selección en función de las condiciones climáticas y de los cultivos a establecer. Por último, respecto a los materiales de cerramiento, se realiza una descripción detallada de las mallas antiinsecto y de su eficacia para la exclusión física de insectos plaga de interés, por la afectación que generan sobre los principales cultivos hortofrutícolas.

En el quinto capítulo, “Estrategias de climatización activa para uso en invernaderos del trópico altoandino colombiano”, Edwin Villagrán, John Espitia, Iván Chacón y Stephanie Numa realizan una descripción de las principales variables microclimáticas que inciden en el crecimiento y desarrollo de los cultivos en el interior de un invernadero o estructura de agricultura protegida. En este aspecto, se mencionan rangos óptimos de temperatura, humedad, luminosidad y concentración de CO₂ para cultivos hortícolas y ornamentales. En este capítulo, también se incluye información relevante sobre tipología de sistemas de climatización activa para labores de enfriamiento, humidificación y calefacción que pueden ser implementados bajo las condiciones climáticas de la Sabana de Bogotá.

En el capítulo VI, “Sistemas de climatización pasiva para invernaderos de cubierta plástica”, Fabián Velásquez, John Espitia y Edwin Villagrán realizaron un análisis de los sistemas de climatización pasivos disponibles a nivel mundial y que, de acuerdo con su funcionamiento, pueden implementarse en los invernaderos de la Sabana de Bogotá, con la finalidad de optimizar las condiciones microclimáticas tanto en el periodo diurno como en el nocturno. A diferencia de los sistemas de climatización activa, los de climatización pasiva basan su funcionamiento en energías renovables —como la energía solar— y en la captura y almacenamiento de energía térmica. Por lo tanto, los autores aportan información con la que se demuestra que este tipo de sistemas es técnica y ambientalmente una de las mejores alternativas de climatización en invernaderos de cubierta plástica.

El séptimo capítulo, “Avances de un modelo de producción hidropónico en agricultura vertical para hortalizas de hoja bajo ambiente protegido en la Sabana del occidente de Bogotá”, Diego Salinas, Ricardo Galindo y Edwin Villagrán muestran los resultados de investigación obtenidos en un nuevo modelo de producción de hortalizas para la Sabana de Bogotá basado en agricultura vertical bajo ambientes protegidos. En este capítulo, se menciona la relevancia que han cobrado las nuevas prácticas de producción de alimentos en sistemas intensificados que buscan

generar un mayor aprovechamiento del área de suelo disponible y un mejor uso del recurso hídrico a partir de los beneficios microclimáticos que puede ofrecer un invernadero diseñado para las condiciones climáticas locales de la Sabana de Bogotá. Los autores incluyen, asimismo, información sobre el comportamiento fisiológico de la lechuga crespa verde, su relación con la intensidad lumínica, sus tasas de absorción de nutrientes, su gasto de agua y su rendimiento productivo.

En el capítulo VIII, “Uso de invernaderos en la ejecución de investigaciones aplicadas a la evaluación de artrópodos plaga en Colombia”, Stephanie Numa y Adriana Santos incluyen información importante para el desarrollo de bioensayos con artrópodos en invernaderos. Las autoras mencionan las características mínimas de infraestructura que debe tener el invernadero, tanto en su exterior como en su interior. También se incluyen recomendaciones de buenas prácticas experimentales en el interior del invernadero, la importancia de la planificación del diseño experimental y, por último, se mencionan y describen algunas experiencias de AGROSAVIA en la cría de artrópodos y en el desarrollo de bioensayos para la evaluación de microorganismos entomopatógenos en condiciones de invernadero. Esta información es relevante, puesto que una de las estrategias de mitigación del cambio climático es la implementación de técnicas de agricultura climáticamente inteligente, como lo son el control biológico y la generación de biofertilizantes.

En el noveno capítulo, “Proceso de aclimatación y acondicionamiento de material vegetal con potencial productivo en condiciones protegidas semicontroladas”, Linda Gómez, Sandra Valbuena, Tatiana Miranda y Edwin Villagrán ofrecen al lector información acerca del uso de invernaderos con condiciones controladas, en los que es posible adecuar las variables ambientales según la especie vegetal, con el fin de alcanzar una mayor eficiencia del proceso de aclimatación de material de alta calidad que proviene del laboratorio de producción vegetal de AGROSAVIA. En esta capítulo, también se mencionan las fases clave del proceso de endurecimiento de material vegetal y su relación con variables físicas, fisiológicas, sanitarias y genéticas.

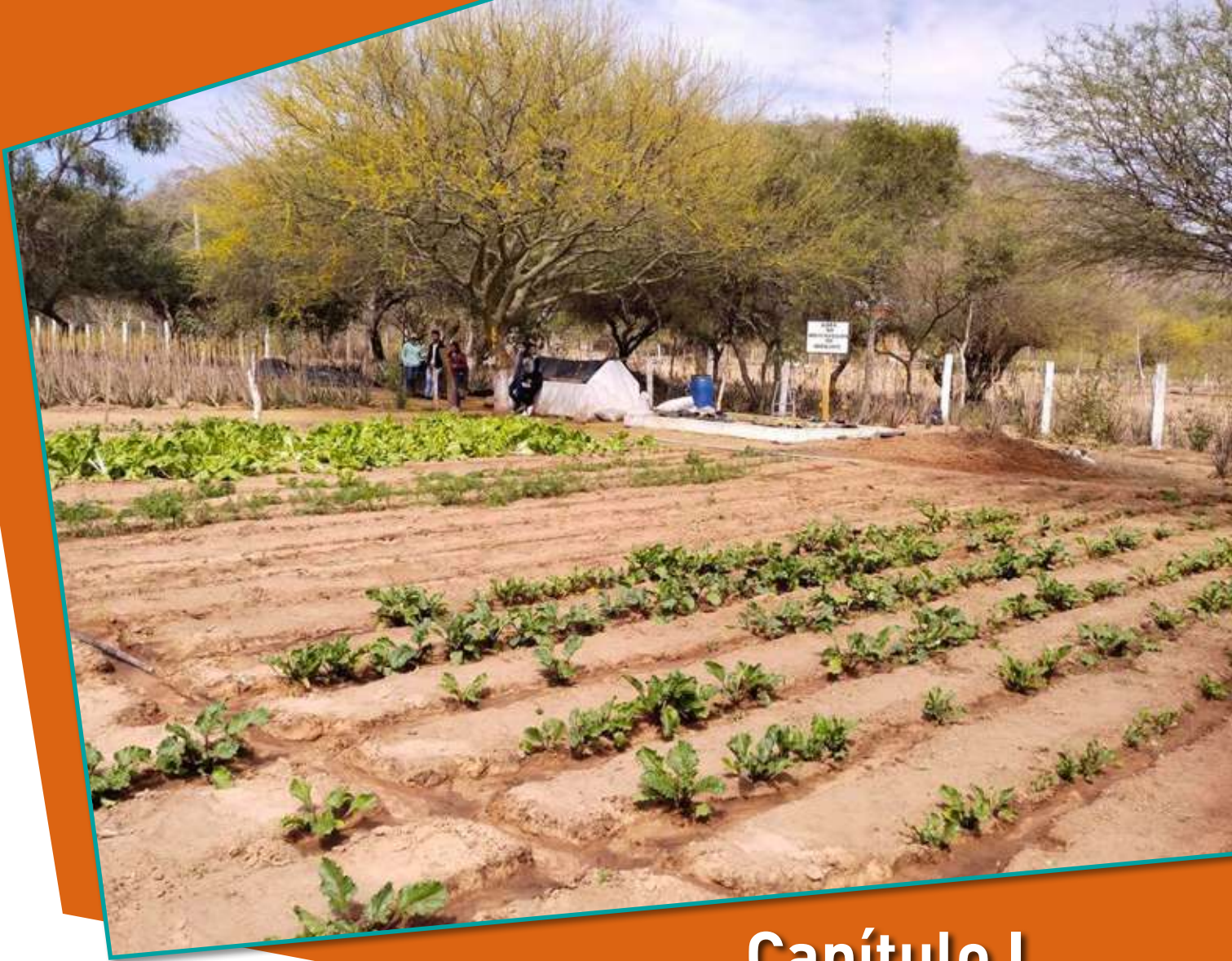
En el capítulo X, “Respuestas fisiológicas, bioquímicas y moleculares al estrés por déficit hídrico en especies forrajeras”, Gabriela Toro, Carolina Pachón, Daniel Torres, Germán Estrada y Fagua Álvarez llevan a cabo la revisión de un tema que ha cobrado bastante interés en los últimos años debido a las consecuencias del cambio climático. Esta revisión incluye información de marcada relevancia acerca de las respuestas de especies forrajeras sometidas a condiciones de estrés abiótico, en este caso por sequía. Si bien en Colombia, en los últimos años, se han realizado esfuerzos para desarrollar variedades forrajeras

que permitan satisfacer la demanda durante periodos de sequía o escasez de biomasa, en la actualidad se carece de información sobre la respuesta de estos tipos de materiales al estrés por déficit hídrico en condiciones del trópico. Así, la información descrita en este capítulo aporta y describe aspectos de gran importancia para los investigadores en esta área del conocimiento.

En el capítulo XI, “Bacterias endófitas de plantas: establecimiento de la interacción”, Valerin Aguirre, Juan Garcerá, Jonathan Mendoza, Paola Criollo, Sergio Pardo y Daniel Rojas realizaron una revisión en busca de información relacionada con la interacción planta-microorganismo-ambiente. Los datos arrojados respecto a estas interacciones pueden ser aprovechados para el desarrollo de biotecnologías enfocadas en el uso de microorganismos que tienen como objetivo mitigar el impacto negativo de diversos estreses abióticos sobre el crecimiento y desarrollo de distintos cultivos de interés agronómico. En este capítulo, se incluye la información enfocada en los mecanismos que estos microorganismos usan para reducir el estrés de las plantas expuestas a déficit hídrico.

Por último, en el capítulo XII, “Bacterias endófitas de plantas: mecanismos de mitigación del déficit hídrico en planta”, Andrés Moreno, Daniel Rojas, Mauricio Camelo, Lady Molano, Ruth Bonilla y Germán Estrada realizaron, con el mismo objetivo del capítulo XI, una revisión de los mecanismos de mitigación expresados por bacterias endófitas en plantas sometidas a condiciones de estrés hídrico.

Por todo lo anterior, es posible observar que este libro ofrece información clave para agricultores y tomadores de decisión que estén interesados en buscar estrategias y herramientas que les permitan, en el corto o mediano plazo, alcanzar una agricultura sostenible y adaptada a los desafíos que genera el cambio climático.



Capítulo I

15

Generalidades de la relación entre agricultura y cambio climático

Edwin Andrés Villagrán Munar
Linda Gómez Arias
Douglas Andrés Gómez-Latorre
Yeni Rodríguez Giraldo

Introducción

La agricultura moderna se enfrenta a varios desafíos originados por el aumento desmedido de la población mundial, en tanto que proyecciones recogidas por Gruda et al. (2019) muestran que, para 2050, la producción de alimentos debe ser suficiente para alimentar a cerca de 9.000 millones de personas. Sin embargo, desde hace algunos años, también existe una fuerte presión mundial para que la agricultura se adapte a nuevas condiciones, que con el cambio climático se acentúan cada vez más. Por otra parte, día a día se busca una agricultura capaz de mitigar al máximo la generación de gases de efecto invernadero (GEI) (Selbonne et al., 2022).

La existencia del cambio climático en la actualidad es aceptada por casi la totalidad de la comunidad científica. También hay consenso en cuanto a que el cambio climático tiene un fuerte origen antropogénico, debido a la revolución industrial y los modelos de desarrollo extractivistas de la mayoría de países (Tubiello et al., 2015). El aumento de las emisiones de GEI, a partir de las actividades desarrolladas por diferentes sectores de la economía, entre las que se destaca la agricultura —con casi un 25 % de las emisiones totales (9,3 billones de toneladas de CO₂ equivalente)—, derivado de una alta tasa de deforestación, ha sumado, junto con otros sectores económicos, al progresivo calentamiento global (Conchedda & Tubiello, 2020).

Este ha generado un aumento de la temperatura media de la superficie terrestre y, al mismo tiempo, ha modificado la distribución espacial y temporal de las precipitaciones. En el caso de la región tropical, ha influido para que fenómenos de variabilidad climática, como es el caso de El Niño/La Niña, se presenten de forma más frecuente y con mayor intensidad. En las regiones tropicales, donde la agricultura es altamente dependiente de las condiciones climáticas y donde predomina la producción a campo abierto, las consecuencias que el cambio climático genera sobre la producción agrícola afectan la disponibilidad de alimentos y la seguridad alimentaria de algunas regiones (Villagrán & Rodríguez, 2021). En este capítulo, se hace la revisión de algunos conceptos y cifras relevantes sobre la relación que existe entre la agricultura y el cambio climático.

Clima y agricultura

Desde las civilizaciones antiguas, la agricultura y el clima han estado estrechamente relacionados, y parte del desarrollo de la agricultura ha sido un proceso de adaptación a las condiciones climáticas (Comisión Económica para América Latina y el Caribe [Cepal], 2011). Por ejemplo, actividades como el riego y su tecnificación han evolucionado con el objetivo de mitigar los efectos negativos que sobre el desarrollo de los cultivos generaba la restricción temporal del recurso hídrico (Bojacá et al., 2017). Asimismo, el desarrollo de nuevas variedades de especies vegetales capaces de desarrollarse en diferentes condiciones climáticas o bajo condiciones de estrés fue también impulsado por la relación directa entre agricultura y clima (Cepal, 2011).

El crecimiento, el desarrollo, el rendimiento y la calidad de los cultivos van a depender altamente del comportamiento de variables como temperatura, radiación solar y precipitación (tabla 1). Asimismo, el comportamiento de estas variables agroclimáticas ayudará a la definición de: i) las épocas adecuadas de siembra, ii) el momento oportuno para la aplicación de fertilizantes y productos de control fitosanitario y iii) la planificación para la captación y almacenamiento de agua para riego (Ritchie & Nesmith, 1991).

Tabla 1. Variables agroclimáticas que inciden en la producción agrícola

Variable	Proceso	Efecto
Radiación solar.	Fotosíntesis y crecimiento de las plantas.	A mayor tasa fotosintética, mayor producción de biomasa acumulada, y viceversa. Etiolación del material vegetal. La fenología del cultivo se ve afectada por la acumulación de calor.
Temperatura.	Tiempo térmico.	El tiempo térmico afecta el desarrollo fenológico del cultivo. Adicionalmente, si las especies vegetales se siembran en regiones climáticas inadecuadas, el comportamiento de la temperatura puede limitar el crecimiento y desarrollo del cultivo.
Precipitación.	Balance hídrico y sanidad del cultivo.	Afecta la tasa de evapotranspiración del cultivo, lo que genera condiciones de estrés o confort hídrico. Asimismo, la precipitación afecta el contenido de humedad del aire y en épocas lluviosas se incrementa la vulnerabilidad de los cultivos, provocada por una mayor incidencia de enfermedades causadas por hongos.

Fuente: Elaboración propia con base en Ritchie & Nesmith (1991)

Cambio climático

Se entiende por cambio climático la alteración de las condiciones promedio de temperatura y precipitación que tiene lugar en una región durante un largo periodo de tiempo. Estos cambios son originados en conjunto por la variabilidad natural del sistema climático y por factores propios de la actividad humana (Yohannes, 2016). El cambio climático está relacionado directamente con una modificación sobre la composición de la atmósfera de la Tierra. Desde hace más de cien años, se ha observado un aumento de los GEI, los cuales son originados principalmente por actividades humanas (Rahman & Anik, 2020).

Los GEI que más contribuyen al cambio climático son el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4) y el óxido nitroso (N_2O). Estos gases capturan la radiación solar y posteriormente la emiten como radiación infrarroja, con lo cual se aumenta el calor retenido en la atmósfera. Lo anterior se conoce como efecto invernadero, y es la causa principal del calentamiento global generalizado que se presenta en la superficie terrestre (Dawadi et al., 2022). El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, por su sigla en inglés) anunció recientemente que la temperatura promedio mundial aumentó $1,10\text{ }^\circ\text{C}$ en la última década. En este mismo informe, la predicción de aumento de temperatura en los escenarios de bajas y muy altas emisiones se ubicó entre $1,30$ y $5,70\text{ }^\circ\text{C}$ para el año 2090 (Masson-Delmotte et al., 2021).

A nivel local, para Colombia se espera que la temperatura media aumente en $2,5\text{ }^\circ\text{C}$, mientras que la precipitación presentará una variación promedio del 3 %, para 2050. Estos cambios provocarán degradación del suelo en las vertientes andinas, inundaciones y salinidad de las tierras costeras, cambios en la disponibilidad hídrica de las cuencas y pérdida de nichos productivos como café y banano. Adicionalmente, se espera que estas modificaciones se presenten en el 60 % de los suelos cultivados, lo que afectará hasta el 80 % de los cultivos establecidos actualmente. Lo anterior, sin duda, es relevante y puede impactar negativamente la economía, ya que el 21 % de la población nacional depende directa o indirectamente de la agricultura (Lau et al., 2011).

Emisiones de gases de efecto invernadero producidas en actividades agrícolas

La agricultura y el sistema alimentario mundial son responsables de aproximadamente el 40 % de las emisiones totales de GEI de origen antropogénico (Mbow et al., 2019). Asimismo, la agricultura produce casi el 50 % de las emisiones efectivas de CH_4 y, aproximadamente, el 75 % de N_2O . Por su parte, las emisiones de CO_2 son más difíciles de cuantificar, debido a los diferentes procesos que pueden originarlas y, adicionalmente, a la dificultad para aplicar métodos exactos para su cuantificación y balance (Mbow et al., 2019) (figura 1). En términos generales, las emisiones de CO_2 en agricultura están asociadas al uso de energía para fabricación y transporte de fertilizantes y plaguicidas, así como a la energía consumida para labores de mecanización agrícola, aunque todas estas emisiones son cuantificadas por el IPCC dentro de las emisiones del sector de energía y transporte (Lynch et al., 2021).

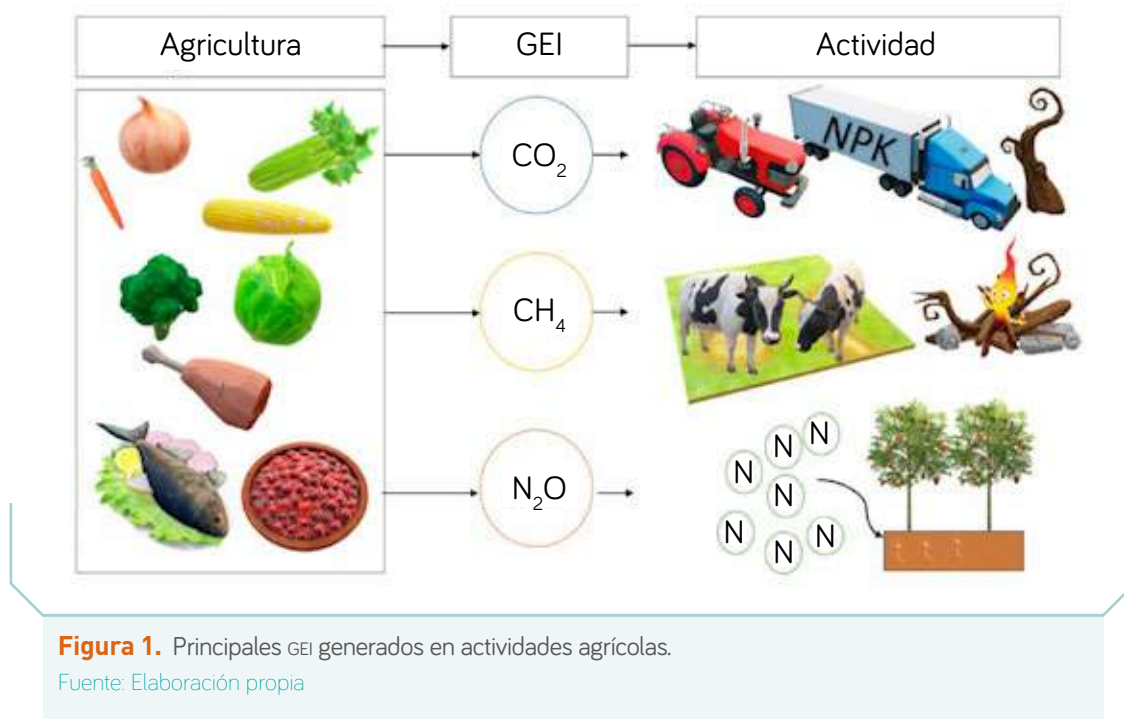


Figura 1. Principales GEI generados en actividades agrícolas.

Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, el sistema alimentario es el principal responsable de las emisiones de CO₂ asociadas al cambio del uso del suelo. Esto se debe principalmente a la conversión y transformación de paisajes naturales en tierras para ganadería o para cultivos de especies vegetales (Le Quéré et al., 2018). Se estima que las emisiones de CO₂ asociadas a agricultura, en lo referente al cambio del uso del suelo, equivalen al 10 % del total del CO₂ emitido anualmente de origen antropogénico (Lynch et al., 2021). Por último, es importante destacar que el potencial de calentamiento global, así como la duración de cada uno de estos GEI en la atmósfera son diferentes (tabla 2).

Tabla 2. Algunas características de los principales GEI

Característica	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Tiempo de permanencia en la atmósfera (años).	120	14,5	120
Potencial de calentamiento global (unidad).	1	24,5	320
Principal fuente de generación agrícola o pecuaria.	Deforestación.	Arroz por inundación. Quema de biomasa. Ganadería extensiva.	Fertilización nitrogenada. Excrementos de animales. Fijación biológica de nitrógeno.

Fuente: Elaboración propia con base en Yohannes (2016)

Impacto del cambio climático en la agricultura

La agricultura es una actividad económica que representa aproximadamente el 3 % del producto interno bruto (PIB) mundial y es, además, una actividad esencial para la producción de los alimentos que dan el sustento a la vida humana (Lynch et al., 2021). Las prácticas agrícolas o pecuarias son altamente vulnerables a las condiciones variables del tiempo y del clima: cualquier modificación sobre estos elementos genera perturbaciones en el crecimiento de las plantas y, por ende, en la producción final del cultivo (Yohannes, 2016).

El cambio climático ha generado alteraciones sobre los patrones de distribución de la precipitación, aumento de la temperatura, mayor probabilidad de fenómenos meteorológicos extremos y aumento en la concentración del carbono atmosférico (Lynch et al., 2021). Estas alteraciones modificarán las dinámicas fisiológicas de los cultivos y la tasa de crecimiento de las plantas, incrementarán la afectación de plagas y enfermedades sobre los cultivos y a

nivel de suelo, aumentarán la erosión debido a eventos de sequía e inundación más frecuentes e, incluso, es posible que generen la pérdida del poder nutricional de algunos alimentos (Ackerman & Stanton, 2013).

Alteraciones por el aumento de la temperatura

Las afectaciones debido a una condición climática más cálida serán diferenciadas y dependientes de las condiciones biofísicas, de la disponibilidad de recursos de agua y suelo de cada región, y del tipo de cultivo (Ignaciuk & Mason-D'Croz, 2014). Algunos investigadores han reportado, por ejemplo, que un clima más cálido, aproximadamente entre 1 y 3 °C, en las regiones de latitudes cercanas al Polo Norte permitiría el aumento del rendimiento de algunos cultivos, especialmente cereales. Sin embargo, estos aumentos no equilibrarían la reducción de rendimiento que se presentaría en estos mismos cultivos en zonas de media latitud (Piao et al., 2006). Por otro lado, en regiones tropicales y estacionalmente secas con un clima futuro 2 °C más cálido, se espera una reducción del rendimiento de los cultivos y una probabilidad más elevada de inseguridad alimentaria, así como disminución en el ingreso económico de los agricultores (Yohannes, 2016). Hasta la fecha, algunas estimaciones mencionan que el calentamiento global presentado desde 1981 ha generado pérdidas anuales combinadas de 40 millones de toneladas de alimentos, lo que equivale a 5 mil millones de dólares (Lobell & Field, 2007).

Alteraciones por cambios en los patrones de precipitación

La modificación de los patrones de precipitación generaría restricciones en el agua disponible para riego, lo que puede ocasionar mayores pérdidas asociadas a estrés hídrico por condiciones de sequía. Asimismo, la modificación de las precipitaciones limitará la capacidad de planificación de siembra y de labores de cultivo por parte de los agricultores (Gornall et al., 2010). Estos cambios de humedad —tanto en el suelo como en el ambiente— asociados al aumento de la temperatura provocarían alteraciones en la absorción de nutrientes y de otros minerales esenciales para el crecimiento de las plantas, lo que puede traducirse en potenciales pérdidas productivas de los cultivos (Fischer et al., 2007). Existe evidencia de que los cambios de precipitación han generado una disminución en el rendimiento del maíz, el arroz, el trigo, la papa y las verduras. Esta reducción continuará y será significativa según las proyecciones para 2050 (Ignaciuk & Mason-D'Croz, 2014).

Por otra parte, las tasas de evapotranspiración de los cultivos serían mayores, debido al aumento de la temperatura, lo que, sumado a las modificaciones

del ciclo de cultivo, podría generar un aumento de entre el 15 y el 20 % de los requisitos de riego de los principales cultivos, con lo cual es posible que las áreas de producción agrícola bajo condiciones de sequía aumenten en escenarios futuros (Fischer et al., 2007). Los fenómenos de precipitación intensa también afectarían la producción de alimentos, debido a las fuertes inundaciones, que acabarían con grandes extensiones de cultivo. Este exceso de agua también puede provocar otros impactos, como el anegamiento del suelo, la anaerobicidad y la reducción del crecimiento de las plantas, con una pérdida notable de calidad de los productos cosechados (Gornall et al., 2010).

Alteraciones por aumento de la concentración de CO₂ atmosférico

El nivel de concentración de CO₂ genera un mayor efecto invernadero de la atmósfera, debido a un aumento en el forzamiento radiactivo. Sin embargo, la concentración de CO₂ también puede afectar directamente los procesos de transpiración y fotosíntesis de las plantas (Field et al., 1995). La respuesta fisiológica al nivel de CO₂ varía entre especies, en particular si las plantas son C3 o C4. Algunos reportes mencionan que algunas plantas C3, como la soya y el trigo, podrían aumentar su tasa fotosintética hasta en un 40 %, con niveles de CO₂ superiores a 550 ppm (Long et al., 2004). Por el contrario, con niveles de CO₂ similares, plantas C4, como el sorgo, el maíz y la caña de azúcar, aumentarían su tasa fotosintética hasta en un 20 %. Sin embargo, cabe resaltar que, en términos productivos, los aumentos en rendimiento serían de 10 a 20 %, en plantas C3, y de 0 a 10 %, en plantas C4 (Ainsworth & Long, 2005).

Por último, a pesar de estos posibles efectos positivos en términos de rendimiento, los niveles elevados de CO₂ son perjudiciales para la calidad nutricional de los productos cosechados o transformados. Por ejemplo, en la harina de trigo se disminuye el contenido neto de proteínas, lípidos y minerales, lo cual sucede también con el maíz y la soya (Gornall et al., 2010).

Mitigación del cambio climático en la agricultura

Se refiere a todas las actividades y esfuerzos encaminados a reducir o prevenir la emisión de GEI y aumentar la captura de carbono mediante sumideros (Ludeña et al., 2012). Las actividades de mitigación implican el uso de nuevas tecnologías de menor impacto ambiental, la planificación del uso de energía para labores agrícolas y la implementación de prácticas de agricultura climáticamente inteligente (Zaman et al., 2021) (figura 2). Para contribuir a los esfuerzos globales de mitigación, los países deben diseñar medidas de

política agrícola capaces de sortear estas compensaciones en el contexto de sus prioridades y objetivos de política nacional (OECD, 2019).

Dentro de las actividades de mitigación del cambio climático que se pueden realizar en agricultura están la agroforestería; la implementación de sistemas silvopastoriles; el tratamiento de residuos animales y vegetales; el aumento de la eficiencia del uso de fertilizantes; la reducción de la deforestación; la gestión adecuada del suelo; la agroecología, con su concepción de la agricultura como un agroecosistema; el uso de inhibidores de nitrificación; la urea sintética, y la implementación de sistemas de ahorro, recolección y retención de agua (Zaman et al, 2021).



Figura 2. Algunas prácticas de mitigación del cambio climático en la agricultura.

Fuente: Elaboración propia

Adaptación al cambio climático en la agricultura

La adaptación al cambio climático en la agricultura se refiere a todas las actividades desarrolladas para limitar el impacto negativo que este genera y, al mismo tiempo, a la búsqueda y aprovechamiento de nuevas oportunidades encaminadas a tal fin; también implica el ajuste de políticas y acciones para solventar los cambios observados o esperados en el clima (Wreford et al., 2010). Dentro de las prácticas de adaptación más implementadas se encuentran la reducción de la sensibilidad del sistema afectado. Esto puede conseguirse, por ejemplo, mediante la inversión en construcción de infraestructura para evitar inundaciones o, por el contrario, desarrollando distritos para riego y drenaje, o plantando cultivos más resistentes a la variabilidad climática (Ignaciuk & Mason-D'Croz, 2014).

También es posible alterar la exposición de un sistema a los efectos negativos del cambio climático, mediante acciones anticipatorias, dentro de las cuales están los sistemas de alerta temprana o las predicciones climáticas (Wreford et al., 2010). Por último, otra alternativa es aumentar las resiliencias de los sistemas. Esto permitirá que un sistema y sus componentes tengan la capacidad para prever y absorber los efectos de una perturbación, adaptarse a ella y recuperarse de manera oportuna y eficaz, por ejemplo, garantizando la conservación, restablecimiento o mejora de sus estructuras y funciones básicas esenciales (Tompkins & Adger, 2004) (figura 3).

En la tabla 3 se incluyen algunos impactos del cambio climático previstos para Colombia, así como los posibles cultivos afectados y las medidas de adaptación que se deben desarrollar.

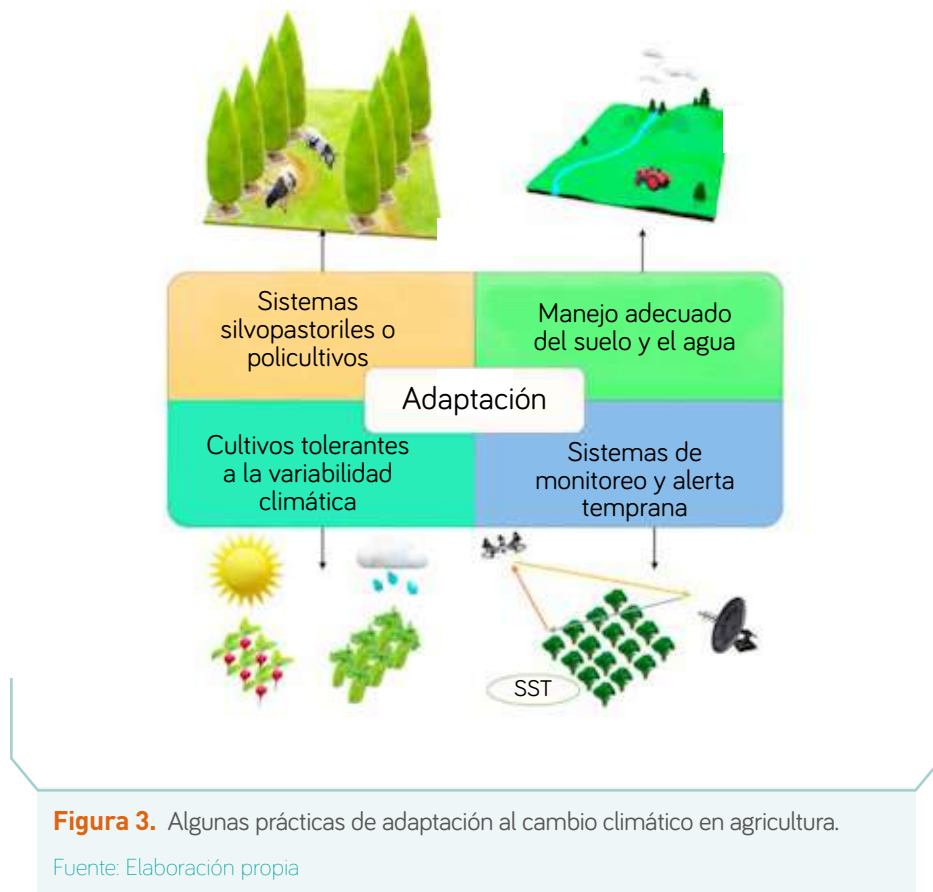


Tabla 3. Ejemplos de impactos negativos del cambio climático para Colombia y algunas estrategias de adaptación

Impactos previstos	Medidas de adaptación	Cultivos que probablemente se verán afectados
Cambios en la fenología de los cultivos.	Cambios en épocas de siembra y cosecha. Inversión en infraestructura de adecuación de tierras (riego y drenaje).	Musáceas, café, hortalizas, frutales, arroz y maíz.
Cambios en las dinámicas de plagas y enfermedades.	Investigación en genotipos resistentes. Generación de sistemas de alerta temprana.	Café, yuca, papa, frutales, hortalizas.
Intensificación de los procesos de degradación del suelo.	Manejo de labranza de conservación. Aumento de la resiliencia del suelo.	Cultivos en ladera y ganadería de los trópicos alto y bajo.
Pérdida gradual de la aptitud climática de cultivos y pasturas.	Desarrollo de prácticas para sistemas agrícolas con mayor resistencia al aumento de la temperatura.	Caña de azúcar, papa, cítricos, café.

Continúa en la página 26...

... continuación tabla 3.

Aumento de la vulnerabilidad de pequeños productores.	Se debe realizar investigación, desarrollo e inversión en nuevas tecnologías, así como programas de transferencia a los agricultores para masificar su adopción.	Todos los cultivos.
Aumento del riesgo biótico y abiótico sobre el desarrollo de los cultivos en sistemas de producción a campo abierto.	Investigación y desarrollo de nuevas prácticas de cultivo en ambientes protegidos.	Hortalizas, frutales.
Aumento de la vulnerabilidad de los cultivos al estrés por sequía.	Establecer estrategias de manejo del riego y la fertilización, así como de las especies resistentes o tolerantes al estrés por sequía.	Papa, pastos, hortalizas.

Fuente: Elaboración propia con base en Lau et al. (2011)

Conclusiones

En la actualidad, aún son inciertas las verdaderas consecuencias que el cambio climático producirá sobre el planeta, por lo que la crisis climática que se viene presentando hace algunos años ha dejado en evidencia la débil capacidad de respuesta gubernamental ante los evidentes problemas que genera el aumento descontrolado de los periodos de sequía y de lluvia extrema. Por ello, la adaptación que ha de adelantarse en el sector agrícola debe pasar por mejorar el manejo cultural de los sistemas productivos, y por un manejo agronómico eficiente, que tenga en cuenta el entorno y considere que tanto el cultivo como el ambiente que lo rodea son un solo sistema. Únicamente así se podrá generar e implementar un modelo de producción sostenible.

Por último, es importante mencionar que se requiere fortalecer políticas públicas que permitan una mayor inversión en investigación enfocada en la medición de la generación de los GEI producidos en actividades agrícolas y de su impacto en el ambiente. Asimismo, es importante seguir impulsando prácticas de adaptación y mitigación en el sector agrícola y pecuario.

Referencias

- Ackerman, F., & Stanton, E. A. (2013). *Climate impacts on agriculture: a challenge to complacency?* [GDAE Working Paper 13-01: Climate Impacts on Agriculture], Global Development and Environment Institute.
- Ainsworth, E. A., & Long, S. P. (2005). What have we learned from 15 years of free-air CO₂ enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO₂. *New Phytologist*, 165(2), 351-372.
- Wreford, A., Moran, D., & Adger, N. (2010). *Climate change and agriculture impacts, adaptation and mitigation: impacts, adaptation and mitigation*. OECD Publishing.
- Bojacá, C. R., Villagrán, E. A., Gil, R., & Franco, H. (2017). *El riego y la fertilización del cultivo del tomate*. Universidad Jorge Tadeo Lozano.
- Conchedda, G., & Tubiello, F. N. (2020). Drainage of organic soils and GHG emissions: validation with country data. *Earth System Science Data*, 12(4), 3113-3137.
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe [Cepal]. (2011). *Agricultura y cambio climático: instituciones, políticas e innovación* [Memorias del seminario internacional realizado en Santiago, los días 10 y 11 de noviembre de 2010].
- Dawadi, B., Shrestha, A., Acharya, R. H., Dhital, Y. P., & Devkota, R. (2022). Impact of climate change on agricultural production: a case of Rasuwa District, Nepal. *Regional Sustainability*, 3(2), 122-132.
- Field, C. B., Jackson, R. B., & Mooney, H. A. (1995). Stomatal responses to increased CO₂: implications from the plant to the global scale. *Plant, Cell & Environment*, 18(10), 1214-1225.
- Fischer, G., Tubiello, F. N., Van Velthuisen, H., & Wiberg, D. A. (2007). Climate change impacts on irrigation water requirements: effects of mitigation, 1990-2080. *Technological Forecasting and Social Change*, 74(7), 1083-1107.
- Gornall, J., Betts, R., Burke, E., Clark, R., Camp, J., Willett, K., & Wiltshire, A. (2010). Implications of climate change for agricultural productivity in the early twenty-first century. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 365(1554), 2973-2989.
- Gruda, N., Bisbis, M., & Tanny, J. (2019). Influence of climate change on protected cultivation: impacts and sustainable adaptation strategies-A review. *Journal of Cleaner Production*, 225, 481-495.
- Ignaciuk, A., & Mason-D'Croz, D. (2014). *Modelling adaptation to climate change in agriculture* [OECD Food, Agriculture and Fisheries Papers]. OECD.
- Lau, C., Jarvis, A., & Ramírez Villegas, J. (2011). *Agricultura colombiana: adaptación al cambio climático*. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). <https://cgspace.cgiar.org/handle/10568/57475>

- Le Quéré, C., Andrew, R. M., Friedlingstein, P., Sitch, S., Pongratz, J., Manning, A. C., Korsbakken, J. I., Peters, G. P., Canadell, J. G., & Jackson, R. B. (2018). Global carbon budget 2017. *Earth System Science Data*, 10(1), 405-448.
- Lobell, D. B., & Field, C. B. (2007). Global scale climate-crop yield relationships and the impacts of recent warming. *Environmental Research Letters*, 2(1), 1-7.
- Long, S. P., Ainsworth, E. A., Rogers, A., & Ort, D. R. (2004). Rising atmospheric carbon dioxide: plants face the future. *Annual Review of Plant Biology*, 55, 591-628.
- Ludeña, C., Wilk, D., & Deeb, A. (2012). *Ecuador: mitigación y adaptación al cambio climático. Marco de la preparación de la estrategia, 2017* [Nota Técnica n.º IDB-TN-619]. Banco Interamericano de Desarrollo.
- Lynch, J., Cain, M., Frame, D., & Pierrehumbert, R. (2021). Agriculture's contribution to climate change and role in mitigation is distinct from predominantly fossil CO₂-emitting sectors. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4, 1-9. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fsufs.2020.518039/full>
- Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., & Gomis, M. I. (2021). *Climate change 2021: the physical science basis* [Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change], IPCC. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- Mbow, C., Rosenzweig, C., Barioni, L. G., Benton, T. G., Herrero, M., Krishnapillai, M., Liwenga, E., Pradhan, P., Rivera-Ferre, M.-G., & Sapkota, T. (2019). Food security. En *Climate Change and Land: An IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse Gas Fluxes in Terrestrial Ecosystems*. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Organization for Economic Co-operation and Development [OECD]. (2019). *Enhancing Climate Change Mitigation Through Agriculture*.
- Piao, S., Fang, J., Zhou, L., Ciais, P., & Zhu, B. (2006). Variations in satellite derived phenology in China's temperate vegetation. *Global Change Biology*, 12(4), 672-685.
- Rahman, S., & Anik, A. R. (2020). Productivity and efficiency impact of climate change and agroecology on Bangladesh agriculture. *Land Use Policy*, 94, 104507.
- Ritchie, J. T., & Nesmith, D. S. (1991). Temperature and crop development. *Modeling Plant and Soil Systems*, 31, 5-29.
- Selbonne, S., Guindé, L., Belmadani, A., Bonine, C., Causeret, F. L., Duval, M., Sierra, J., & Blazy, J. M. (2022). Designing scenarios for upscaling climate-smart agriculture on a small tropical island. *Agricultural Systems*, 199, 1-38.
- Tompkins, E. L., & Adger, W. N. (2004). Does adaptive management of natural resources enhance resilience to climate change? *Ecology and Society*, 9(2), 10.
- Tubiello, F. N., Salvatore, M., Ferrara, A. F., House, J., Federici, S., Rossi, S., Biancalani, R., Condor Golec, R. D., Jacobs, H., & Flammini, A. (2015). The contribution of agriculture, forestry and other land use activities to global warming, 1990-2012. *Global Change Biology*, 21(7), 2655-2660.

Capítulo I. Generalidades de la relación entre agricultura y cambio climático

Villagrán, E. A. & Rodríguez, A. (2021). Analysis of the thermal behavior of a new structure of protected agriculture established in a region of tropical climate conditions. *Fluids*, 6(6), 223.

Yohannes, H. (2016). A review on relationship between climate change and agriculture. *Journal of Earth Science & Climatic Change*, 7(2), 8. <https://www.omicsonline.org/open-access/a-review-on-relationship-between-climate-change-and-agriculture-2157-7617-1000335.pdf>

Zaman, M., Heng, L., & Müller, C. (2021). *Measuring emission of agricultural greenhouse gases and developing mitigation options using nuclear and related techniques: Applications of nuclear techniques for GHGs*. Springer Nature.



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

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	<p>Modelo concebido en la década de los setenta.</p> <p>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 cumbre (D), entre 4,5 y 5,5 m.</p> <p>Se pueden encontrar invernaderos con áreas cubiertas desde 3.000 hasta los 12.000 m².</p>
Ventajas	<p>Versátil en su construcción.</p> <p>Modelo de bajo costo.</p> <p>Modelo construido con materiales estructurales de origen local.</p>
Desventajas	<p>Requiere de mantenimiento frecuente.</p> <p>Posee una alta heterogeneidad térmica.</p> <p>Tiene limitadas tasas de ventilación.</p> <p>Presenta fenómenos de inversión térmica.</p>

Fuente: Elaboración propia

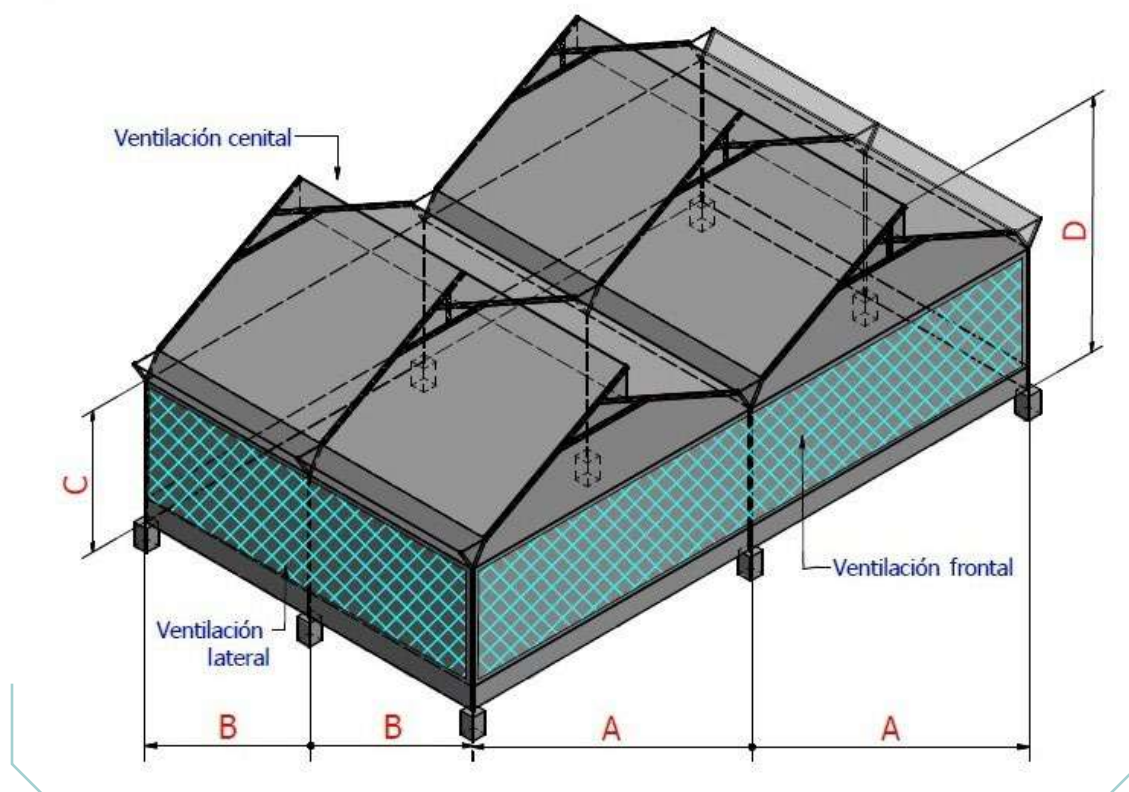


Figura 4. Arquitectura típica del invernadero tradicional colombiano.

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).

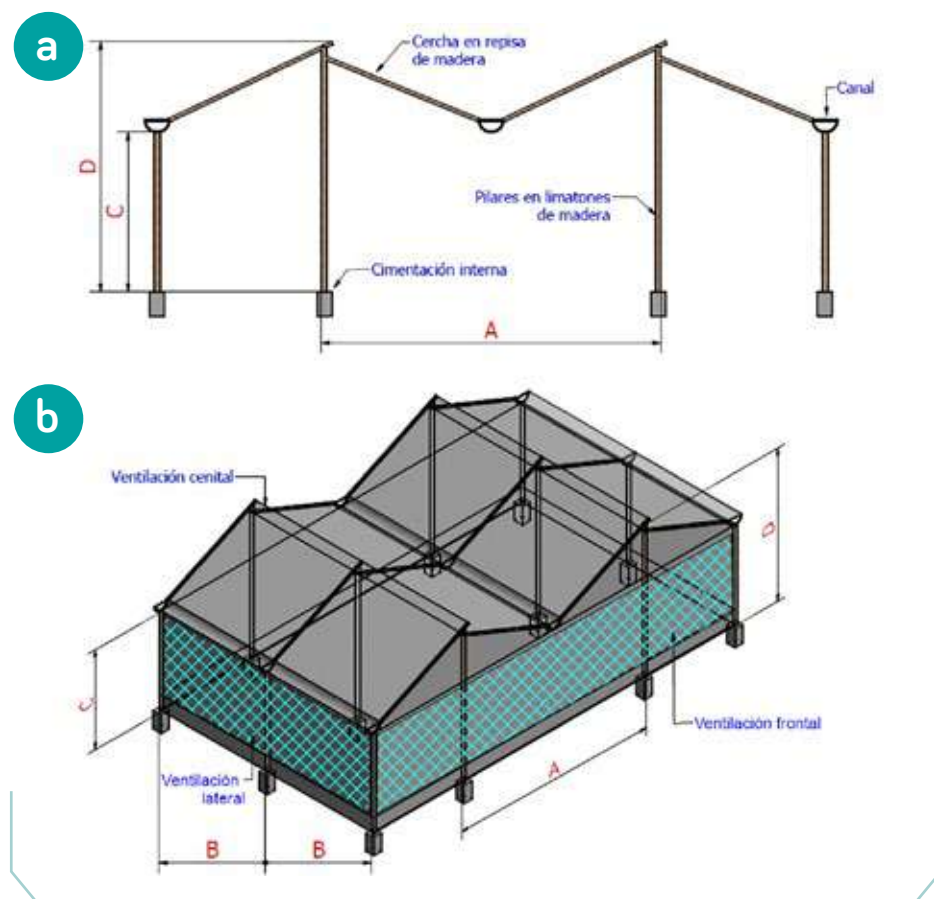


Figura 5. Esquema general del invernadero colgante a. Esquema geométrico del pórtico; b. Arquitectura típica del invernadero colgante.

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	<p>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.</p> <p>Se pueden encontrar invernaderos con áreas cubiertas de 4.000 hasta los 9.000 m².</p>
Ventajas	<p>Modelo de bajo costo.</p> <p>Modelo construido con materiales estructurales de origen local.</p> <p>Tiene una mayor inercia térmica, en comparación con el invernadero tradicional.</p> <p>Mejor aprovechamiento de la superficie de suelo cubierto.</p>
Desventajas	<p>Requiere de mantenimiento frecuente.</p> <p>Posee una alta heterogeneidad térmica.</p> <p>Tiene limitadas tasas de ventilación.</p> <p>Presenta fenómenos de condensación sobre los cultivos.</p>

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	<p>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.</p> <p>Se pueden encontrar invernaderos con áreas cubiertas de 5.000 hasta los 16.000 m².</p>
Ventajas	<p>Modelo con menos elementos estructurales para mantenimiento.</p> <p>Mejor aprovechamiento de la superficie de suelo cubierto respecto a los invernaderos tradicionales.</p> <p>Menor nivel de sombra sobre la región donde se desarrollan los cultivos.</p>

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

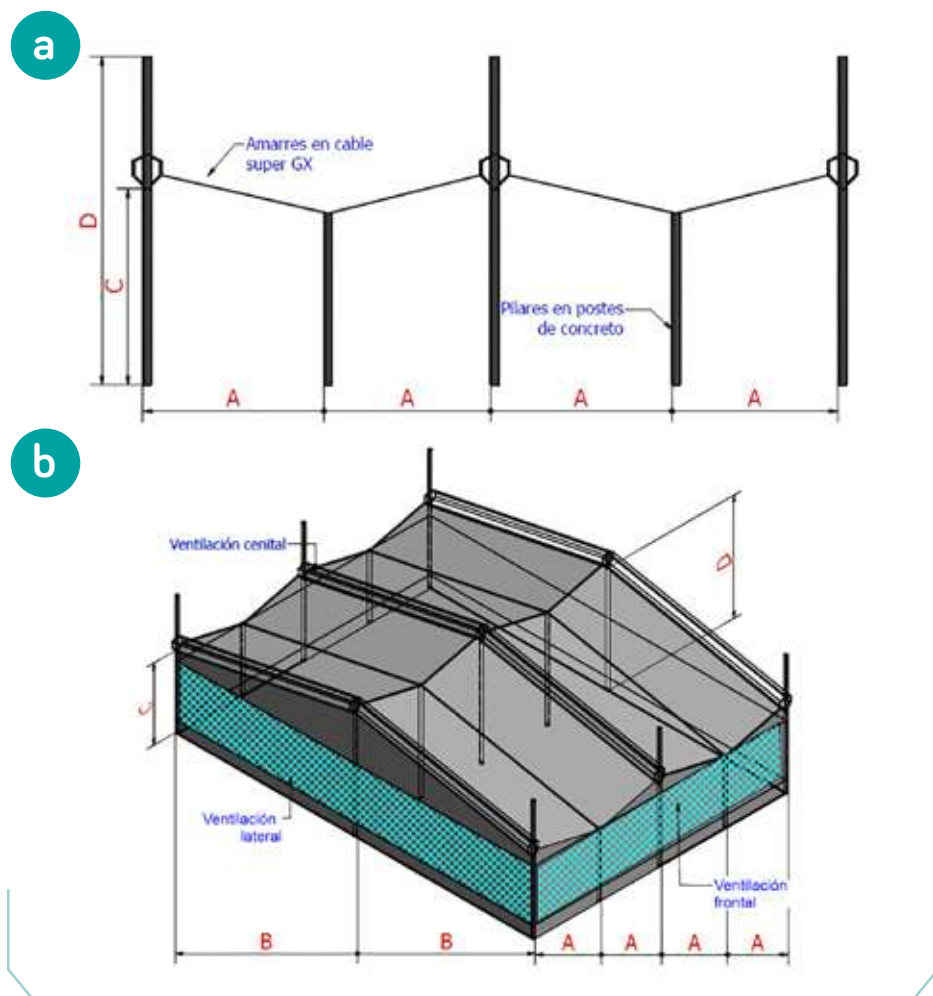


Figura 6. Esquema general del invernadero espacial a. Esquema geométrico del pórtico; b. Arquitectura típica del invernadero espacial.

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	<p>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.</p> <p>Se pueden encontrar invernaderos con áreas cubiertas de 5.000 hasta los 10.000 m².</p>
Ventajas	<p>Tiene una mayor inercia térmica en comparación con el invernadero tradicional.</p> <p>Menores costos económicos asociados a mantenimiento de la estructura.</p> <p>Mejor comportamiento de los flujos de aire.</p> <p>Mayor aprovechamiento de la radiación solar.</p> <p>Mejor aprovechamiento de la superficie de suelo cubierto.</p> <p>Permite la instalación de mayores áreas de ventilación.</p> <p>Mejor versatilidad para la construcción de la estructura.</p>
Desventajas	<p>Estructura metálica que requiere de inversión económica más alta.</p> <p>Tiene tasas de ventilación aceptables.</p> <p>Fenómenos de inversión térmica cuando no se cierran las áreas de ventilación cenital fijas.</p>

Fuente: Elaboración propia

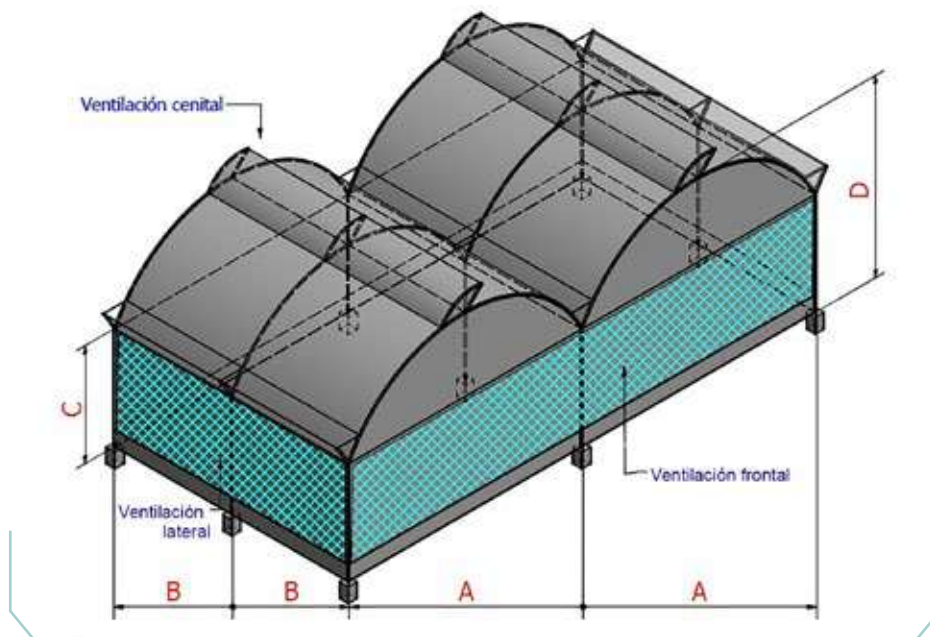


Figura 7. Arquitectura típica del invernadero tipo túnel.

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.

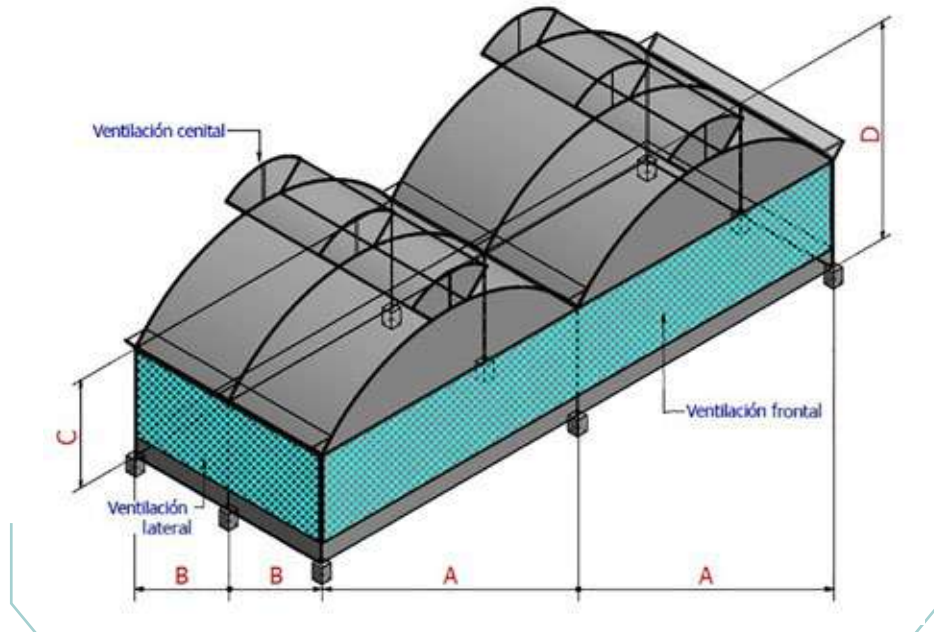


Figura 8. Arquitectura del invernadero tipo túnel con doble ventilación cenital fija.

Fuente: Elaboración propia

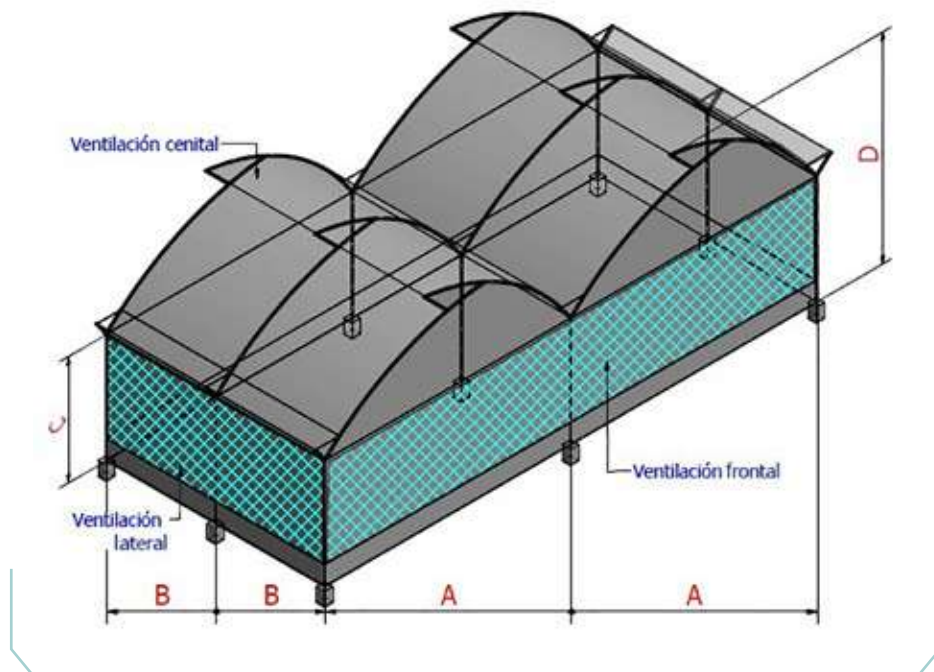


Figura 9. Arquitectura del invernadero tipo túnel con cubierta gótica.

Fuente: Elaboración propia

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

Características	<p>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.</p> <p>Se pueden encontrar invernaderos con áreas cubiertas de 3.000 hasta los 5.000 m².</p>
Ventajas	<p>Tiene una mayor inercia térmica en comparación con los invernaderos tradicionales.</p> <p>Menores costos económicos asociados a mantenimiento de la estructura.</p> <p>Mejor comportamiento de los flujos de aire.</p> <p>Mayor aprovechamiento de la radiación solar.</p> <p>Permite la instalación de mayores áreas de ventilación.</p> <p>Presenta tasas de ventilación adecuadas para un invernadero ventilado de forma natural.</p> <p>Mejor ventilación por efecto chimenea.</p>
Desventajas	<p>Estructura metálica que requiere de mayor inversión económica y de elementos estructurales más robustos debido a sus mayores alturas.</p>

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	<p>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.</p> <p>Se pueden encontrar invernaderos con áreas cubiertas de 2.000 hasta los 10.000 m².</p>
Ventajas	<p>Menores costos económicos asociados a mantenimiento de la estructura.</p> <p>Amplia área de ventilación.</p> <p>Adecuada aerodinámica de los flujos de aire bajo velocidades de viento exterior moderadas*.</p>

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

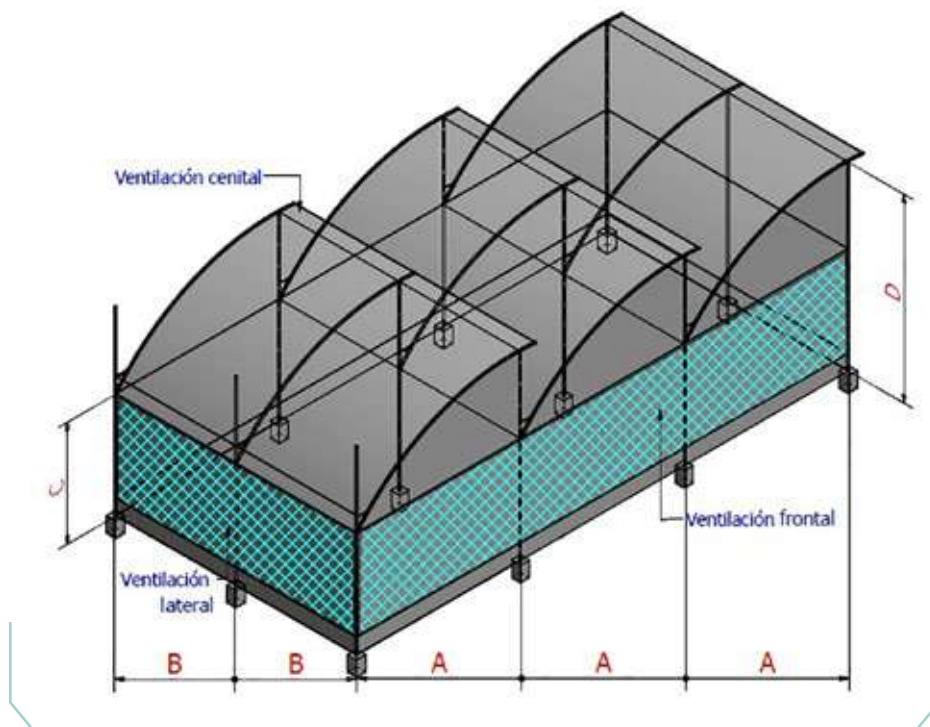


Figura 10. Arquitectura del invernadero tipo diente sierra.

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).

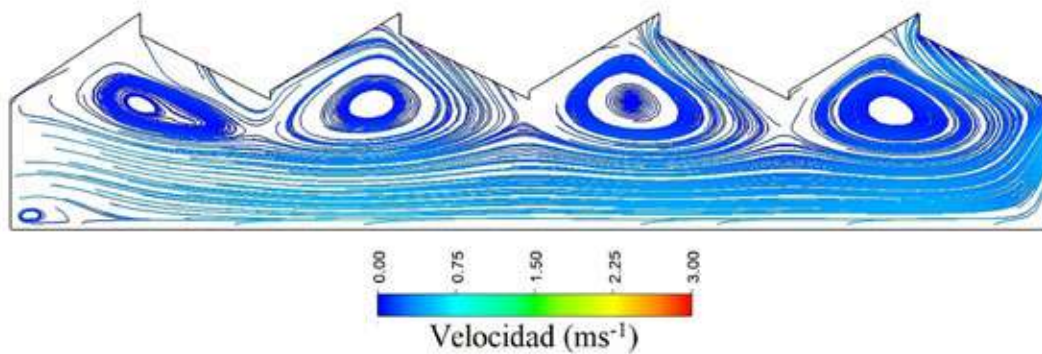


Figura 11. Flujo de aire en un invernadero tradicional colombiano.

Fuente: Elaboración propia

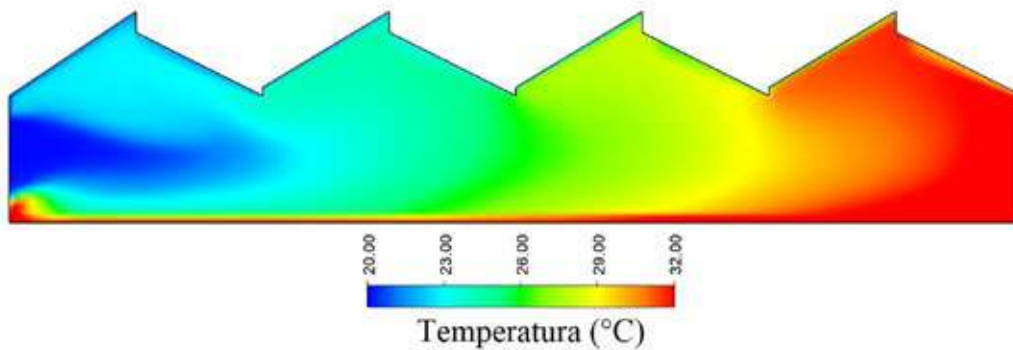


Figura 12. Distribución espacial de la temperatura en el interior de un invernadero tradicional colombiano.

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.

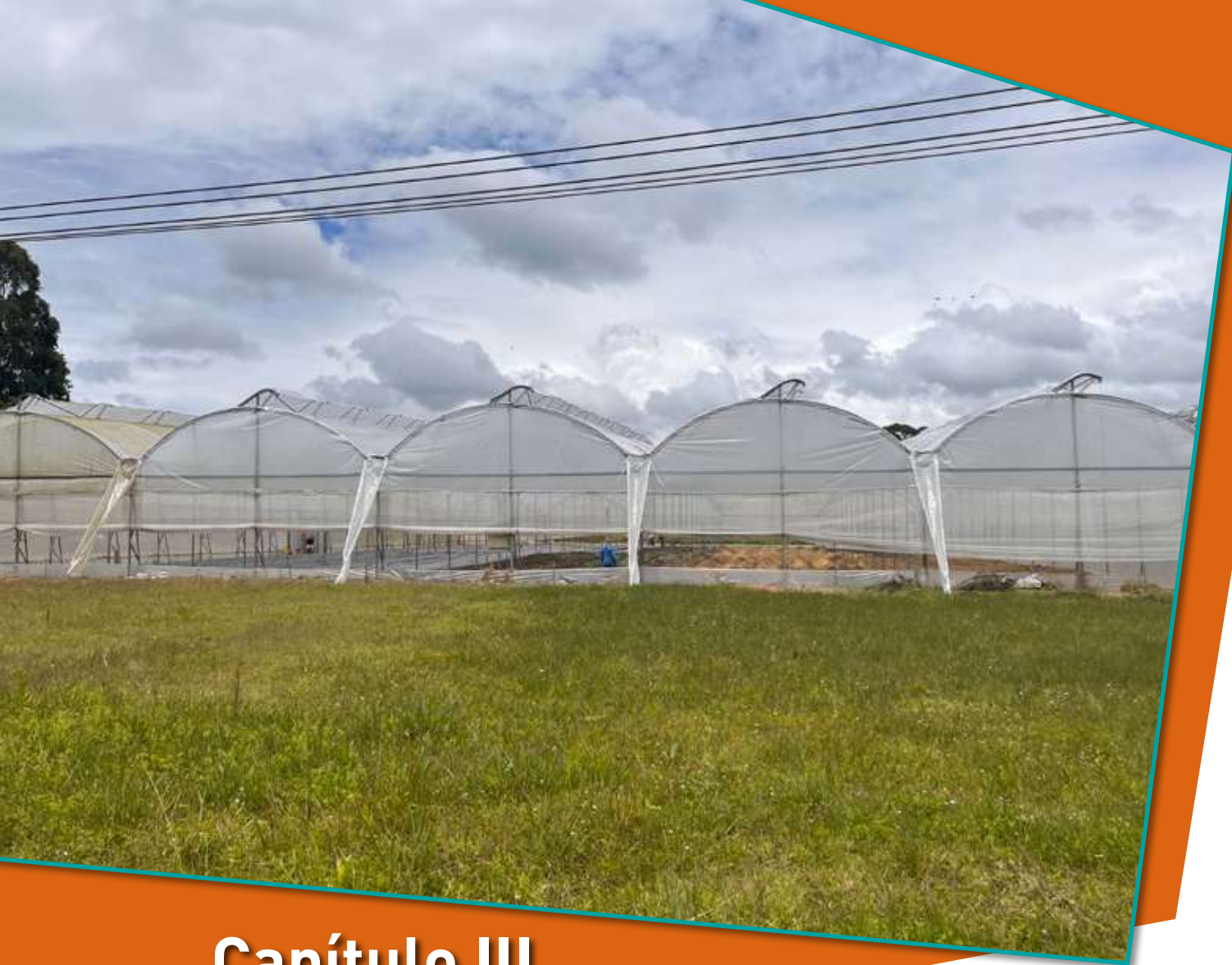
Referencias

- 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., & Schrevens, 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 multitunel 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., & Schrevens, 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>

Capítulo II. Generalidades de los invernaderos colombianos usados en el trópico altoandino

- 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>



Capítulo III

48

Criterios para la selección de la ubicación adecuada para la construcción de una estructura de invernadero

Edwin Andrés Villagrán Munar
Iván Edilberto Chacón Garzón
Linda Gómez Arias

Introducción

El área cultivada bajo estructuras de agricultura protegida a nivel mundial ha aumentado notablemente en las últimas décadas. En la actualidad, existen aproximadamente 6 millones de hectáreas cultivadas bajo estructuras de diferente nivel tecnológico y enfocadas en la producción de frutas, hortalizas, flores, y plantas aromáticas y medicinales (Baeza et al., 2020). El cultivo bajo condiciones protegidas o bajo invernadero se establece con el fin de generar unas condiciones de microclima óptimas para el crecimiento y desarrollo de las plantas. Por lo anterior, es posible intensificar la producción agrícola y obtener un mayor rendimiento en los cultivos respecto a la producción a campo abierto (Sánchez-Molina et al., 2017).

Uno de los factores clave del éxito en la producción bajo cubierta rentable y sostenible es la selección de la ubicación del invernadero (Castilla, 2013). Sin duda alguna, el sitio seleccionado influirá en la cantidad y calidad de la producción, así como en la rentabilidad obtenida de la venta de los productos en los mercados específicos (Baudoin et al., 2013). Por otro lado, el costo y la calidad de los productos finales obtenidos en el invernadero dependerán en gran medida de las condiciones de clima local dominantes en el sitio o región seleccionada. Asimismo, estas condiciones de clima local determinarán el grado de inversión que se debe realizar en la construcción de la infraestructura, tanto para el nivel tecnológico del invernadero como para los equipamientos de control necesarios en la gestión microclimática (Castilla & Hernández, 2005).

En este capítulo, se incluyen algunas recomendaciones generales para la selección del sitio óptimo para la construcción de un invernadero o de cualquier otro tipo de estructura de agricultura protegida.

Estrategias de producción en invernaderos

En el momento que decide incursionar en la agricultura protegida como estrategia de producción alternativa respecto a la de campo abierto, un productor o un empresario del sector agrícola debe definir los siguientes aspectos: i) qué tipo de productos agrícolas se producirán en el interior del invernadero y ii) cuáles serán los mercados objetivo de los productos cosechados. Lo anterior determinará en cierta medida el tipo de infraestructura que se debe construir, lo que a su vez determinará si el productor debe enfocarse en el control microclimático activo o en el pasivo (Castilla & Hernández, 2005).

Los métodos pasivos de climatización predominan a nivel mundial, ya que son estrategias de bajo costo, muy asociadas a invernaderos de baja tecnología (Villagrán & Bojacá, 2020). Este tipo de manejo microclimático se enfoca principalmente en la ventilación natural de los invernaderos como herramienta de control para regular la temperatura, la humedad relativa y el nivel de CO_2 (Baeza, 2007). Sin embargo, este tipo de manejo es altamente dependiente de las condiciones climáticas locales y de la adaptación de las plantas al microclima generado, por lo tanto, en algunas regiones la producción agrícola queda restringida a unos meses específicos del año (Teitel et al., 2011).

Por el contrario, los métodos de climatización activa se asocian a invernaderos de alta o mediana tecnología, con los que se busca optimizar el microclima generado en el interior, con el fin de brindar a las plantas un ambiente con condiciones óptimas para su crecimiento y desarrollo. Así, este tipo de control de clima requiere de equipos robustos y de la energía necesaria para el acondicionamiento climático. El tipo de control de clima seleccionado, por lo tanto, estará estrechamente relacionado con la competitividad y la calidad comercial de los productos que exige el mercado objetivo (Castilla, 2013).

Microclima generado

La construcción de un invernadero o de una estructura de agricultura protegida permite generar un microclima en el aire circundante al cultivo. La modificación de las condiciones de microclima ocurre por efecto invernadero debido a la radiación solar que incide en el interior de la estructura (Villagrán et al., 2020). Asimismo, el microclima es modificado por la dinámica de los patrones de flujo de aire que se movilizan por vía de convección libre o forzada, al tiempo que las relaciones de transferencia de calor y de masa que ocurren entre el aire y las plantas de cultivo son determinantes en la generación del microclima (Majdoubi et al., 2016) (figura 13).

La finalidad de un invernadero es proveer a las plantas de las condiciones microclimáticas óptimas para garantizar su adecuado crecimiento y desarrollo, además de acelerar los ciclos de cultivo y obtener altos rendimientos (Flores-Velázquez, 2010). Por otra parte, un invernadero puede brindar al productor la posibilidad de alcanzar un grado de gestión mediante el cual sea posible modificar las condiciones microclimáticas del invernadero, hasta lograr llevarlas a los niveles adecuados para las especies cultivadas (Villagrán et al., 2020).

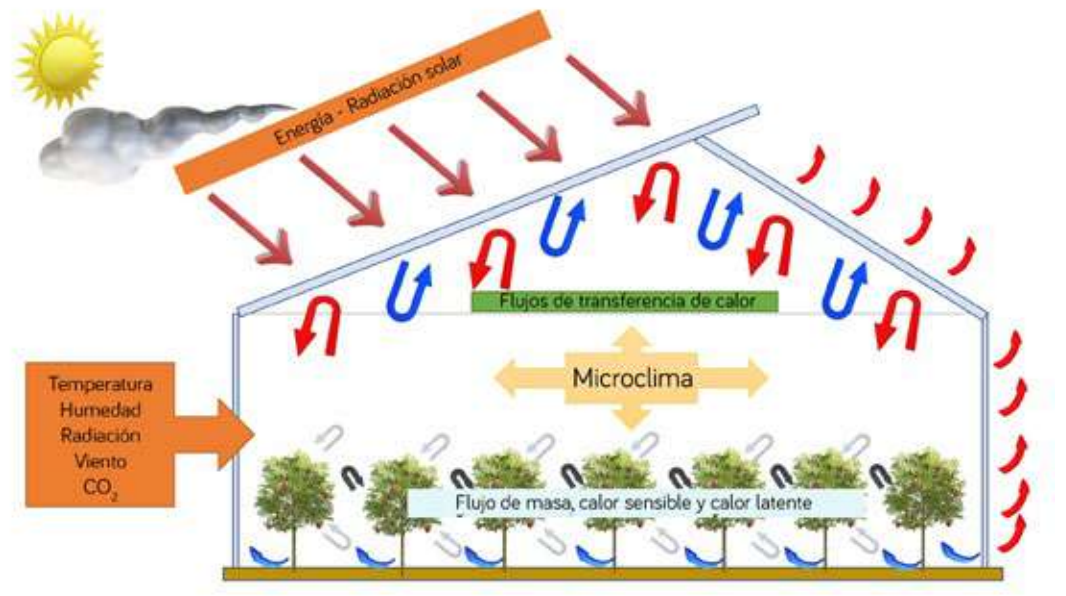


Figura 13. Balances de masa y energía que ocurren en un invernadero.

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con lo anterior, se debe mencionar que las principales variables microclimáticas a controlar en el interior de un invernadero son la temperatura ambiental y la temperatura del suelo y de la hoja, dependientes de la temperatura ambiental, la humedad relativa, el déficit de presión de vapor (DPV), el nivel de radiación solar y de radiación fotosintéticamente activa (PAR), y la concentración de CO_2 (Montero et al., 2016). Por lo tanto, el control y la definición de los rangos en que estas variables deben operar dependerán en gran medida del tipo de especie cultivada que se tenga en el invernadero.

En regiones como Colombia, de acuerdo con sus condiciones climáticas, sociales y económicas, lo ideal es lograr la gestión del microclima a través de métodos pasivos que no requieran de grandes inversiones y consumos energéticos. Lo anterior promueve, sin duda, el desarrollo de sistemas productivos bajo agricultura protegida asequibles y rentables para los agricultores. Por último, en el caso específico de que se requieran equipos de acondicionamiento climático, se recomienda al productor hacer un análisis económico previo a la inversión inicial, con el fin de determinar la rentabilidad del sistema productivo.

Ubicación del invernadero

Topografía

La topografía del terreno donde se construya el invernadero debe tener, preferiblemente, unas pendientes longitudinales y transversales inferiores al 2%. Los sitios con mayor pendiente requerirán de labores de nivelación de terreno, que aumentarán los costos de construcción de la estructura. Por otro lado, en países como Colombia, donde predominan los terrenos dedicados a la producción agrícola en zonas de ladera, es posible construir invernaderos en terrenos con pendiente. Sin embargo, la recomendación, en estos casos específicos, es analizar el sentido de movimiento de los vientos, el sentido en que cae la lluvia y las curvas de nivel de los terrenos, todo esto con el fin de garantizar buenas tasas de renovación de aire, un microclima uniforme y adecuado, y una apropiada evacuación del agua de lluvia (Villagrán et al., 2021). Por último, no es recomendable que los productores establezcan los invernaderos en terrenos con áreas significativamente hondonadas, ya que esta tipología de terrenos dificulta la gestión microclimática de invernadero, las labores de riego y otras actividades asociadas al manejo agronómico de los cultivos (figura 14).

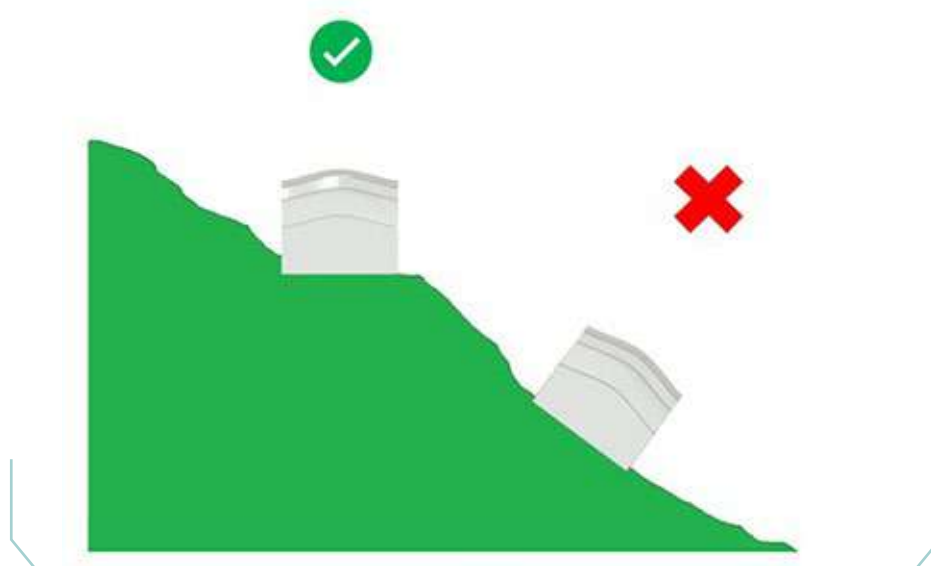


Figura 14. Topografía adecuada para establecer un invernadero.

Fuente: Elaboración propia

Clima

La sostenibilidad de un cultivo bajo invernadero dependerá directamente de las condiciones climáticas del sitio seleccionado para la construcción de la estructura. Por lo tanto, es necesario que, previamente a la construcción del invernadero, se analicen los valores de las variables meteorológicas de temperatura, humedad relativa, radiación solar, velocidad y dirección del viento. Estas, en conjunto, sumadas a la concentración de CO₂, determinarán las condiciones de microclima generadas en el interior del invernadero (Molina-Aiz et al., 2005; Sase, 2006) (figura 15).

En el caso de los productos hortofrutícolas, que son las especies más cultivadas bajo cubierta a nivel mundial, entre las que se destacan productos como tomate, pimentón, pepino, lechuga, melón y sandía, es recomendable seleccionar regiones donde la temperatura media oscile entre 17 y 22 °C, la temperatura máxima no supere los 32 °C y la temperatura mínima no se encuentre por debajo de 16 °C. Asimismo, el valor medio de la humedad relativa debe ser cercano al 70 % y la radiación solar mínima debe ser de 2,34 kWh/m², con horas de luz superiores a seis horas al día (FAO, 1988).

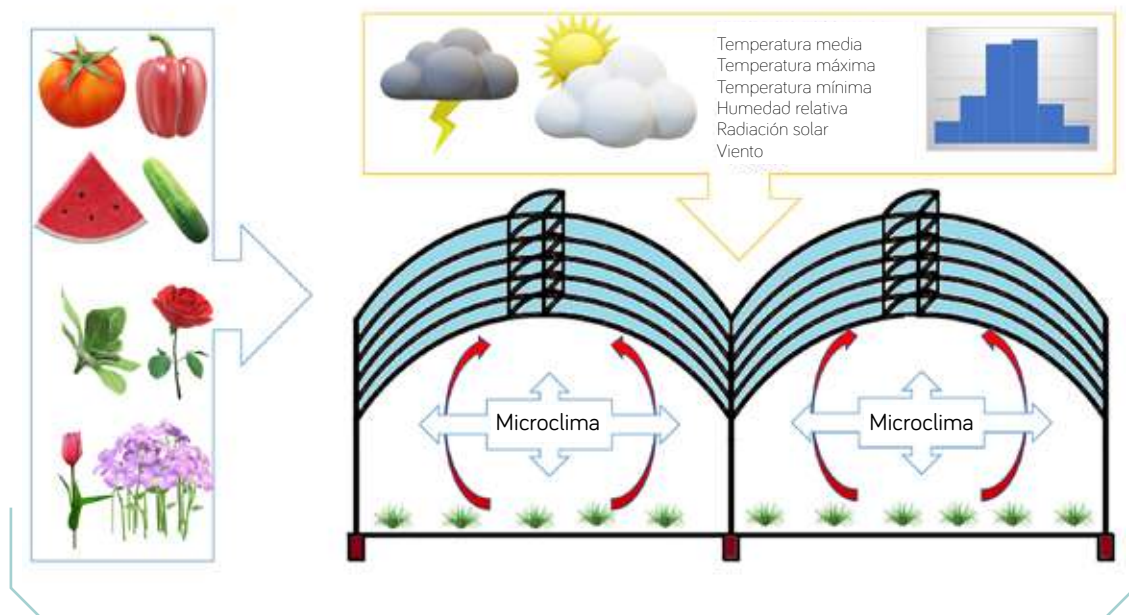


Figura 15. Factores de clima que inciden en la producción bajo invernadero.

Fuente: Elaboración propia

En el caso de los productos ornamentales, que se comercializan principalmente en el mercado internacional y entre los que se destacan especies como rosa, clavel y crisantemo (Villagrán & Bojacá, 2019b), es recomendable buscar regiones donde la temperatura media se encuentre entre 14 y 17 °C, con valores de temperatura máxima de 25 °C y temperaturas mínimas de 8 °C. En el caso de la humedad relativa, esta debe tener un valor medio de 70 a 75 %, con valores mínimos de 60 % y máximos de 90 %. En términos de luminosidad, se requieren 11 horas de luz y regiones con vientos entre 1,5 y 3,0 m/s, lo cual promueve mayores tasas de ventilación y, por lo tanto, una mejor gestión del microclima (Villagrán & Bojacá, 2019a). Se recomienda que, antes de seleccionar la región donde se construirá el invernadero, el productor haga un análisis inicial de las series históricas de clima, las cuales pueden estar disponibles en las bases de datos correspondientes a las estaciones meteorológicas del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam), o de redes de meteorología privadas que puedan facilitar esta información, tales como Canal Clima.

Características del suelo

El suelo o sustrato que se empleará para el establecimiento de los sistemas productivos, bien sea en macetas, bandejas germinadoras o directamente en el suelo, debe cumplir con las propiedades físicas, químicas y microbiológicas adecuadas para la producción agrícola que se desea establecer (figura 16). Si por algún motivo estas características no se cumplen, es recomendable establecer prácticas presiembra de acondicionamiento, con el fin de mejorar la calidad del suelo, ya que de esta dependerán en gran medida la productividad y la sanidad de los cultivos. Con la implementación de prácticas de manejo del suelo se busca mejorar la estabilidad estructural, la infiltración, la retención de humedad, y la disponibilidad de agua y fertilizantes para las plantas (Manik et al., 2019).

Asimismo, si el sistema productivo se va a establecer bajo sistemas de producción de cultivo sin suelo, ya sea con el uso de contenedores para sustratos inertes, hidroponía o aeroponía, se recomienda que el terreno donde se construya el invernadero tenga las características físicas mínimas que garanticen la estabilidad y la duración en el tiempo de las estructuras de soporte para el establecimiento y desarrollo del cultivo. Las técnicas de cultivo sin suelo permiten optimizar el uso del agua y de los fertilizantes, mejorando de esta forma la disponibilidad de nutrientes para el crecimiento de las plantas y, por ende, su rendimiento productivo. Del mismo modo, esta práctica permite que se desarrolle la agricultura en regiones donde el suelo no reúne las características mínimas para la producción agrícola, debido a problemas sanitarios o de degradación física y química (Fernández, 1994).

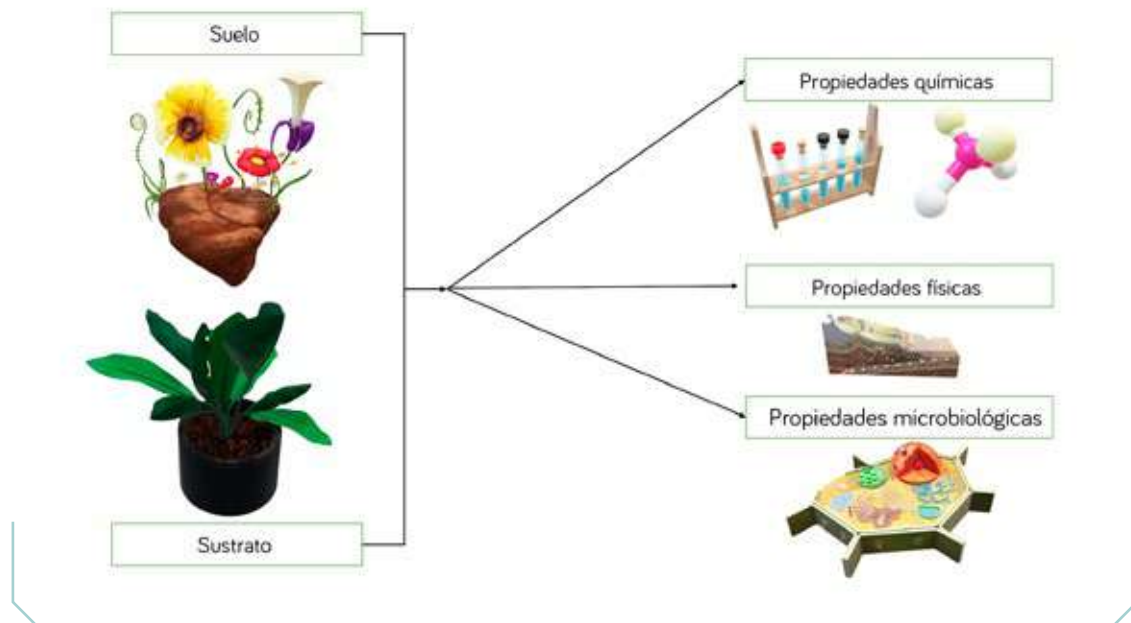


Figura 16. Características de suelos y sustratos relevantes para la producción agrícola bajo invernadero.

Fuente: Elaboración propia

Disponibilidad de agua para labores de riego

El sitio seleccionado también deberá tener disponibilidad de agua para fines de riego. El agua puede venir de una fuente superficial o subterránea, y se debe garantizar la cantidad necesaria para satisfacer los requerimientos hídricos de los cultivos. Asimismo, es importante que el recurso sea de fácil aprovechamiento y pueda almacenarse a nivel finca (Bojacá et al., 2017) (figura 17). Por lo tanto, es indispensable que el tipo de agua que se utiliza presente una calidad mínima para fines de irrigación y fertirrigación, con el fin de evitar problemas de salinidad en los suelos de los sistemas productivos que son establecidos directamente sobre el terreno, o problemas de toxicidad en las plantas y productos de cultivo.

La calidad del recurso hídrico en la agricultura bajo invernadero es un componente muy importante, ya que garantiza o limita los altos rendimientos de los cultivos. Por lo tanto, es recomendable realizar análisis de calidad del agua con los que se determinen, como mínimo, las siguientes características: sólidos disueltos totales, concentración de sales disueltas, presencia relativa de sodio, nivel de pH, contenido de bicarbonatos y carbonatos, y, por último, la

presencia de manganeso, hierro, boro y cloro. Los elementos anteriormente mencionados determinan el balance final de nutrientes que debe tener la solución nutritiva que se suministrará a las plantas mediante el agua de riego. Asimismo, estas características determinarán las labores de filtrado y acondicionamiento (desalinización, corrección del pH, acidificación, adición de bicarbonatos, control microbiológico) que se deben realizar, con el fin de prevenir taponamientos y malos funcionamientos de los sistemas de riego y fertirriego (Gómez et al., 2015). En la tabla 10, se incluyen algunas características relevantes que se deben tener en cuenta en el agua usada para riego.

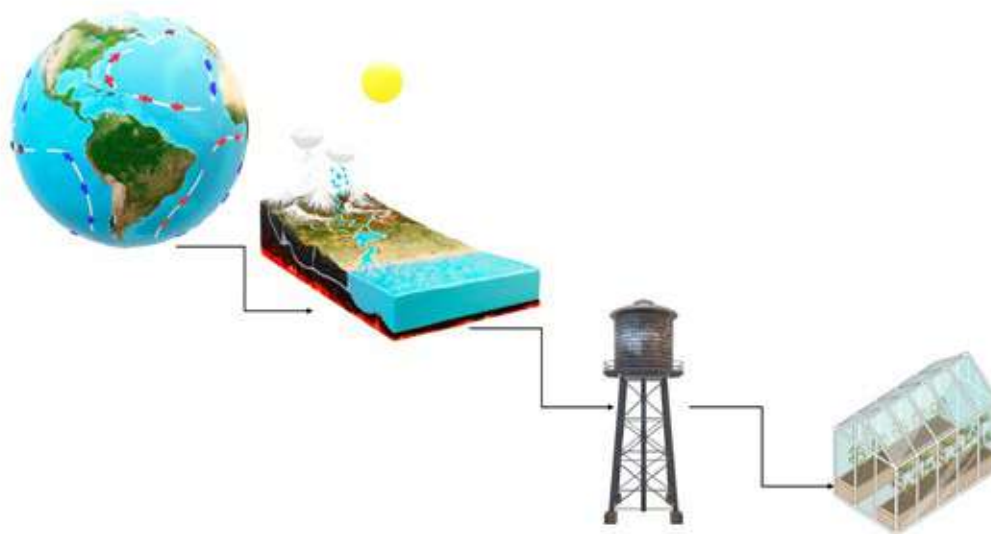


Figura 17. Fuentes de disponibilidad de agua y almacenamiento para fines de riego.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 10. Características relevantes en el agua usada para riego

Característica	Recomendación
Fuente de agua.	Puede ser una fuente superficial o subterránea. Es importante que, antes de ser usada en riego, se realice un análisis en un laboratorio certificado, para determinar la calidad física, química y microbiológica del agua. De no ser posible realizar un análisis en el laboratorio, por lo menos debe hacerse en campo un análisis simplificado utilizando instrumentos portátiles, como el conductímetro y medidor de pH.
Sistemas de filtrado.	Los resultados del análisis de calidad de agua permitirán establecer los tipos de filtros de agua que se deben implementar en el sistema de riego y los tratamientos adicionales que deban realizarse para acondicionar el agua para tal fin. Todo esto permitirá realizar las actividades de riego y fertirriego sin poner en riesgo el crecimiento y desarrollo de las plantas, y el buen funcionamiento de los sistemas de irrigación.
Nivel de pH.	El nivel de pH óptimo del agua para riego debe estar entre 6,5 y 7,5. Incluso, es posible que aguas con niveles de pH entre 6,0 y 8,5 puedan ser usadas en actividades de riego. Sin embargo, nunca se debe regar con aguas con niveles de pH inferiores a 5,5 o superiores a 8,5.
Nivel de alcalinidad.	El rango de alcalinidad óptimo en agua para riego debe estar entre 0,75 y 2,6 meq/l.
Nivel de salinidad.	El nivel de salinidad del agua se mide indirectamente mediante la determinación de la conductividad eléctrica (CE). Los niveles óptimos de CE en el agua deben ser inferiores a 0,75 dS/m, aunque en algunos casos es posible usar aguas para riego con niveles de CE hasta máximo 2,0 dS/m.

Fuente: elaboración propia

Drenaje

Las condiciones de drenaje del sitio seleccionado deben ser óptimas, con el fin de evitar problemas de anegamiento en el área de los cultivos, así como para garantizar la estabilidad estructural de la cimentación y, por ende, de la estructura del invernadero. Por lo tanto, es importante que en regiones de alta pluviosidad se tengan sistemas de captación de agua y drenajes parcelarios que permitan evacuar y almacenar el agua lluvia. Asimismo, se deben evitar regiones donde los niveles freáticos sean excesivamente altos o superficiales.

Polución

En el caso de invernaderos que se construyen en zonas rurales, donde predominan las vías terciarias que no cuentan con capa asfáltica, se debe seleccionar una zona alejada de la carretera, con el fin de limitar la caída de polvo y suciedad sobre el plástico de cubierta. Si lo anterior no es posible, debido a disponibilidad de terreno en la finca, se recomienda seleccionar una película plástica autolimpiable o repelente al polvo. Esto permitirá mantener niveles adecuados de transmisión de radiación solar al interior del invernadero, lo que

busca no limitar procesos fotosintéticos de las plantas (Appelbaum & Aro-nescu, 2020). Asimismo, se recomienda construir el invernadero en un área donde no existan árboles de gran tamaño que puedan generar sombras en el interior de este o caídas de ramas o semillas que provoquen daños sobre la cubierta plástica y la estructura (figura 18).

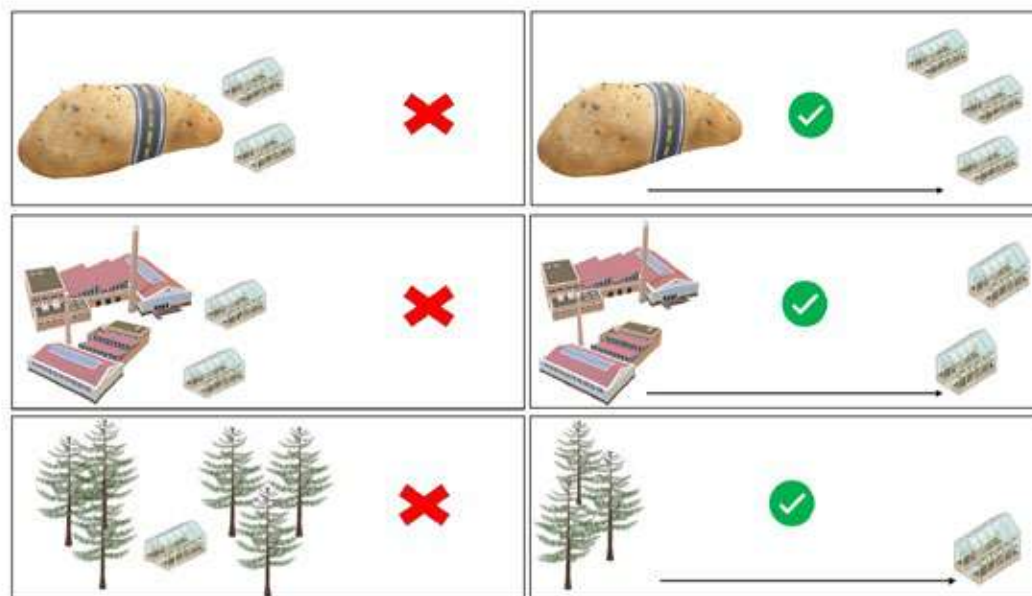


Figura 18. Ubicación del invernadero respecto a elementos que puedan generar polución.

Fuente: Elaboración propia

Por el contrario, en zonas urbanas y periurbanas donde coexisten fábricas dedicadas a labores industriales o de procesamiento de alimentos junto a invernaderos dedicados a la producción agrícola, se recomienda tener en cuenta el tipo de polución que se pueda generar y su afectación sobre el material de cubierta, con el fin de seleccionar el tipo de cubierta más adecuada o planificar labores de mantenimiento preventivo (Baudoin et al., 2013).

Espacio disponible

Idealmente, cuando se proyecta la construcción del primer invernadero, se debe tener en cuenta la planificación de la distribución de la finca. Esto permitirá determinar: i) áreas para construcción de invernaderos futuros; ii) áreas para construcción de reservorios de almacenamiento de agua y construcción de cabezales de riego; iii) construcción de carreteables y edificaciones para recepción de insumos, labores de poscosecha y almacenamiento, y, por último, iv) áreas para construcción de edificaciones administrativas.

Orientación

En Colombia y en países de la región intertropical, con unas condiciones de luminosidad medias aproximadas de 12 horas al día durante todo el año, el factor más relevante para seleccionar la ubicación del invernadero es la dirección del viento dominante. Por lo tanto, el invernadero debe disponer de sus áreas de ventilación en sentido perpendicular a la dirección de los vientos dominantes, lo que permite maximizar el efecto de gestión climática obtenido mediante ventilación natural (figura 19).

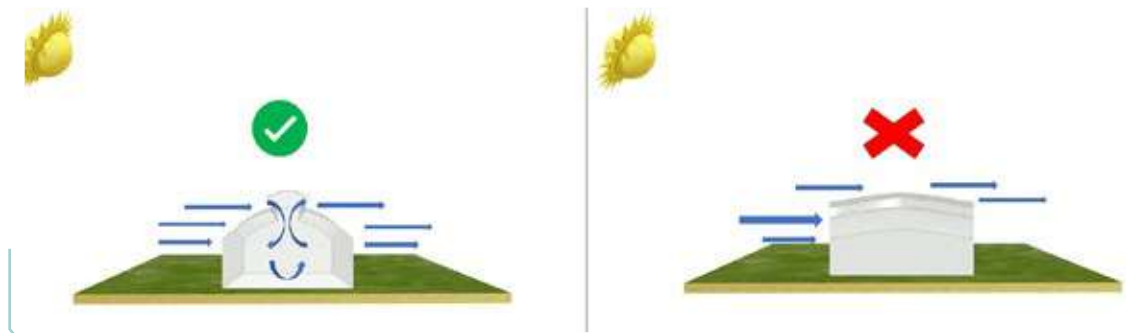


Figura 19. Orientación correcta para invernaderos en zonas tropicales.

Fuente: Elaboración propia

Infraestructura

Se recomienda que el área donde se construya el invernadero o clúster de invernaderos sea una zona donde existan vías de comunicación, preferiblemente de fácil acceso, y transitables tanto en épocas secas como en épocas de lluvia. Asimismo, debe tener disponibilidad de servicio de energía eléctrica, agua potable, gas natural e internet, ya que cada uno de estos servicios puede ser relevante para la operación de la explotación agrícola (Baudoin et al., 2013).

Conclusiones

La selección del lugar más adecuado para la construcción de un invernadero es, sin duda, una de las primeras decisiones que van a influir en la sostenibilidad del sistema productivo propuesto. El lugar específico seleccionado tendrá factores clave para la producción, como el clima, el tipo de suelo y el agua, que, sin lugar a dudas, determinarán el nivel tecnológico de la infraestructura seleccionada y, por lo tanto, los rendimientos finales que presenten los cultivos, tanto en calidad como en cantidad. Asimismo, el lugar seleccionado también determinará las labores de poscosecha y comercialización que se deben desarrollar para disponer los productos y darles valor agregado en los mercados objetivo. Finalmente, el sitio seleccionado será un factor clave al momento de analizar la viabilidad económica, el nivel tecnológico y el grado de rentabilidad que se busca generar con el sistema productivo.

Referencias

- Appelbaum, J., & Aronescu, A. (2020). Distribution of Solar Radiation on Greenhouse Convex Roof-top. *Sustainability*, 12(17), 7197.
- Baeza, E. (2007). *Optimización del diseño de los sistemas de ventilación en invernaderos tipo parral*. Universidad de Almería.
- Baeza, E., Hemming, S., & Stanghellini, C. (2020). Materials with switchable radiometric properties: could they become the perfect greenhouse cover? *Biosystems Engineering*, 193, 157-173. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.02.012>
- Baudoin, W., Nono-Womdim, R., Lutaladio, N., Hodder, A., Castilla, N., Leonardi, C., Pascale, S. De, & Qaryouti, M. (2013). *Good agricultural practices for greenhouse vegetable crops: principles for Mediterranean climate areas*. In *Good Agricultural Practices for greenhouse vegetable crops* [FAO plant production and protection paper 217].
- Bojacá, C. R., Villagrán, E. A., Gil, R., & Franco, H. (2017). *El riego y la fertilización del cultivo del tomate*. Universidad Jorge Tadeo Lozano.

Capítulo III. Criterios para la selección de la ubicación adecuada para la construcción de una estructura de invernadero

- Castilla, N. (2013). *Greenhouse technology and management*. Cabi.
- Castilla, N., & Hernández, J. (2005). The plastic greenhouse industry of Spain. *Chronica Horticulturae*, 45(3), 15-20.
- Fernández, M. M. (1994). *Suelo y medio ambiente en invernaderos*. Junta de Andalucía; Consejería de Agricultura y Pesca.
- Flores-Velázquez, J. (2010). *Análisis del clima en los principales modelos de invernaderos en México (malla sombra, multitúnel y baticenital) mediante la técnica del cfd*. Universidad de Almería.
- Food and Agriculture Organization [FAO]. (1988). *Cultures protégées en climat méditerranéen*. FAO.
- Gómez, J. C., Muñoz, R. B., & Rodríguez, M. de L. H. (2015). Calidad del agua para riego en la agricultura protegida en Tlaxcala. *Ingeniería*, 19(1), 39-50.
- Majdoubi, H., Boulard, T., Fatnassi, H., Senhaji, A., Elbahi, S., Demrati, H., Mouqallid, M., & Bouirden, L. (2016). Canary Greenhouse CFD nocturnal climate simulation. *Open Journal of Fluid Dynamics*, 6(6), 88-100. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.4236/ojfd.2016.62008>
- Manik, S. M., Pengilley, G., Dean, G., Field, B., Shabala, S., & Zhou, M. (2019). Soil and crop management practices to minimize the impact of waterlogging on crop productivity. *Frontiers in Plant Science*, 10(140). <https://www.readcube.com/articles/10.3389/fpls.2019.00140>
- Molina-Aiz, F. D., Valera, D. L., Peña, A. A., & Gil, J. A. (2005). Optimization of Almería-type greenhouse ventilation performance with computational fluid dynamics. *Acta Horticulturae*, 691, 433-440. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2005.691.52>
- Montero, J. I., Muñoz, P., Baeza, E., & Stanghellini, C. (2016). Ongoing developments in greenhouse climate control. *Acta Horticulturae*, 1182, 1-14.
- Sánchez-Molina, J. A., Li, M., Rodríguez, F., Guzmán, J. L., Wang, H., & Yang, X. T. (2017). Development and test verification of air temperature model for Chinese solar and Spanish Almería-type greenhouses. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 10(4). <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20171004.2398>
- Sase, S. (2006). Air movement and climate uniformity in ventilated greenhouses. *Acta Horticulturae*, 719, 313-323.
- Teitel, M., Montero, J. I., & Baeza, E. J. (2011). Greenhouse design: concepts and trends. *Acta Horticulturae*, 952, 605-620. https://www.ishs.org/ishs-article/952_77
- Villagrán, E. A., 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. A., León, R., Rodríguez, A., & Jaramillo, J. (2020). 3D numerical analysis of the natural ventilation behavior in a Colombian greenhouse established in warm climate conditions. *Sustainability*, 12(19), 1-26. <https://doi.org/10.3390/su12198101>

Villagrán, E. A., & Bojacá, C. R. (2019a). 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, E. A., & Bojacá, C. R. (2019b). 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. (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>



Capítulo IV

63

Materiales de cubierta y cerramiento para la construcción de invernaderos: criterios técnicos para su selección

Edwin Andrés Villagrán Munar
Stephanie Johana Numa-Vergel
Yeni Rodríguez Giraldo

Introducción

La producción agrícola bajo invernadero se ha convertido en un elemento fundamental para garantizar la sostenibilidad de la población actual, debido, principalmente, a la falta de fiabilidad y a la alta vulnerabilidad que presentan los sistemas tradicionales de producción de alimentos (Maraveas, 2019). Asimismo, se proyecta que la producción bajo invernadero será una de las alternativas de intensificación más implementadas para enfrentar los desafíos futuros que sobre los sistemas de producción ocasionarán el cambio climático, la crisis ambiental generada por el actual modelo de desarrollo de los países y el aumento de la población mundial (Villagrán et al., 2021).

Para que la agricultura bajo cubierta sea un modelo de éxito, hay unas decisiones técnicas que se deben tomar con criterio. Una de ellas es la selección del material de cubierta y cerramiento para la fabricación del invernadero. Estos materiales afectan una de las variables más importantes para el crecimiento y desarrollo de los cultivos: la luminosidad (Tantau et al., 2012). En términos energéticos, el material de cubierta también determina el comportamiento de la temperatura que se presenta en el interior del invernadero y, a su vez, la capacidad de almacenamiento térmico de la estructura, por lo tanto, será un factor que marcará la eficiencia energética de los sistemas de climatización implementados para el control de temperatura (Papadakis et al., 2000).

El material de cubierta también afecta directamente la robustez estructural que debe presentar el tipo de invernadero que se fabricará. En este sentido, se debe resaltar que, en la actualidad, existen materiales rígidos, como el vidrio, que requieren de invernaderos con un mayor número de elementos estructurales en la zona de la cubierta (Espí, 2012). Por otro lado, están los materiales flexibles, como el plástico, el cual es el principal material seleccionado a la hora de fabricar invernaderos de baja tecnología. El plástico no requiere de estructuras robustas y su proceso de instalación es mucho más sencillo, en comparación con el vidrio, sin embargo, su durabilidad está limitada a un periodo de tres o cuatro años (Tantau et al., 2012).

De acuerdo con lo anterior, en este capítulo se brindará la información técnica adecuada para que un productor tenga las herramientas necesarias que le permitan seleccionar el material de cubierta y cerramiento más adecuado para su sistema de producción bajo cubierta.

Tipologías de materiales para cubierta de invernaderos

Los materiales de cobertura de invernaderos son un factor clave para mantener el microclima dentro de la estructura en niveles adecuados para los cultivos. Asimismo, el tipo de material de cubierta es un factor muy importante que determinará las necesidades de carga de energía para labores de calefacción y refrigeración (Kim et al., 2022). A nivel mundial, desde 1970, los países dedicados a la producción agrícola bajo invernadero se inclinaron por dos corrientes de desarrollo distintas.

Primero, los países del norte de Europa, donde las condiciones climáticas, tanto en invierno como en verano, presentan valores extremos de temperatura, optaron por estructuras de invernadero de alta tecnología en las que el material predominante fue el vidrio (Castilla & Hernández, 2005) (figura 20).



Figura 20. Invernadero tipo venlo con cubierta de vidrio.

Foto: Edwin Villagrán

Segundo, los países más cercanos a la región tropical, como los de la costa del Mediterráneo y los países latinoamericanos, donde las condiciones de temperatura son menos extremas, optaron por estructuras de bajo y mediano costo, en las que el material de cubierta seleccionado fue el plástico (Baudoin et al., 2013) (figura 21).



Figura 21. Invernadero tipo túnel monotramo con cubierta plástica.

Foto: Edwin Villagrán

El vidrio como material de cubierta para invernadero

El vidrio usado para la fabricación de invernaderos es el material que presenta mayores ventajas para la producción agrícola bajo cubierta. En términos de duración, tiene una mayor vida útil, en comparación con materiales de cubierta plástica. Energéticamente, posee una alta eficiencia en el uso de la energía consumida para labores de calefacción y enfriamiento (Fang et al., 2005). Adicionalmente, el vidrio para uso en invernaderos presentó una gran evolución en sus características desde los años setenta, impulsada principalmente por la crisis energética que golpeó la horticultura protegida en los principales países europeos, donde las condiciones invernales son extremas, como es el caso de Holanda y Bélgica (Castilla & Hernández, 2005).

Estos desarrollos permitieron que se fabricaran comercialmente paneles de vidrio templado para cubierta de invernadero. En términos de seguridad, esto fue significativo, puesto que, si por algún motivo se llega a desprender un panel de vidrio de la cubierta, este se desintegrará, limitando el riesgo para los trabajadores en el interior del invernadero, ya que el impacto con el material será menor. Asimismo, con el fin de mejorar la eficiencia energética para labores de calefacción o enfriamiento, se fabricaron paneles de vidrio de hasta tres capas, lo cual permite conseguir estructuras de invernadero con una mayor hermeticidad térmica. Sin embargo, es importante resaltar que el vidrio tiene como desventaja su alto costo. Debido a esto, a nivel mundial, el área total bajo invernadero de vidrio para cubierta y cerramiento es de solo el 1 % (Baudoin et al., 2013). En la tabla 11, se incluyen algunas propiedades ópticas y térmicas del vidrio que pueden ser de interés para aplicaciones de cultivos bajo cubierta.

Tabla 11. Propiedades ópticas y térmicas del vidrio

Propiedad	Valor
Conductividad térmica (k) ($\text{Wm}^{-1} \text{ } ^\circ\text{K}^{-1}$).	0,81
Espesor (mm).	3,20
Densidad, ρ , (kg m^{-3}).	0,88
Emisividad (ϵ).	0,84
Transmisión de la radiación solar (%).	0,88
Reflectividad de la radiación solar (%).	0,136
Coefficiente de transferencia de calor (U) ($\text{Wm}^{-2} \text{ } ^\circ\text{K}^{-1}$).	2,89
Coefficiente de ganancia de calor solar (SHGC).	0,78

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

Materiales flexibles plásticos usados en cubiertas de invernadero

Los materiales flexibles plásticos usados en cubiertas de invernadero tienen tres factores técnicos que deben ser cuidadosamente analizados: i) propiedades mecánicas, ii) propiedades ópticas y iii) propiedades térmicas (Rocha et al., 2021). En general, un material de cubierta idóneo para aplicaciones de agricultura protegida debe ser fotoestable, lo cual garantizará que se mantengan sus principales características durante la exposición a la radiación solar por periodos de tiempo prolongados. También es relevante que sea traslúcido, para permitir el paso de la radiación solar hacia el interior del invernadero,

ya que este es un factor clave para las actividades fisiológicas de las plantas, como la fotosíntesis y la transpiración. Adicionalmente, debe ser un material opaco a la radiación térmica, con el fin de evitar la pérdida energética acelerada durante las horas noche y, por ende, la pérdida de temperatura. Por último, ha de ser un material hidrófilo, que no permita la formación de gotas y su posterior precipitación hacia las plantas por efecto de la condensación.

Las propiedades mencionadas no están convencionalmente presentes en el plástico, sin embargo, debido al desarrollo industrial que han tenido los plásticos para cubierta de invernadero desde 1980, mediante la aplicación de aditivos minerales y estabilizantes de luz, es posible obtener materiales fotoestables, traslúcidos, térmicos e hidrófilos. Además, debido al proceso de fabricación por extrusión y soplado, algunos materiales plásticos pueden fabricarse con las dimensiones y el calibre deseados (Espí, 2012).

Por último, la vida útil de las películas plásticas se ha logrado aumentar hasta en un 500 %, en relación con su durabilidad en el año 1970, con lo que actualmente existen películas con una duración media de hasta cuatro años. La vida útil depende de los fotoaditivos agregados, del clima local y de los tratamientos químicos que se realicen en el cultivo para el manejo de plagas y enfermedades (Montero et al., 2013). Los materiales plásticos y flexibles más usados para cubierta de invernadero son polietileno (PE) en diferentes densidades, copolímero etileno vinil acetato (EVA), policloruro de vinilo (PVC) y policarbonato (PC).

Polietileno (PE)

Es el material más utilizado en plasticultura, ya sea para fabricación de cubiertas de invernaderos, semitúneles o acolchados (Montero et al., 2008). Puede considerarse de bajo costo, con buenas propiedades mecánicas, y se comercializa en diferentes densidades, según la aplicación para la que sea requerido (tabla 12). Actualmente, pueden conseguirse de forma comercial películas de polietileno hechas a la medida para diferentes tipos de cultivo y condiciones climáticas (Villagrán et al., 2021).

Tabla 12. Tipo de polietileno según su densidad

Polietileno de baja densidad (PEBD)	Polietileno lineal de baja densidad (PELBD)	Polietileno de alta densidad (PEAD)
Es el más utilizado para fabricación de cubiertas de invernadero y su densidad es inferior a los 930 kg/m ³ .	Es un material usado en acolchados y semitúneles. Para cobertura de hileras de cultivo su densidad oscila entre los 930 y 940 kg/m ³ .	Es un material usado para fabricar contenedores en sistemas de cultivo sin suelo y para fabricar materias primas de riego y drenaje. Su densidad es superior a los 940 kg/m ³ .

Fuente: Elaboración propia con base en Kittas et al. (2013)

Policloruro de vinilo (PVC)

Se fabrica en láminas con anchos que varían de 2 a 8 m y posee alta transmisión de la luz visible, con porcentajes superiores al 80 %, aunque su tasa de difusión de la luz es baja, por lo cual pueden verse quemaduras sobre las plantas, debido a radiación directa o en regiones de cultivo con sombra excesiva. Entre sus desventajas está ser un material que atrae fácilmente el polvo. Adicionalmente, presenta deterioro físico y de color al término de uno o dos años (Díaz et al., 2001).

Copolímero etileno vinil acetato (EVA)

Este tipo de película plástica es usado en la fabricación de semitúneles bajos o para dobles techos en el interior del invernadero. También es posible usarlo como cubierta exterior, aunque se recomienda su uso en regiones donde no existan altas tasas de precipitación y alta cantidad de polvo en el ambiente (Díaz et al., 2001).

Policarbonato (PC)

En términos de calidad para uso en cubierta de invernadero, es un material que se acerca a las prestaciones que ofrece el vidrio, sin embargo, el policarbonato tiene la ventaja de una menor densidad y de un menor costo económico, por lo cual es asequible para un número mayor de productores. Por otra parte, tiene una tasa de transmisión de luz relativamente alta y, adicionalmente, posee una adecuada tasa de difusión de la radiación solar interceptada, lo que ayuda a promover un crecimiento homogéneo del cultivo en el interior del invernadero. Asimismo, es recomendable que el policarbonato seleccionado para cubierta de invernadero cuente con filtración y protección de los rayos UV, lo cual limita la quemadura de las plantas por radiación directa y, asimismo, aumenta la vida

útil del material de cubierta. En la tabla 13, se incluyen algunas propiedades de interés respecto a cubiertas plásticas específicas para invernadero.

Tabla 13. Principales propiedades de las cubiertas flexibles

Propiedad	Tipo de plástico				
	PEBD	PEAD	EVA	PVC	PC
Densidad (ρ) (kg/m ³).	930	960	930	1500	1200
Transmisión de la radiación solar (%).	90	90	90	90	83
Transmisividad de la radiación térmica (%).	65	65	11	30	0
Coefficiente de transferencia de calor (U) (W/m ² °K).	9	9	7	8	4

Fuente: Elaboración propia con base en Díaz et al. (2001)

Películas de polietileno para cubierta de invernadero con características especiales

Películas plásticas claras

El porcentaje de intensidad de la radiación solar que incide en el interior de un invernadero siempre será inferior respecto a la intensidad de la radiación solar en el exterior. El grado de reducción en la intensidad de la radiación solar dependerá de factores propios de la fabricación de la película plástica, como el espesor y su grado de translucidez. La pérdida de transmisión en una película plástica nueva puede variar entre el 5 y el 15 %, mientras que una película con tres años de uso puede llegar a ser del 45 %, debido a situaciones propias del contexto local, como el clima, la cantidad de polvo, la suciedad y las algas (Espí, 2012).

Las películas claras se caracterizan por no generar turbidez a la visión de objetos o cultivos desde la cara opuesta de la película plástica, en otras palabras, permiten ver los objetos nítidamente (Cabrera et al., 2009). Este tipo de películas plásticas se recomienda para lugares con climas nubosos y húmedos, ya que bajo estas condiciones la intensidad de luz puede llegar a ser un factor limitante del cultivo; además, evita la quemadura de los cultivos por radiación directa (Espí, 2012). En la tabla 14, se mencionan algunas películas plásticas claras disponibles en el mercado colombiano.

Tabla 14. Películas plásticas claras comercializadas en Colombia

Nombre comercial	Características ópticas	Cultivos recomendados
Suncover Clear, fabricada por Ginegar.	Transmisión de luz: 88 %. Difusión de luz: 25 %. Transmisión uv: parcial.	Claveles. Pompones. No recomendada para cultivos con tratamientos fitosanitarios con azufre.
Suntherm Clear, fabricada por Ginegar.	Transmisión de luz: 89 %. Difusión de luz: 23 %. Transmisión uv: parcial.	Claveles. Pompones.
Agrolene, fabricada por Plastilene.	Transmisión de luz: 90 %. Difusión de luz: 18 %. Transmisión uv: 1 %.	Hortalizas. Rosa y follajes. Tomate.

Fuente: Elaboración propia

Películas plásticas difusas

Este tipo de películas plásticas no permite ver con nitidez los objetos en el interior del invernadero. Se trata de películas recomendadas para condiciones climáticas con alta radiación solar directa. Con el uso de películas plásticas difusoras, bajo este tipo de condiciones climáticas, se evitan quemaduras en el follaje de las plantas y sombreado sobre algunas partes en el interior del invernadero (Cabrera et al., 2009). En la tabla 15, se mencionan algunas películas plásticas difusas disponibles en el mercado colombiano.

Tabla 15. Películas plásticas difusas comercializadas en Colombia

Nombre comercial	Características ópticas	Cultivos recomendados
Reysun Plus 175, fabricada por Euromallas.	Transmisión de luz: 90 %. Difusión de luz: 55 %. Transmisión uv: parcial.	Tomate. Cannabis. Melón.
Suntherm Diffused 303, fabricada por Ginegar.	Transmisión de luz: 88 %. Difusión de luz: 55 %. Transmisión uv: parcial.	Claveles. Pompones.
Agroclear, fabricada por PQA.	Transmisión de luz: 85 %. Difusión de luz: 55 %. Transmisión uv: 1,5 %.	Lechuga. Tomate. Gerberas y <i>fillers</i> .

Fuente: Elaboración propia

Películas plásticas antipolvo o autolimpiables

Los polímeros con los cuales se fabrican los plásticos convencionales para cubierta de invernadero suelen ser materiales con una baja conductividad eléctrica (Espí, 2012), la cual se genera debido al movimiento y la fricción causados por el viento, lo que provoca acumulación de electricidad estática en la superficie plástica, atrayendo material particulado hacia la cubierta, y, por tanto, pérdida de transmisión de luz hasta en un 10 % por cada año de uso (Antón et al., 2000). Por lo anterior, en regiones donde por cualquier motivo exista una gran cantidad de polvo en la atmósfera, lo ideal es seleccionar cubiertas plásticas antipolvo (figura 22), ya que este tipo de cubiertas es fabricado con aditivos que ayudan a aumentar la conductividad eléctrica, tanto en el interior como a nivel superficial del material plástico, lo que reduce la cantidad de polvo sobre la cubierta y, por ende, las labores de mantenimiento (Espí, 2012).

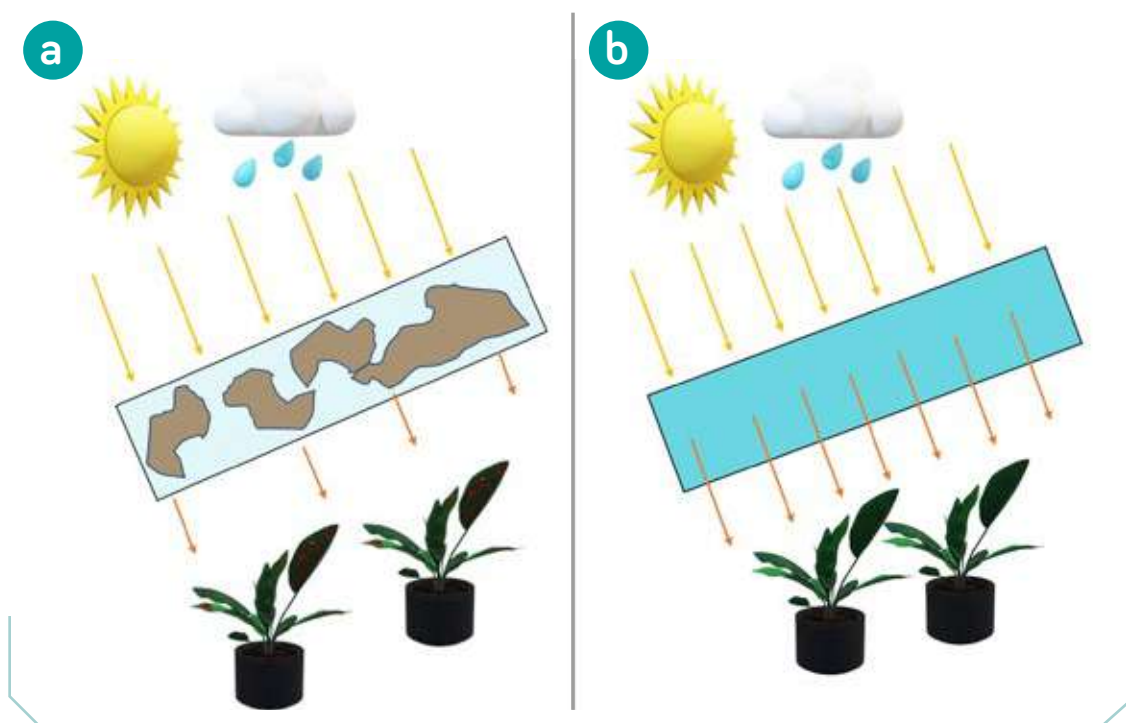


Figura 22. Transmisión de la radiación solar. a. Mediante película plástica convencional; b. Mediante película plástica autolimpiable.

Fuente: Elaboración propia

Películas plásticas antigoteo

En regiones climáticas donde predominen altas tasas de humedad relativa (superiores al 80 %), se recomienda usar películas plásticas con características antigoteo. El vapor de agua generado por el cultivo en el interior del invernadero y las condiciones climáticas externas generan una atmósfera de aire saturado que, al tener contacto con la superficie interior de una película plástica convencional, origina el fenómeno de condensación. Estas gotas de agua se precipitan en las plantas, lo que genera un ambiente propicio para el desarrollo de enfermedades fúngicas (Baeza et al., 2009). Asimismo, las gotas de agua presentes en la cubierta reducen la radiación fotosintéticamente activa (PAR, por su sigla en inglés) hacia el interior del invernadero hasta en un 20 %, lo que se traduce en una reducción de la tasa fotosintética y, posteriormente, del rendimiento de los cultivos (Castilla & Hernández, 2005). Por el contrario, las películas plásticas antigoteo, fabricadas con aditivos que aumentan la tensión superficial del agua, no permiten la formación de gotas y, en su lugar, se crea una lámina fina y continua de agua (figura 23).

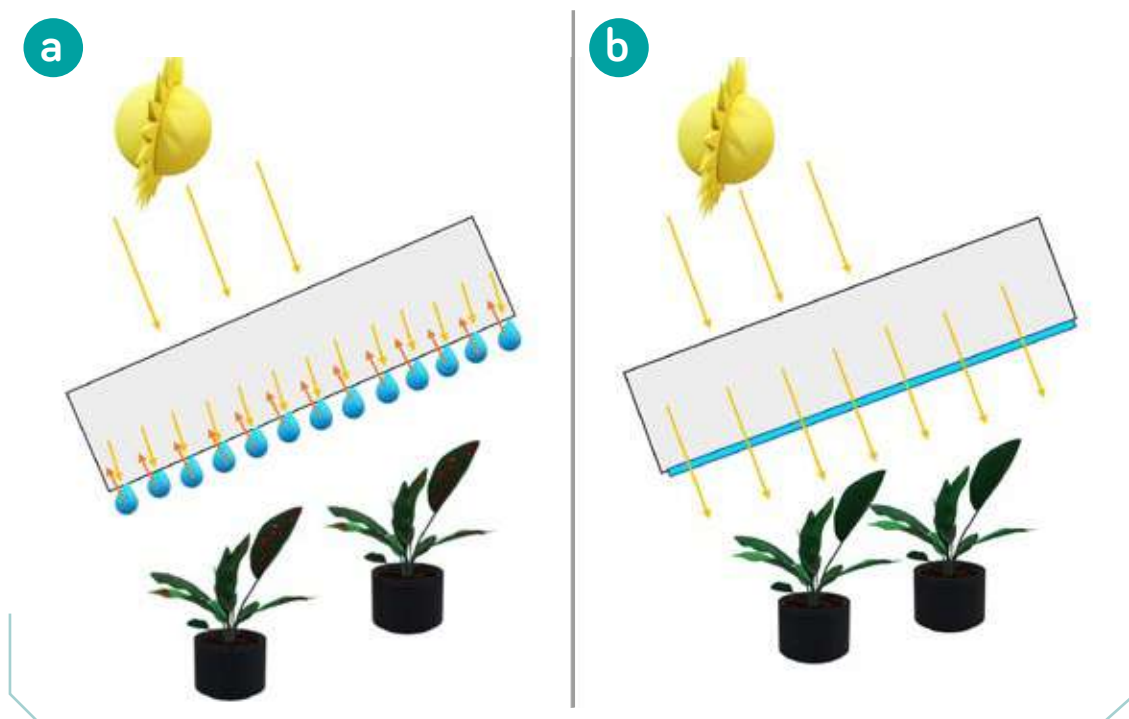


Figura 23. Condensación del agua y transmisión de la radiación solar. a. Mediante película plástica convencional; b. Mediante película plástica antigoteo.

Fuente: Elaboración propia

Películas plásticas antiplagas

Este tipo de películas plásticas funciona bajo el principio de bloquear parte del espectro de los rayos ultravioleta visible (uv) entre 190 y 800 nm; principalmente, bloquea longitudes de onda entre los 290 y 380 nm. Lo anterior permite repeler insectos plaga de importancia agrícola y transmisores de enfermedades víricas en cultivos bajo invernadero, entre ellos, la mosca blanca (*Bemisia tabaci*) y trips (*Frankliniella occidentalis*). Estos insectos ven reducida o limitada su movilidad en el espacio a causa del bloqueo de los rayos uv en longitudes inferiores a 380 nm (Monci et al., 2002) (figura 24). Sin embargo, también se debe mencionar que estas películas plásticas pueden afectar en menor medida a las poblaciones de polinizadores en el interior del invernadero (Pérez Parra et al., 2010). Resultados de algunos ensayos de investigación muestran que las poblaciones de mosca blanca y trips pueden disminuir hasta en un 65 % respecto a invernaderos que usan películas plásticas convencionales (Pérez et al., 2009). Por último, también es importante mencionar que el filtrado y bloqueo de la radiación uv afecta el crecimiento y esporulación de hongos patógenos, como *Botrytis cinerea*, lo que reduce su incidencia e, incluso, la evita (Díaz et al., 2001).

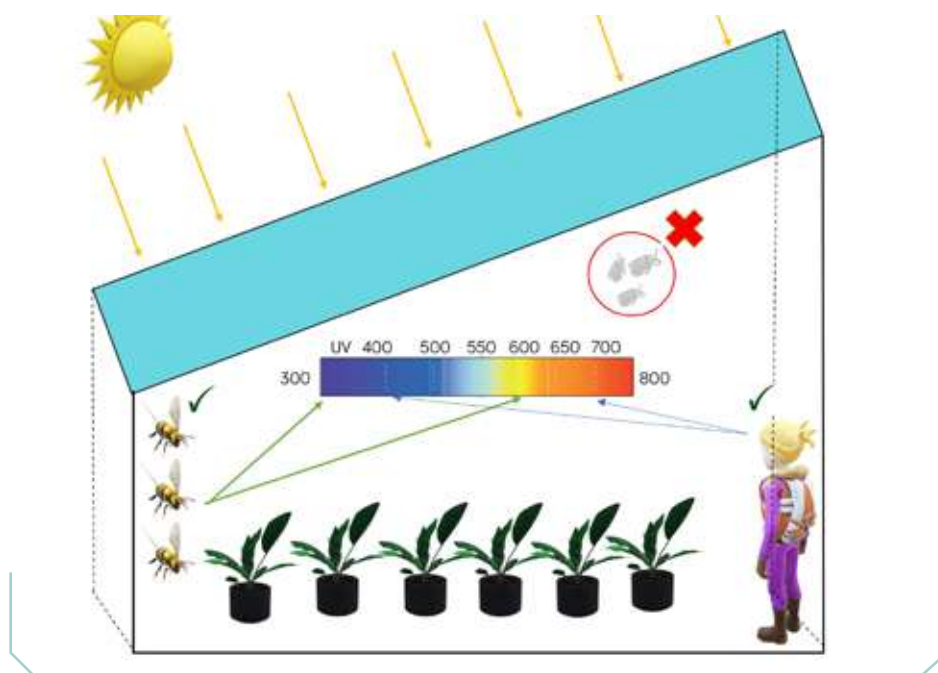


Figura 24. Los seres humanos, las abejas y otros insectos son sensibles a diferentes longitudes de onda de radiación solar.

Fuente: Elaboración propia

Películas plásticas con bloqueo a la luz NIR

Aproximadamente, 45 % de la radiación solar que incide en el invernadero es útil para la fotosíntesis. Esta se conoce como radiación fotosintéticamente activa (PAR). El otro porcentaje de la radiación se convierte en energía y se encuentra en el rango del infrarrojo cercano (NIR), entre 780 nm y 2500 nm. Esta última radiación es la que provoca el calentamiento en el interior del invernadero, y debido a ello se aceleran procesos fisiológicos, como la transpiración de la planta, lo cual no es deseable en climas cálidos y áridos, donde hay escasez de agua. Por lo tanto, para este tipo de condiciones climáticas extremas o donde la temperatura del invernadero exceda los límites óptimos para el desarrollo del cultivo establecido, se recomienda el uso de películas plásticas con aditivos reflectantes, que generan un bloqueo parcial de la radiación NIR, también conocidas como películas antitérmicas o plásticos fríos (López-Marín et al., 2007) (figura 25). Es importante señalar que la selección de la cubierta NIR va a depender de las condiciones de radiación solar durante todo el año y del tipo de cultivo a establecer; por lo tanto, en función del análisis de esta información se puede definir el uso de películas plásticas NIR de forma temporal o permanente.

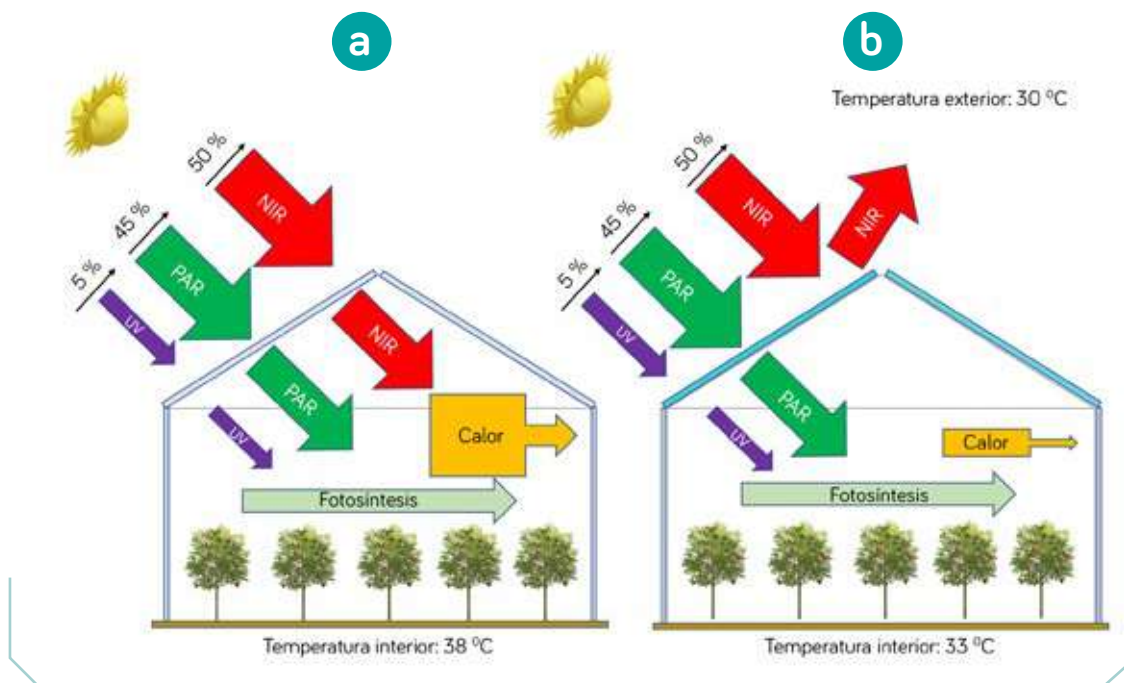


Figura 25. Flujo de radiación en un invernadero. a. Con cubierta plástica convencional; b. Con cubierta con bloqueo NIR.

Fuente: Elaboración propia.

Películas plásticas con bloqueo MIR

En climas fríos y en regiones donde se presenten fenómenos de heladas, una de las problemáticas importantes en los invernaderos está relacionada con la temperatura óptima en su interior durante el periodo nocturno (Villagrán & Bojacá, 2019). Específicamente, en invernaderos que no cuentan con sistemas de calefacción, las temperaturas mínimas de la noche son inferiores al rango óptimo recomendado para las especies vegetales de interés comercial. Una de las alternativas para atenuar esta reducción de temperatura en los invernaderos es usar películas plásticas con bloqueo de la radiación térmica del infrarrojo medio (MIR) entre $2,5 \mu\text{m}$ y $25 \mu\text{m}$, también conocidas como películas plásticas térmicas (Espí et al., 2006). Por su composición, estas cubiertas, al tener una mayor cantidad de minerales, como sílice, silicatos y boratos, tienen la capacidad de absorber y reflejar hacia el interior del invernadero la radiación en longitudes de onda entre los 2.500 y 14.000 nm (Espí, 2012) (figura 26). Por lo tanto, al impedir que la radiación emitida por el suelo del invernadero se escape rápidamente a la atmósfera, se genera una condición térmica más elevada en el interior del invernadero, en comparación con invernaderos construidos con películas plásticas convencionales (Villagrán-Munar & Bojacá-Aldana, 2020).

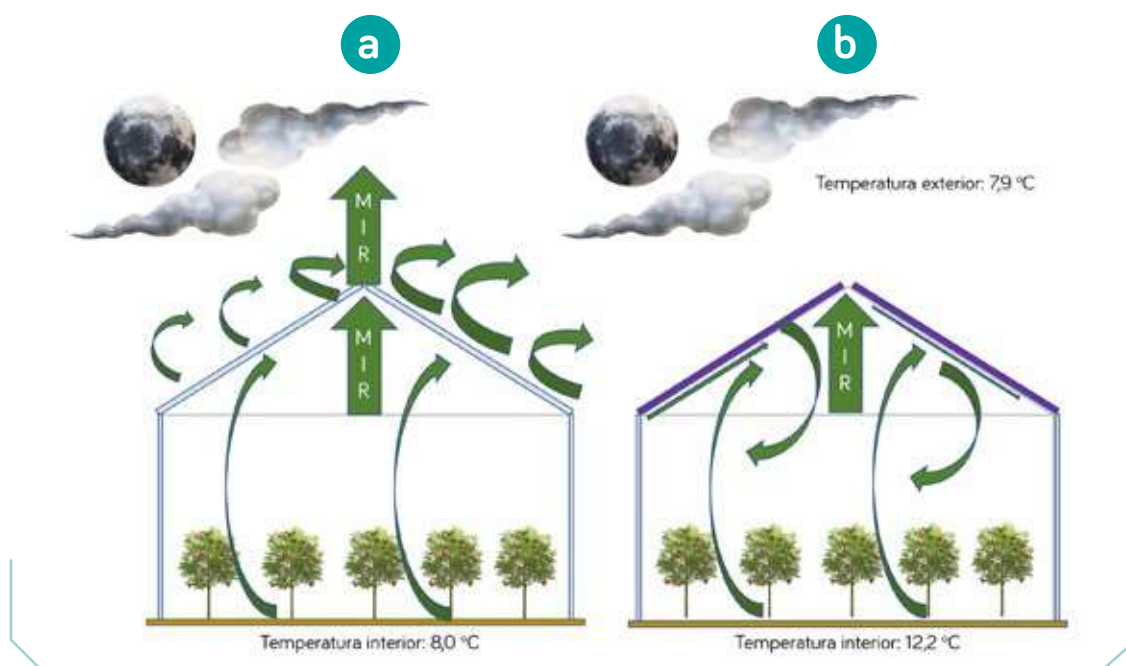


Figura 26. Flujo de radiación en un invernadero. a. Con cubierta plástica convencional; b. Con cubierta con bloqueo MIR.

Fuente: Elaboración propia.

Películas plásticas luminiscentes

Este tipo de película plástica, conocido también como fluorescente, hace parte del grupo de los últimos desarrollos en cubiertas plásticas para cubiertas de invernadero. Estas películas plásticas realizan una modificación de la calidad de la radiación solar en su distribución espectral entre la parte ultravioleta y el rango visible. Por lo tanto, absorben longitudes ultravioletas y verdes que son poco útiles para las plantas y las convierten en luz azul y roja, que, en términos de calidad lumínica, es mayormente aprovechada por las plantas. Esta modificación de la luz permitirá obtener mayores producciones y una mejor calidad en los productos cosechados. Sin embargo, aún es necesario desarrollar más investigaciones al respecto, pues la respuesta de cada cultivo es diferente. Estas películas plásticas aún son costosas a nivel comercial, por lo tanto, su implementación es todavía escasa. No obstante, a la hora de adquirir este tipo de materiales de cubierta, se deben tener presentes las siguientes características: fotoestabilidad, efecto fluorescente, distribución espectral y transmisión de radiación total (Espí, 2012).

Materiales de cerramiento



Figura 27. Invernadero con cubierta en policarbonato y costados laterales y fachadas en vidrio.

Foto: Edwin Villagrán

Generalmente, tanto en sus fachadas como en sus costados laterales, los invernaderos usan como material de cerramiento el mismo seleccionado para la cubierta. Sin embargo, existe la posibilidad de que se encuentren invernaderos donde se combinan materiales. Por ejemplo, en la cubierta se usa policarbonato y en las paredes laterales y fachadas se usa vidrio con un antepecho de ladrillo, u otra combinación entre los materiales disponibles a nivel local (figura 27).

Mallas porosas a prueba de insectos (antiinsecto)

Estas mallas tienen el objetivo de restringir físicamente el ingreso al invernadero de plagas que puedan afectar el desarrollo adecuado de las plantas. En los últimos años, se ha masificado la instalación de este tipo de mallas en las áreas de ventilación de los invernaderos usados en agricultura protegida (Villagrán et al., 2020). Sin embargo, este tipo de mallas también restringe los flujos de aire hacia el interior del invernadero, lo que genera una modificación del microclima caracterizada principalmente por aumentos de temperatura y humedad (Cabrera et al., 2006). Por lo tanto, el reto técnico consiste en establecer un punto medio entre la restricción física al ingreso de insectos y la modificación del microclima, con el fin de que este último no se convierta en un factor restrictivo para la productividad de los cultivos (Teitel, 2010).

Características estructurales y aerodinámicas de las mallas antiinsecto comerciales

En la actualidad, los agricultores colombianos cuentan con la disponibilidad comercial de diferentes tipos de mallas antiinsecto, provenientes tanto de la industria nacional como de la internacional (Villagrán et al., 2020). En Colombia, se comercializan mallas de 17, 25, 40 y 50 mesh, cada una de las cuales tiene un número de perforaciones o huecos por pulgada cuadrada. Por lo tanto, la malla 17 tiene menos orificios que la malla 50, pero, a su vez, los orificios de la malla 50 son de un menor tamaño que los de la malla 17 (figura 28). Debido a ello, es de esperar que la malla 50 tenga una mayor capacidad para limitar el ingreso de insectos al invernadero, pero generará una mayor pérdida inercial del movimiento del aire y, por lo tanto, un microclima con mayor temperatura.

Capítulo IV. Materiales de cubierta y cerramiento para la construcción de invernaderos: criterios técnicos para su selección

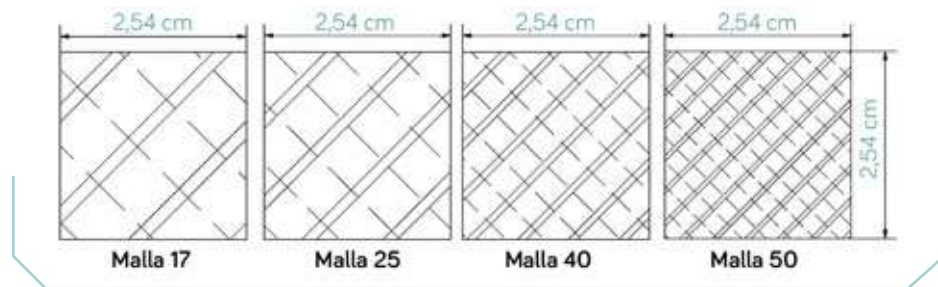


Figura 28. Tipos de mallas comercializadas en Colombia.

Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente, el desarrollo y el estudio de este tipo de mallas han permitido que se fabriquen en diferentes tipos de tramados, ya sea diagonales o en estructuras horizontales y verticales, configuradas con hilos monofilamento de diferente diámetro (figura 29). Lo anterior se ha desarrollado con el objetivo de buscar mallas con mayor efectividad en el porcentaje de exclusión de insectos y con una menor restricción física al flujo de aire que ingresa al invernadero (Tanny et al., 2014).



Figura 29. Diferentes tramados de malla usados en la fabricación de materiales comerciales.

Fuente: Elaboración propia

Por último, otra característica propia de las mallas antiinsecto es el color. Si bien, a nivel mundial, la más implementada es la malla de color blanco tipo perla, también existen mallas de color negro, y otras de colores con características fotoselectivas (figura 30).

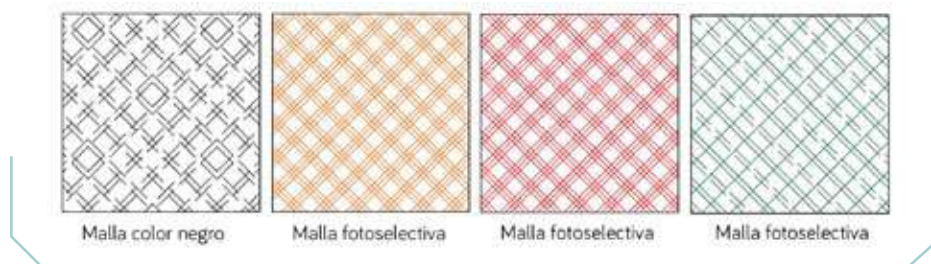


Figura 30. Mallas antiinsecto de diferentes colores.

Fuente: Elaboración propia

Algunos estudios han demostrado que el uso de mallas fotoselectivas reduce la población de mosca blanca (*Bemisia tabaci*) en cultivos de tomate y pimentón hasta en un 250 %, en comparación con mallas antiinsecto blancas. Asimismo, se pudo comprobar que el uso de mallas fotoselectivas no reduce significativamente la población de trips (*Frankliniella occidentalis*), como sí lo hacen las mallas de color negro (Gázquez et al., 2009; Maraveas, 2019). Es importante mencionar que, sea que se usen mallas negras o fotoselectivas, deben ser muy bien analizadas previamente en términos de no limitar la cantidad y calidad de la radiación incidente sobre los cultivos.

Insectos plaga comunes en cultivos bajo invernadero

El éxito del control físico de insectos mediante el uso de pantallas porosas a prueba de insectos en cultivos agrícolas establecidos bajo invernadero —o casas de malla— es altamente dependiente de las características estructurales del tipo de malla seleccionado (Teitel, 2007). Uno de los factores más relevantes está relacionado con el tamaño y la uniformidad del orificio estructurado en la malla a partir del diámetro del hilo y del número de hilos que componen el tejido vertical y horizontal (López et al., 2016). Asimismo, es importante tener muy presente la morfología del insecto plaga que se quiere controlar, por lo tanto, en el momento de la selección de la malla, vale la pena comparar las dimensiones del tamaño del hueco de malla versus las dimensiones del ancho torácico y abdominal del insecto (Pérez Vega et al., 2016). La recomendación general es que la dimensión del hueco de la malla sea lo más pequeña posible en relación con las dimensiones morfológicas del insecto (Teitel, 2007). En la tabla 16, se incluye información morfológica de algunos de los principales insectos plaga presentes en cultivos bajo invernadero.

Tabla 16. Dimensiones de algunos insectos plaga comunes en cultivos bajo invernadero

Insecto plaga	Ancho (micras)	
	Tórax	Abdomen
<i>Liriomyza trifolii</i> .	660	850
<i>Trialeurodes vaporariorum</i> .	288-400	708
<i>Bemisia tabaci</i> .	239-320	565
<i>Frankliniella occidentalis</i> .	192	265

Fuente: Elaboración propia con base en Pérez Parra et al. (2010)

Selección de una malla antiinsecto

Como ya se mencionó, la selección de la malla antiinsecto y las características propias de fabricación de la malla están en función de la morfología del insecto a controlar. En la tabla 17, se presentan algunas características de mallas que el agricultor deberá revisar al momento de adquirir una malla antiinsecto.

Tabla 17. Características físicas óptimas de las mallas antiinsecto

Características	Descripción
Estructurales y mecánicas.	Revisar diámetro del hilo, tamaño bidimensional y tridimensional del hueco u orificio, relación de la trama en número de hilos por cm ² , y uniformidad de la trama y del orificio. Por último, la malla debe tener protección a la radiación uv, lo cual garantizará su mayor durabilidad en el tiempo.
Aerodinámicas.	Porcentaje de exclusión de insectos, porosidad y reducción del flujo de aire.
Ópticas.	Transmisión, reflexión y absorción de la luz. Estos factores son relevantes para la fotosíntesis del cultivo y, adicionalmente, influirán en la generación del microclima en el invernadero.

Fuente: Elaboración propia

Por último, en estudios experimentales, se ha determinado que, para obtener una aceptable exclusión efectiva de *Bemisia tabaci* y *Frankliniella occidentalis*, se deben usar mallas con las características resumidas en la tabla 18.

Tabla 18. Mallas efectivas en la exclusión de insectos plaga

Insecto	Diámetro \varnothing_{3D} (mm)	Porosidad (%)	Reducción de la ventilación (%)	Tipo de malla (hilos/cm ²)
<i>Bemisia tabaci</i> .	0,24	42	33	24 x 12
<i>Frankliniella occidentalis</i> .	0,19	36	41	28 x 14

Fuente: Elaboración propia con base en Cabrera et al. (2006)

En la figura 31, se presentan algunos factores claves a tener en cuenta para la elección de materiales de cubierta y cerramientos de invernaderos.



Figura 31. Factores claves para la elección de materiales de cubierta y cerramiento y para el adecuado desarrollo de un cultivo bajo invernadero.

Fuente: Elaboración propia

Conclusiones

La selección del material de cubierta y cerramiento es una actividad clave que garantizará el éxito o fracaso de la producción bajo invernadero, debido a que estos materiales influirán fuertemente en la generación de microclimas óptimos, sub y supraóptimos en el interior de la estructura.

En este capítulo, se presentaron algunas características para tener en cuenta sobre los materiales de cubierta y cerramiento de invernaderos, así como las recomendaciones para su selección, teniendo presente la ecofisiología del tipo de cultivo a establecer, las condiciones climáticas dominantes de la región donde se construirá el invernadero y los tipos de malla recomendables para evitar el ingreso de las principales plagas limitantes de los cultivos. Se espera que todo lo anterior ayude al productor a seleccionar adecuadamente los materiales para cubierta y cerramiento de invernaderos, según el requerimiento particular y dentro de la disponibilidad de dichos materiales en el mercado colombiano.

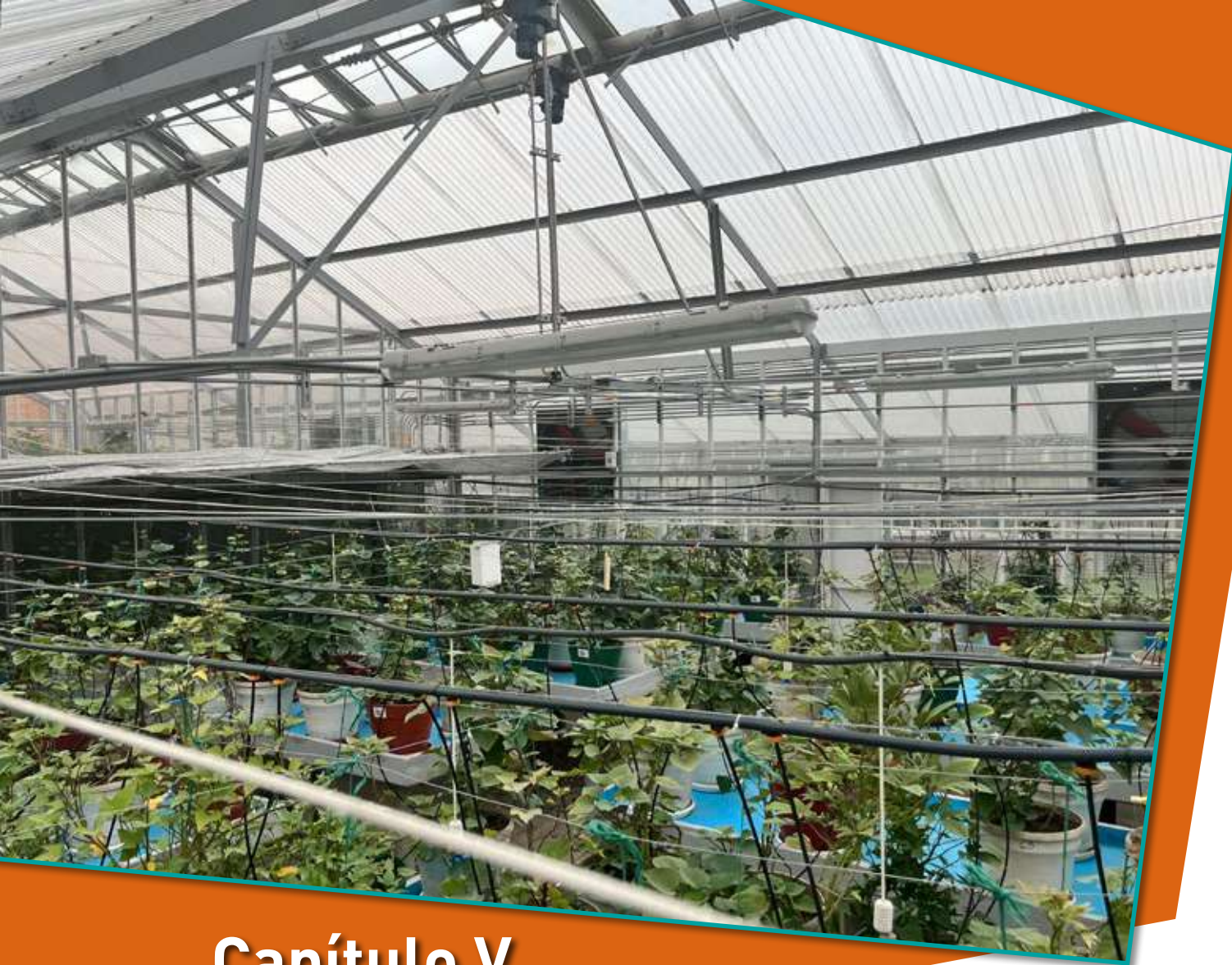
Referencias

- Antón, A., Hernández, J., Castilla, N., & Montero, J. I. (2000). Direct and diffuse light transmission of insect-proof screens and plastic films for cladding greenhouses. *Acta Horticulturae*, 559(559): 203-209. https://www.researchgate.net/publication/286849274_Direct_and_diffuse_light_transmission_of_insect-proof_screens_and_plastic_films_for_cladding_greenhouses
- Baeza, E. J., Pérez-Parra, J. J., Montero, J. I., Bailey, B. J., López, J. C., & Gázquez, J. C. (2009). Analysis of the role of sidewall vents on buoyancy-driven natural ventilation in parral-type greenhouses with and without insect screens using computational fluid dynamics. *Biosystems Engineering*, 104(1), 86-96. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.04.008>
- Baudoin, W., Nono-Womdim, R., Lutaladio, N., Hodder, A., Castilla, N., Leonardi, C., Pascale, S. De, & Qaryouti, M. (2013). Good Agricultural Practices for greenhouse vegetable crops: principles for Mediterranean climate areas [FAO plant production and protection paper 217]. FAO.
- Cabrera, F. J., Baille, A., López, J. C., González-Real, M. M., & Pérez-Parra, J. (2009). Effects of cover diffusive properties on the components of greenhouse solar radiation. *Biosystems Engineering*, 103(3), 344-356.
- Cabrera, F. J., López, J. C., Baeza, E. J., & Pérez-Parra, J. (2006). Efficiency of anti-insect screens placed in the vents of Almería greenhouses. *Acta Horticulturae*, 719. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2006.719.70>
- Castilla, N., & Hernández, J. (2005). The plastic greenhouse industry of Spain. *Chronica Horticulturae*, 45(3), 15-20.

- Díaz, T., Espí, E., Fontecha, A., Jiménez, J. C., López, J., & Salmerón, A. (2001). *Los filmes plásticos en la agricultura agrícola*. Mundi-Prensa.
- Espí, E. (2012). Materiales de cubierta para invernaderos. *CEA*, 3, 71-88.
- Espí, E., Salmerón, A., Fontecha, A., García-Alonso, Y., & Real, A. I. (2006). New ultrathermic films for greenhouse covers. *Journal of Plastic Film & Sheeting*, 22(1), 59-68.
- Fang, X., Libin, Z., Jiaoliao, C., & Hongwu, Z. (2005). Modeling and simulation of subtropical greenhouse microclimate in China. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 36(11), 102-105.
- Gázquez, J. C., López, J. C., Pérez-Parra, J., Baeza, E., Meca, D., & Parra, A. (2009). *Influencia de dos estrategias de refrigeración en la presencia de plagas y virus del bronceado del tomate en un cultivo de pimiento californiano en invernadero* [VI Congreso Ibérico Ciencias Hortícolas].
- Kim, H.-K., Lee, S.-Y., Kwon, J.-K., & Kim, Y.-H. (2022). Evaluating the effect of cover materials on greenhouse microclimates and thermal performance. *Agronomy*, 12(1), 143.
- Kittas, C., Katsoulas, N., Bartzanas, T., & Bakker, J. C. (2013). Greenhouse climate control and energy use. En *Good Agricultural Practices for greenhouse vegetable crops: Principles for Mediterranean climate areas* (pp. 63-95). FAO.
- López, A., Molina-Aiz, F. D., Valera, D. L., & Peña, A. (2016). Wind tunnel analysis of the airflow through insect-proof screens and comparison of their effect when installed in a Mediterranean greenhouse. *Sensors*, 16(5), 690. <https://doi.org/10.3390/s16050690>
- López-Marín, J., González, A., García-Alonso, Y., Espí, E., Salmerón, A., Fontecha, A., & Real, A. I. (2007). Use of cool plastic films for greenhouse covering in Southern Spain. *Acta Horticulturae*, 801, 181-186.
- Maraveas, C. (2019). Environmental Sustainability of Greenhouse Covering Materials. *Sustainability*, 11(21), 6129.
- Monci, F., García-Andrés, S., Sánchez, F., Moriones, E., Espí, E., & Salmerón, A. (2002). Tomato yellow leaf curl disease control with UV-blocking plastic covers in commercial plastic houses of Southern Spain. *Acta Horticulturae*, 633, 537-542.
- Montero, J. I., Teitel, M., Baeza, E., López, J. C., & Kacira, M. (2013). Greenhouse design and covering materials. En *Good Agricultural Practices for Greenhouse Vegetable Crops* (pp. 35-62). FAO.
- Montero, Juan Ignacio, Stanghellini, C., & Castilla, N. (2008). Invernadero para la producción sostenible en áreas de clima de invierno suaves. *Horticultura Internacional*, 65, 14-29.
- Papadakis, G., Briassoulis, D., Mugnozza, G. S., Vox, G., Feuilloley, P., & Stoffers, J. A. (2000). Review paper (SE-structures and environment): radiometric and thermal properties of, and testing methods for, greenhouse covering materials. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 77(1), 7-38.
- Pérez Parra, J., Martínez, C. P., Garrido, J. C. G., Hernández, J. C. L., Romero, E. B., & Abad, D. E. M. (2010). Tecnología de invernaderos y control biológico: técnicas de cultivo que afectan a la

Capítulo IV. Materiales de cubierta y cerramiento para la construcción de invernaderos: criterios técnicos para su selección

- viabilidad del control biológico en los invernaderos de Almería. *Cuadernos de Estudios Agroalimentarios*, 1, 7-26.
- Pérez Vega, C., Ramírez Arias, J. A., & López Cruz, I. L. (2016). Características aerodinámicas de mallas anti-insectos usadas en ventanas de invernaderos en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(3), 493-506.
- Pérez, C., López, J. C., Gázquez, J. C., Marín, A., & Bermúdez, M. S. (2009). Experiencias con plásticos antiplagas en cultivos de tomate y sandía. *Acta de Horticultura*, 54, 204-205.
- Rocha, G. A. O., Pichimata, M. A., & Villagrán, E. (2021). Research on the microclimate of protected agriculture structures using numerical simulation tools: a technical and bibliometric analysis as a contribution to the sustainability of under-cover cropping in Tropical and Subtropical countries. *Sustainability*, 13(18), 10433. <https://doi.org/10.3390/SU131810433>
- Tanny, J., Pirkner, M., Teitel, M., Cohen, S., Shahak, Y., Shapira, O., & Israeli, Y. (2014). The effect of screen texture on air flow and radiation transmittance: laboratory and field experiments. *Acta Horticulturae*, 1015, 45-52.
- Tantau, H.-J., Hinken, J., Von Elsner, B., Max, J. F. J., Ulbrich, A., Schurr, U., Hofmann, T., & Reisinger, G. (2012). Solar transmittance of greenhouse covering materials. *Acta Horticulturae*, 956, 441-448. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.956.51>
- Teitel, M. (2007). The effect of screened openings on greenhouse microclimate. *Agricultural and Forest Meteorology*, 143(3-4), 159-175. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2007.01.005>
- Teitel, M. (2010). Using computational fluid dynamics simulations to determine pressure drops on woven screens. *Biosystems Engineering*, 105(2), 172-179. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.10.005>
- Valera, D. L., Molina, F. D., & Álvarez, A. J. (2008). *Ahorro y eficiencia energética en invernaderos*. IDAE.
- Villagrán, E. A., Flores-Velázquez, 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.
- Villagrán, E. A., León, R., Rodríguez, A., & Jaramillo, J. (2020). 3D numerical analysis of the natural ventilation behavior in a Colombian greenhouse established in warm climate conditions. *Sustainability*, 12(19), 8101. <https://doi.org/10.3390/su12198101>
- Villagrán, E. A., & Bojacá, 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>
- Villagrán, E. A., & Bojacá, 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>



Capítulo V

86

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

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

Introducción

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

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

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

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

Variables de microclima relacionadas con la producción agrícola bajo invernadero

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

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

Radiación solar

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

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

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

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

Temperatura

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

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

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

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

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

Fuente: Elaboración propia con base en Tesi (1983)

Humedad relativa

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

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

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

Fuente: Elaboración propia con base en Tesi (1983)

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

Déficit de presión de vapor

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

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

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

Concentración de CO₂

El nivel de CO₂ en el ambiente del invernadero es un factor clave para el proceso de la fotosíntesis. La planta toma el CO₂ del ambiente y lo incorpora al tejido vegetal convirtiéndolo en materia seca (López-Cruz et al., 2005). El nivel de CO₂ ambiental actual es inferior al nivel de CO₂ óptimo que necesitan las plantas para expresar tasas de fotosíntesis altas, por lo tanto, se puede decir que la tasa de asimilación de carbono en niveles de CO₂ atmosférico (415 ppm) está por debajo del potencial que tienen las plantas en ambientes con carbono enriquecido (> 800 ppm) (Lorenzo, 2012).

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

En general, el enriquecimiento de CO₂ en el ambiente interior del invernadero puede permitir aumentos de las tasas de fotosíntesis hasta de un 50 %, en comparación con plantas que se desarrollan en ambientes con niveles de CO₂ cercanos al nivel atmosférico (Mortensen, 1987). Por otro lado, algunos estudios han demostrado que los niveles óptimos de CO₂ se encuentran dentro de los rangos entre los 700 y 1.000 $\mu\text{mol mol}^{-1}$, dependiendo del tipo de cultivo. Estos mismos estudios recomiendan no exceder niveles de CO₂ de 1.000 $\mu\text{mol mol}^{-1}$, ya que estos pueden producir algunos daños en las plantas y retardos en su proceso de crecimiento (Nederhoff, 1994; Sánchez-Guerrero et al., 2009).

Estrategias de control de clima activo

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

Sistemas de ventilación natural automatizados

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



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

Fuente: Elaboración propia

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

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

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

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

donde,

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

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

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

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

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

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

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

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

Ventilación forzada o mecánica

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

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

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

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

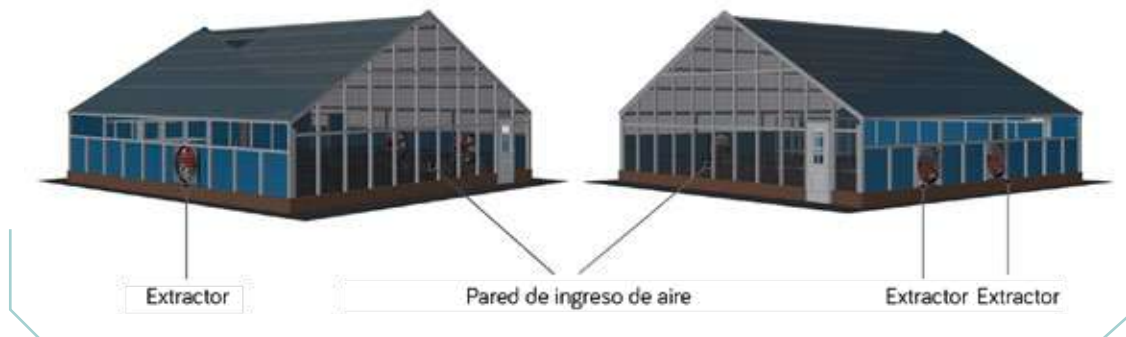


Figura 33. Método de ventilación forzada con pared de ingreso de aire.

Fuente: Elaboración propia

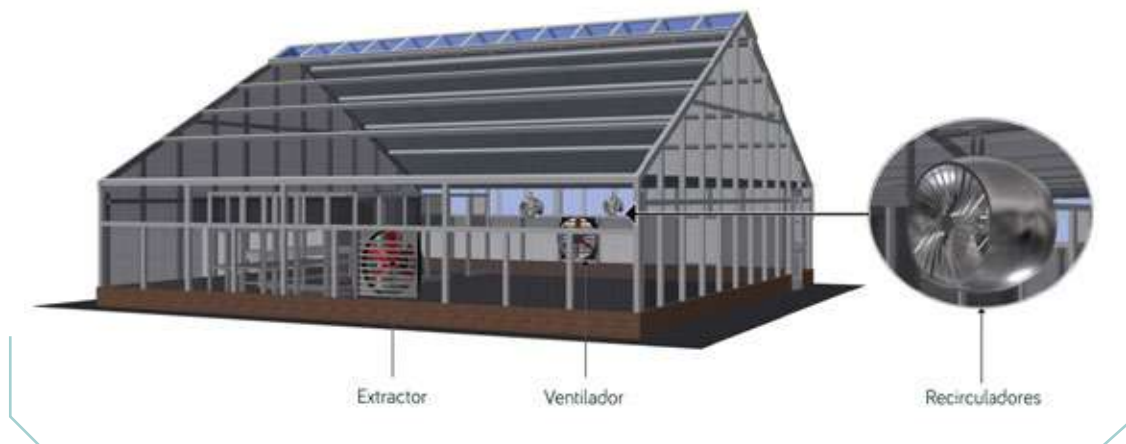


Figura 34. Método de ventilación forzada mediante extractor y soplador.

Fuente: Elaboración propia

Enfriamiento evaporativo simple

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

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

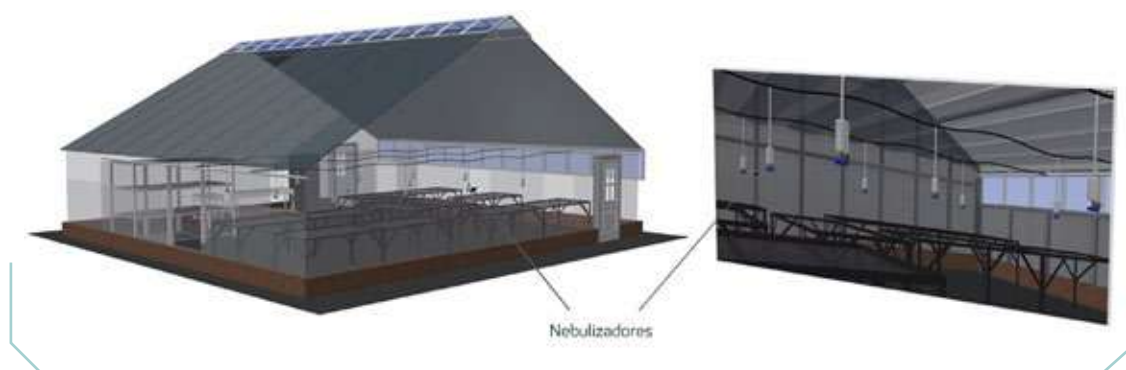


Figura 35. Método de enfriamiento evaporativo por nebulización de agua.

Fuente: Elaboración propia

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

Enfriamiento mediante sistema de almohadilla evaporativa y extracción de aire

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

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



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

Fuente: Elaboración propia

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

Calefacción

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

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

Modelo simplificado para determinar las necesidades energéticas de calefacción

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

$$E_r = UA(T_i - T_o) \quad \text{Ecuación 3}$$

donde,

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Ecuación 4

$$E_r = 35.532 \text{ W}$$

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

Sistemas de calefacción

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

Calentadores por aire caliente

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

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



Figura 37. Sistema de calefacción por aire caliente.

Fuente: Elaboración propia

Calentamiento por piso radiante

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

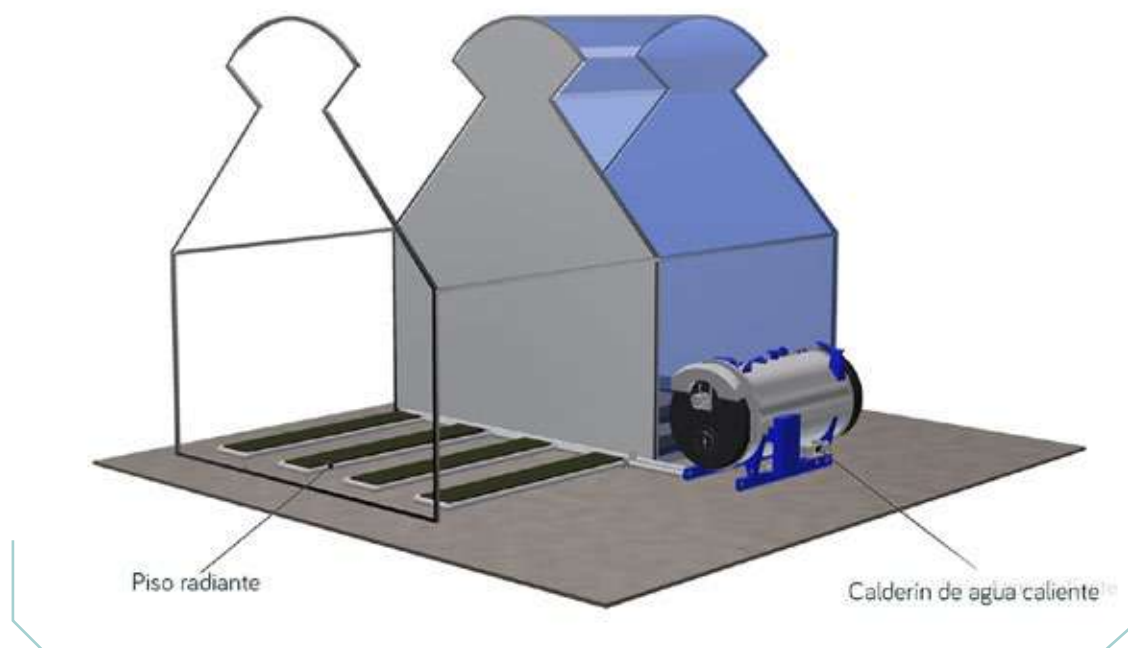


Figura 38. Sistema de calefacción por piso radiante.

Fuente: Elaboración propia

Sistemas de inyección de CO₂

Este tipo de sistema busca enriquecer la concentración de CO₂ en el ambiente interior, con lo cual se mejora la tasa fotosintética de las plantas y se pueden obtener aumentos superiores al 20 % en la producción total, respecto a invernaderos que no cuentan con sistemas de enriquecimiento carbónico (Sánchez-Guerrero et al., 2005). Estos sistemas también han cobrado interés para suplir las deficiencias de CO₂ que se pueden presentar en invernaderos de grandes superficies, debido a la escasa ventilación (Lorenzo et al., 1990).

La principal fuente de enriquecimiento carbónico usada en estas estructuras es la inyección localizada de CO₂ purificado, sin embargo, esta técnica tiene un costo elevado (figura 39). Por lo anterior, también existen otras estrategias de enriquecimiento carbónico que usan los gases de combustión generados en las labores de calefacción (Sánchez-Guerrero et al., 2005). Cuando se opte por esta alternativa, se deben controlar los niveles de SO₂, SO₃ y NO_x, ya que estos gases pueden generar daño sobre los cultivos, incluso en concentraciones muy bajas (Kittas et al., 2013).

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



Figura 39. Sistema de inyección de CO_2 purificado.

Fuente: Elaboración propia

Tendencias en climatización de invernaderos

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

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

Conclusiones

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

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

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

Referencias

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

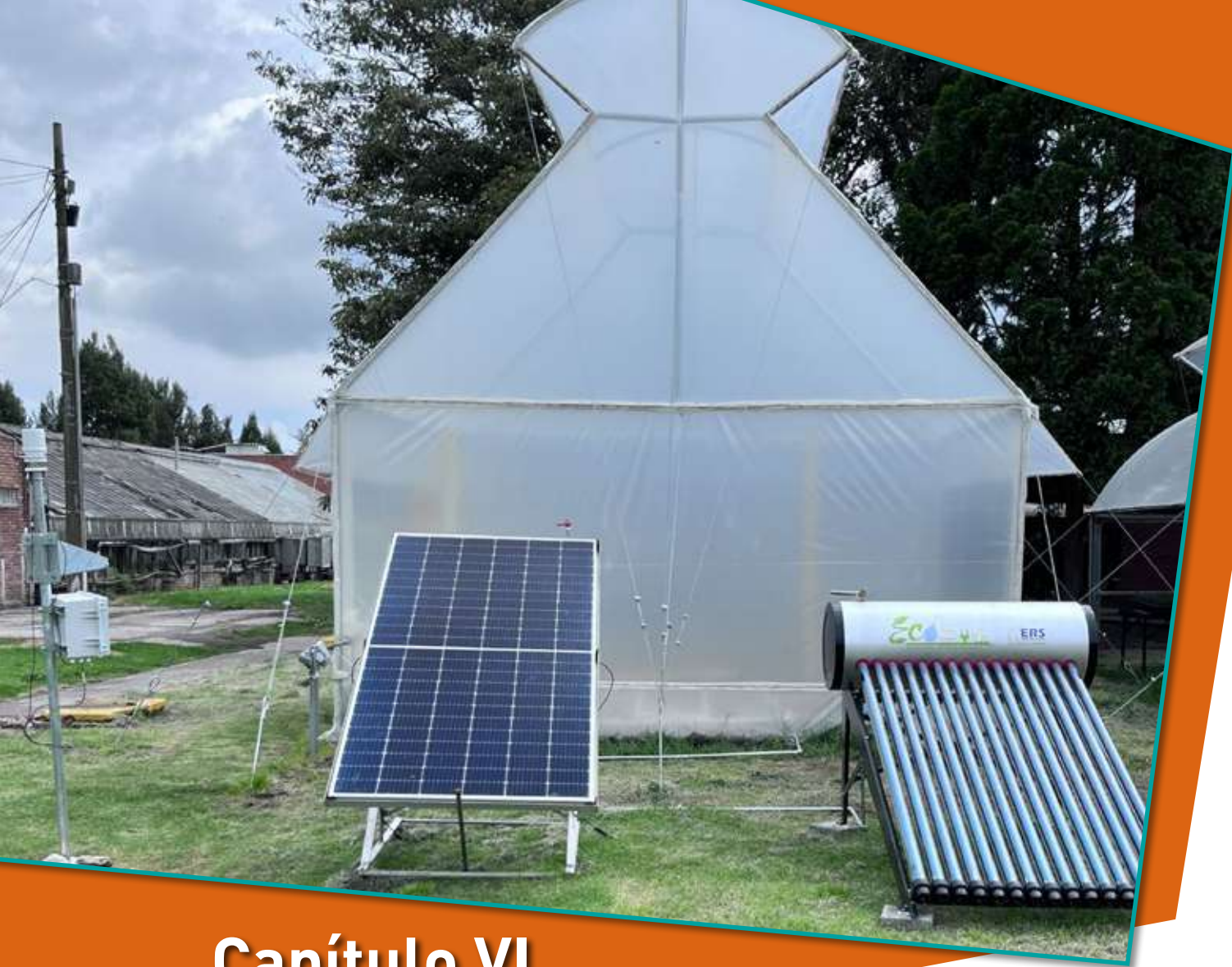
Fleisher, H. D., Logendra, S. L., Moraru, C., Both, A.-J., Cavazzoni, J., Gianfagna, T., Lee, T.-C., & Janes, W. H. (2006). Effect of temperature perturbations on tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) quality and production scheduling. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 81(1),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

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

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

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

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



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).

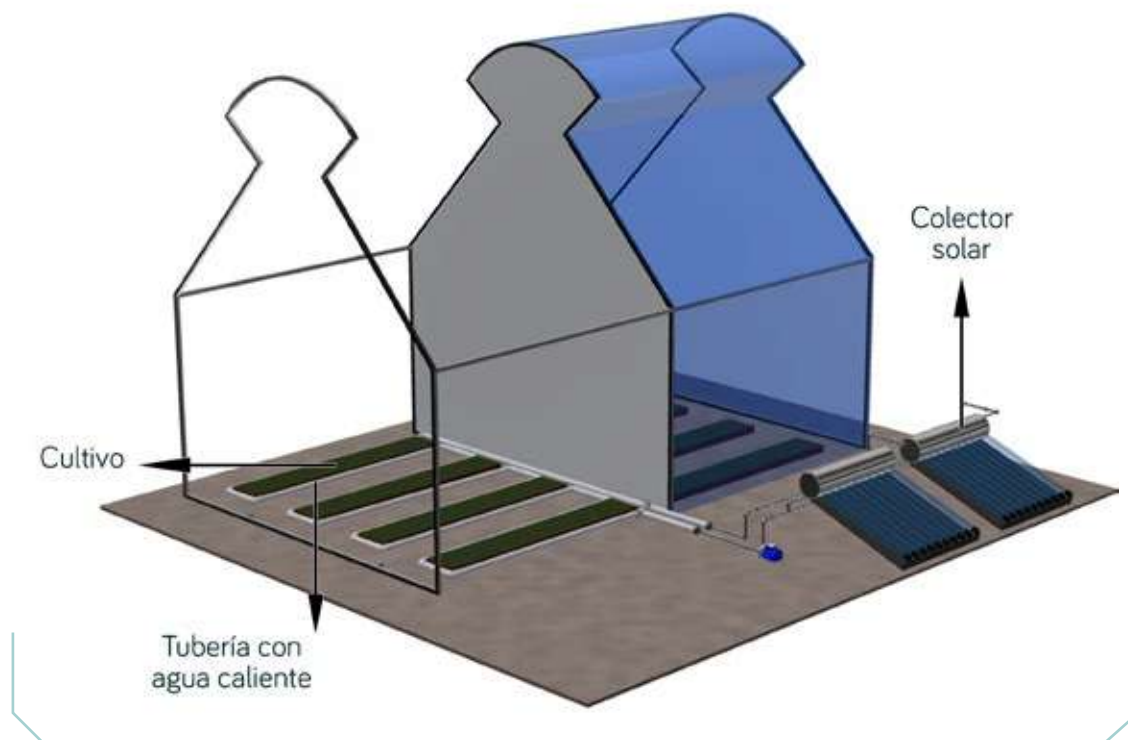


Figura 40. Sistema de almacenamiento térmico de agua con tubería de distribución en el invernadero.

Fuente: Elaboración propia

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).

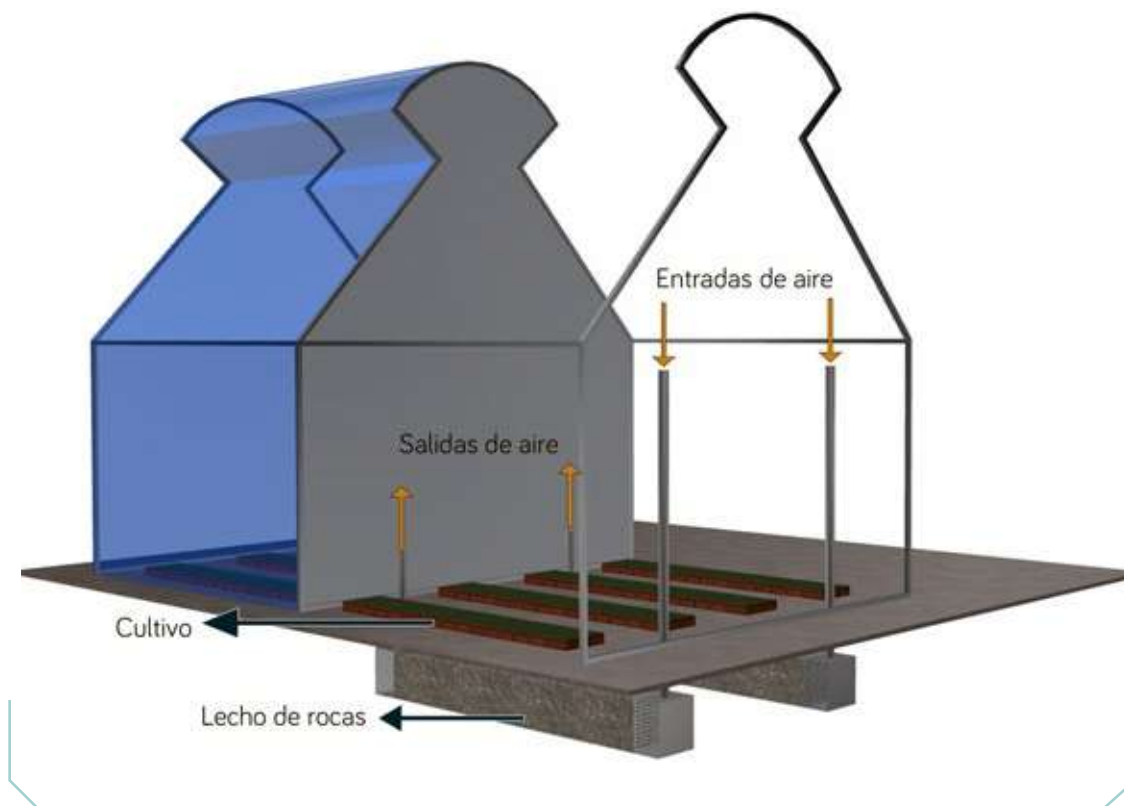


Figura 41. Sistema de almacenamiento térmico en lecho de roca en invernadero.

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 $2,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 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).

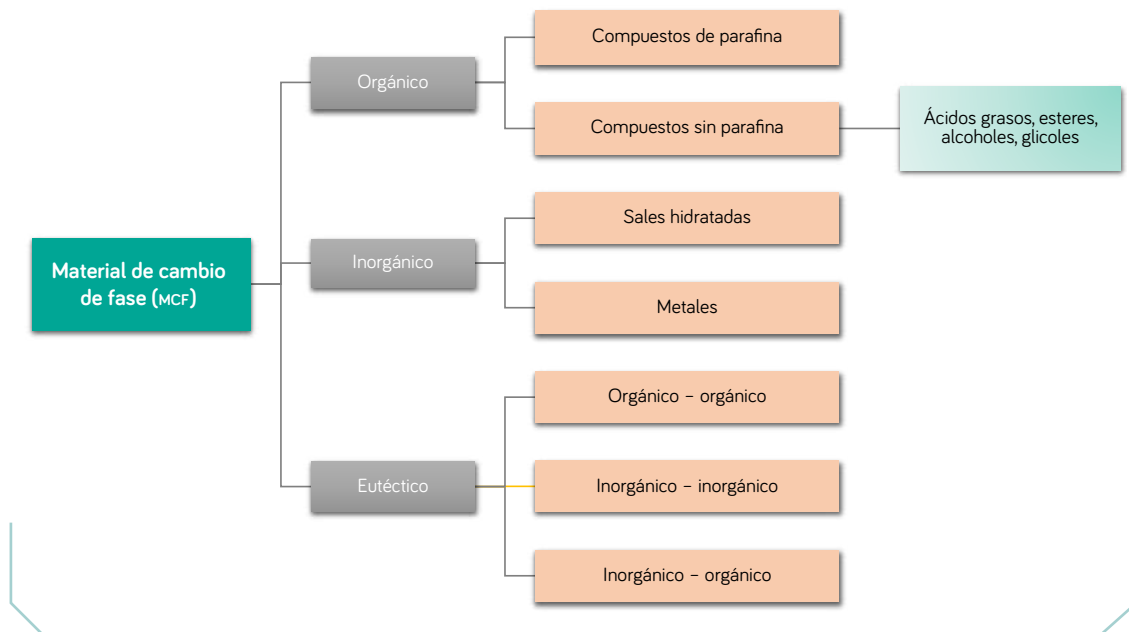


Figura 42. Clasificación de los materiales de cambio de fase.

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 °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 helióstatos, de plato parabólico y cilindroparabólicos. Esta tecnología es comúnmente utilizada para la generación de energía eléctrica.

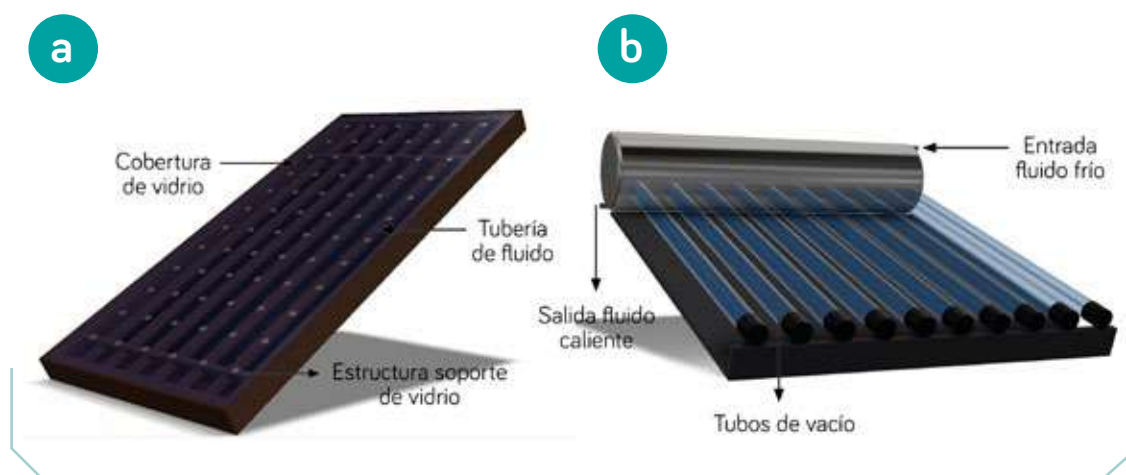


Figura 43. Colectores solares. a. De placa plana; b. De tubos de vacío.

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).

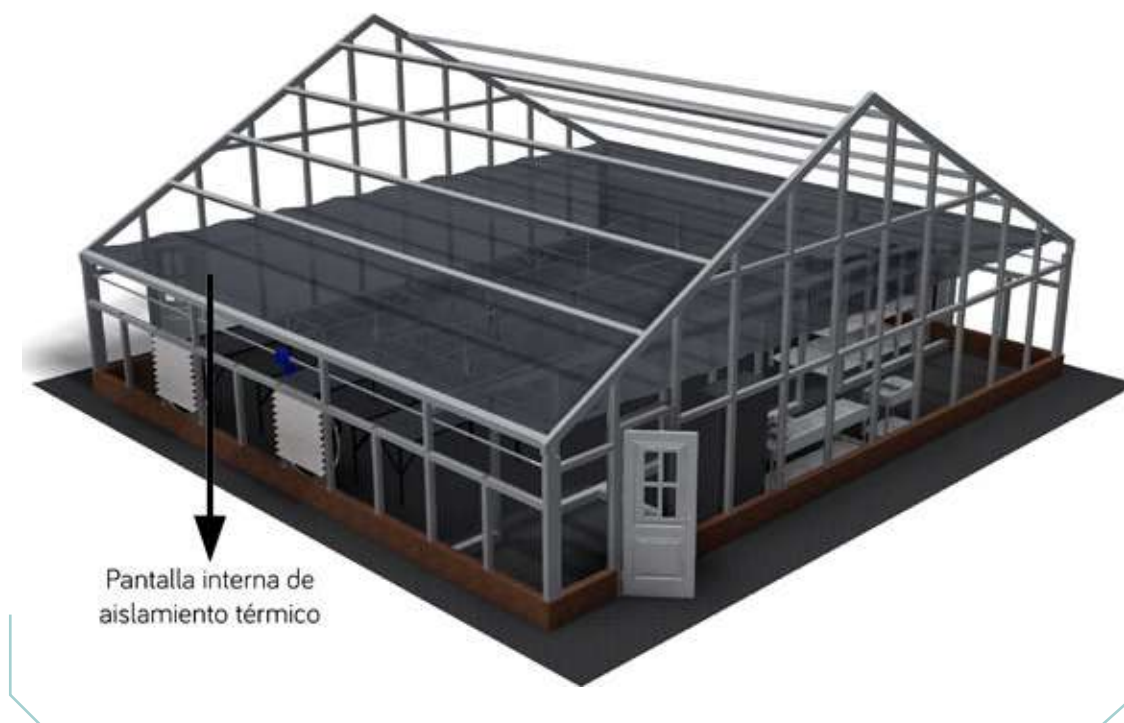


Figura 44. Pantalla interna de aislamiento térmico.

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

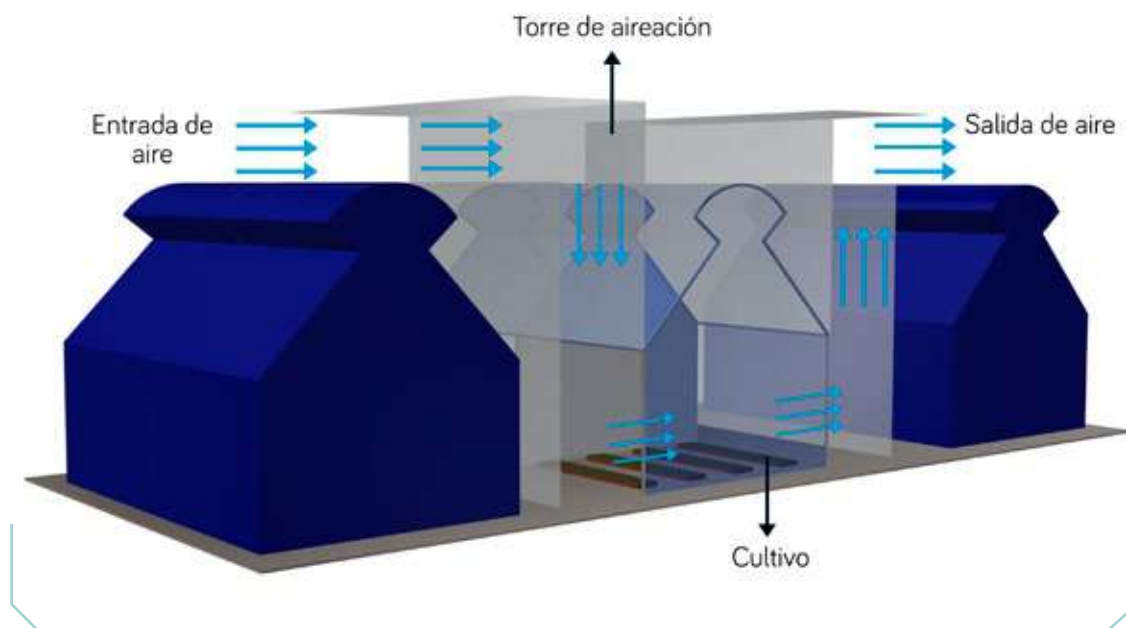


Figura 45. Torre de aireación en invernadero.

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 CO₂ 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 CO₂ (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

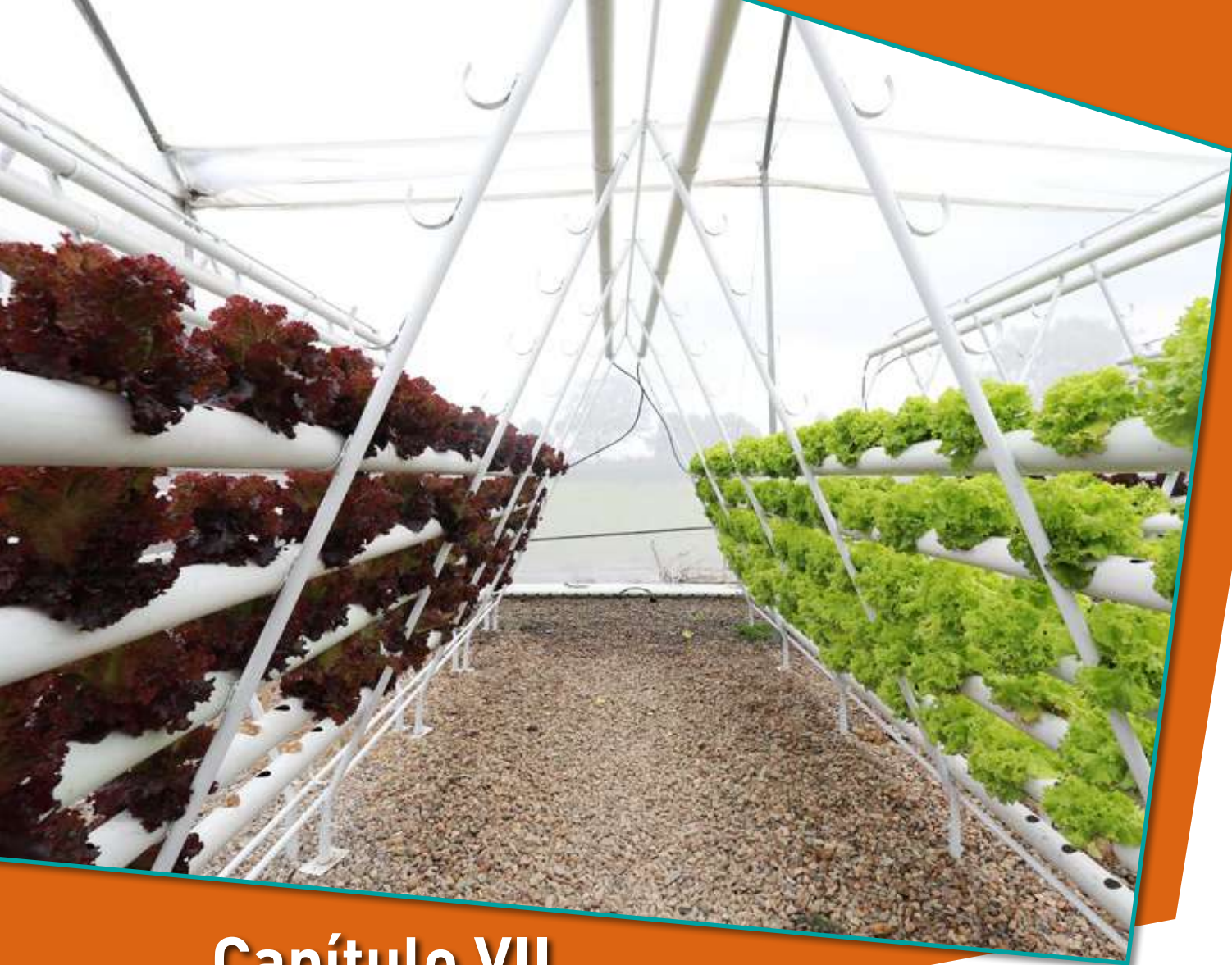
- Baddadi, S., Bouadila, S., & Guizani, A. (2019). Beneficial use of two packed beds of latent storage energy for the heating of a hydroponic greenhouse. *Energy Procedia*, 162, 156-163. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.04.017>
- Bazgaou, A., Fatnassi, H., Bouharroud, R., Elame, F., Ezzaeri, K., Gourdo, L., Wifaya, A., Demrati, H., Tiskatine, R., Bekkaoui, A., Aharoune, A., & Bouriden, 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., & Bouriden, 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>

Capítulo VI. Sistemas de climatización pasiva para invernaderos de cubierta plástica

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>



Capítulo VII

124

Avances de un modelo de producción hidropónico en agricultura vertical para hortalizas de hoja bajo ambiente protegido en la Sabana del occidente de Bogotá

Diego Alejandro Salinas Velandia
Julio Ricardo Galindo Pacheco
Edwin Andrés Villagrán Munar

Introducción

La horticultura requiere un cambio para enfrentar los problemas de seguridad alimentaria, seguridad nutricional, viabilidad ambiental y viabilidad económica que producen los sistemas agroalimentarios tradicionales. Estos no cumplen las expectativas actuales de la población mundial, pues no han generado el bienestar social que se espera de ellos. No se ha logrado abastecer alimentos asequibles y saludables y, por el contrario, se han generado impactos importantes a nivel medioambiental, así como en la salud pública y la justicia social. (Béné, 2019).

Todas las formas de malnutrición son el resultado de dietas deficientes, limitadas en el consumo de hortalizas, con conocimientos inadecuados, producciones alimentarias carentes de productos inocuos y con entornos insalubres (Degli et al., 2021). Para 2017, alrededor de 820 millones de personas seguían pasando hambre, más de 2.000 millones tenían carencias de vitaminas o minerales esenciales, cerca de 1.900 millones de adultos padecían sobrepeso y obesidad, y alrededor del 45 % de la mortalidad de los niños menores de cinco años estaba relacionada con la desnutrición (Committee on World Food Security, 2017). Al mismo tiempo, se estima que, en 2020, la emaciación¹ seguía amenazando la vida de 45,4 millones de niños menores de cinco años en todo el mundo, que el retraso en el crecimiento² ya había afectado a 149,2 millones, y que 38,9 millones de niños menores de cinco años están afectados por sobrepeso (United Nations International Children's Emergency Fund [Unicef] et al., 2021). Es probable que el impacto de la pandemia de la Covid-19 haya exacerbado estas cifras.

Las actividades relacionadas con los actuales sistemas agroalimentarios tienen un importante impacto medioambiental, acentuado en las producciones convencionales de productos de ciclo corto. Según la Oficina Europea de Medio Ambiente (OEMA), los sistemas agroalimentarios son responsables del

- 1** La emaciación en los niños es el resultado potencialmente mortal de una ingesta deficiente de nutrientes o de una enfermedad. Los niños que sufren emaciación tienen la inmunidad debilitada, son susceptibles de sufrir retrasos en el desarrollo a largo plazo y se enfrentan a un mayor riesgo de muerte, especialmente cuando la emaciación es grave (Unicef et al., 2021).
- 2** Los niños que sufren de retraso en el crecimiento pueden no alcanzar nunca su máxima estatura posible y sus cerebros pueden no desarrollar nunca todo su potencial cognitivo. Estos niños comienzan su vida con una marcada desventaja: se enfrentan a dificultades de aprendizaje en la escuela, ganan menos cuando son adultos y se encuentran con barreras para participar en sus comunidades (Unicef et al., 2021).

26 % de las emisiones de gases de efecto invernadero en todo el mundo, además de que contribuyen con la contaminación de recursos no renovables y aceleran la pérdida de la biodiversidad. Actualmente, el agua utilizada para riego representa cerca del 70 % de toda el agua dulce destinada al uso humano, y se prevé un aumento del 19 % en el consumo de agua para la agricultura a 2050 (Serrano-Carreón et al., 2022). Un informe del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) se refiere a la necesidad de reducir los desequilibrios de nitrógeno y fósforo para, asimismo, reducir la contaminación de las aguas dulces, subterráneas y costeras (Alvarado, 2021). El uso generalizado de plaguicidas persistentes y sistémicos se ha convertido en uno de los principales impulsores de la disminución de la biodiversidad, los servicios ecosistémicos y el control natural de plagas (Jacquet, et al., 2022; Geiger et al., 2010; Sánchez-Bayo & Wyckhuys, 2019), y ha contaminado los suelos y las aguas a largo plazo (Pietrzak et al., 2019).

Los esfuerzos realizados en el pasado para hacer frente al hambre y a la malnutrición en el mundo, y que se habían centrado en producir más alimentos a escala industrial, deben además tener en cuenta variables medioambientales, nutricionales, de inocuidad y de justicia social, por lo cual es necesario transitar a sistemas productivos alternativos. La horticultura protegida es una opción sostenible, productiva y rentable. Debido a que permite un uso más eficiente de los recursos y se presta para generar modelos de producción circulares, con la posibilidad de producir alimentos inocuos y nutritivos, la horticultura en ambiente protegido es una alternativa de transición a una agricultura circular de los sistemas agroalimentarios basados en cultivos de ciclo corto.

La producción en ambiente protegido permite mejores cosechas, al brindar la posibilidad de controlar los factores microclimáticos que afectan el crecimiento y desarrollo de las plantas. Al mismo tiempo, genera una barrera física para evitar infestaciones por plagas y cuenta con sistemas de riego que son utilizados en función de las necesidades del cultivo. Por lo tanto, un modelo productivo bajo ambiente protegido permite, con mayor facilidad, una gestión más eficiente de los recursos, al utilizar menor cantidad de plaguicidas y al hacer un uso racional del agua y los fertilizantes. Además, la agricultura protegida es una de las técnicas más productivas. Según Mechaqrane y Ouazzani Chahidi (2021), su rendimiento por superficie cultivada es 10 veces mayor que el del cultivo en campo libre, y la implementación de modelos circulares se facilita en producciones bajo cubierta. La agricultura protegida ha venido en aumento en las últimas tres décadas. Este modelo, que ha tenido gran alcance en la producción de plantas ornamentales, plantas medicinales y cultivos hortícolas, ha logrado proporcionar una cosecha de alta calidad, con un mayor potencial de rendimiento (Batra y Gandhi, 2019).

El alcance de la eficiencia de la agricultura protegida está determinado por su nivel tecnológico. La adopción de tecnologías permite que el modelo tenga mayores capacidades para hacer frente a los retos de sostenibilidad ambiental y económica. Así, un modelo de agricultura protegida que incorpore mayores niveles tecnológicos tendrá mejores perspectivas productivas que un sistema con limitaciones (Montero et al, 2013). Los sistemas de funcionamiento de la agricultura en ambiente protegido dependen de su capacidad, su orientación y sus materiales, así como del viento, la radiación y los métodos de control de sus parámetros climáticos interiores (Mortensen, 1986; Pontikakos et al., 2006).

Las estructuras de agricultura protegida se pueden clasificar en dos: activas y pasivas, dependiendo del nivel tecnológico utilizado para adaptar las condiciones microclimáticas, según los requerimientos de los sistemas productivos. En las estructuras pasivas, la gestión del microclima se limita a la ventilación natural y a las técnicas de sombreado o blanqueo de la cubierta, por lo cual es un tipo de estructura que predomina en climas no extremos y poco cambiantes. Las estructuras activas gestionan el comportamiento de la temperatura, la humedad, la radiación y los niveles de CO₂ en el interior del invernadero, empleando tecnologías para ello (Villagrán et al., 2021), por lo cual suelen utilizarse en climas templados, en donde las variaciones de sus condiciones climáticas son constantes.

En la Sabana de Bogotá, la producción de hortalizas de hoja ha venido transitando de una agricultura a cielo abierto hacia un modelo de agricultura protegida de bajo nivel tecnológico. Los horticultores se han concentrado, en gran medida, en el municipio de Tenjo, donde se utilizan cultivos bajo invernadero en un total de 362 hectáreas y donde se emplean sistemas hidropónicos, que les han permitido mejorar sus canales de comercialización.

Los horticultores de Tenjo ocupan el 45 % de los predios con invernaderos, lo cual se explica porque son un gran número de pequeñas explotaciones de economía familiar (Marín & Maury, 2018). La producción de lechuga hidropónica permite un uso más intensivo de las áreas, en una zona donde la disponibilidad del suelo es casi nula debido a su alto costo. De manera similar, el agua limpia que requiere la hidroponía es también costosa, pero una ventaja importante del sistema hidropónico es que utiliza este recurso en forma más eficiente que un cultivo en suelo. Sin embargo, la mayoría de las estructuras de ambiente protegido en Tenjo son de categoría pasiva y con niveles tecnológicos muy bajos, y en muchos casos son sencillas y solo cumplen la labor de proteger las plantas de la lluvia, por lo cual la calidad en la regulación del microclima es deficiente y no se alcanzan todas las ventajas que la agricultura

protegida de mayor nivel tecnológico permite. Por esta razón, desde AGROSAVIA se ha venido trabajando en una propuesta de modelo tecnológico en horticultura circular vertical, bajo ambiente protegido, para mejorar el nivel tecnológico de los horticultores en la Sabana de Bogotá. El objetivo de este capítulo es describir la experiencia investigativa en el desarrollo de dicho modelo productivo, que podría mejorar el nivel tecnológico de los horticultores en esta región.

Agricultura vertical como sistema de producción de alimentos

Aunque la agricultura vertical ha tenido un auge en los últimos años, como una alternativa para intensificar la producción agrícola, vale la pena mencionar que esta práctica de cultivo en realidad empezó a emplearse en algunas civilizaciones antiguas. Existe evidencia de que, en Mesopotamia, más exactamente en Babilonia, hace más de 2.500 años, se construyeron jardines colgantes (Hindle, 2012). Asimismo, el término agricultura vertical fue utilizado por primera vez en registros científicos por Gilbert Ellis Bailey, en 1915, en su libro *Vertical farming*. En este documento se describían algunos aspectos del cultivo vertical usado para la producción de especies vegetales en el interior de edificios de varios pisos (Rees, 1981).

En el siglo XXI, la agricultura vertical, en cuanto técnica, surge como una alternativa comercial interesante para la producción de alimentos cerca de las ciudades o en regiones con condiciones biofísicas marginales. Por lo tanto, las técnicas de cultivo vertical se apoyan en gran medida en las tecnologías emergentes existentes para la aplicación de agua de riego y fertirriego, y para el control de las condiciones ambientales (Kalantari et al., 2018). Por ello, en la actualidad las plantaciones verticales se usan en diferentes contextos y bajo diferentes niveles tecnológicos de infraestructura y equipamiento, sin embargo, independiente del nivel tecnológico o del contexto, una realidad probada científicamente es que la agricultura vertical permite una mayor producción de alimentos por unidad de área disponible (Zaręba et al., 2021).

Técnicas de cultivo vertical

Algo muy relevante en el establecimiento de sistemas de producción vertical es la técnica seleccionada para realizar los procesos de siembra y nutrición de las plantas de cultivo (tabla 22).

Tabla 22. Algunas técnicas de siembra para cultivo vertical

Técnica de siembra	Características
Cultivos en sustrato o cultivos sin suelo (css).	Esta práctica consiste en usar sustratos inertes (turba, piedra pómez, vermiculita, fibra de coco, cascarilla de arroz, entre otros) dispuestos en contenedores o canaletas plásticas. En el sustrato se siembra la plántula y mediante pulsos de riego se le añade una solución nutritiva con los elementos esenciales para su crecimiento y desarrollo normal (Quintero et al., 2011).
Hidroponía.	Esta técnica de siembra se caracteriza por usar el agua como sistema de soporte para la nutrición y establecimiento del cultivo. Se pueden usar estanques llenos de agua con oxigenación y ozono, donde adicionalmente se aplican los fertilizantes para la nutrición del cultivo. Esta técnica se conoce como sistema de raíz flotante. Por otro lado, también puede ser un sistema basado en canaletas o tuberías, por donde se hace fluir agua pura y agua con fertilizantes. Los pulsos de riego y fertirriego se establecen de acuerdo a la demanda hídrica y nutricional del cultivo (Harris, 1992).
Acuaponía.	Este tipo de sistema de siembra busca optimizar las relaciones simbióticas entre peces y plantas. La acuaponía surge de la implementación de un sistema parcialmente autosuficiente en el que se busca que los peces del estanque puedan producir desechos ricos en nutrientes que posteriormente son usados por las plantas (Goddek et al., 2019).
Aeroponía.	Es una técnica inventada por la NASA en la década de los noventa para cultivar plantas sin suelo. Su principio de funcionamiento está basado en la nebulización del agua mediante microaspersores con boquillas diminutas o pulverizadores de agua. El agua en forma de niebla es aplicada directamente sobre el sistema radicular de las plantas.

Fuente: Elaboración propia

Tipologías de granja vertical

Agricultura vertical a campo abierto

Este sistema de cultivo es adaptable a contextos urbanos, periurbanos y rurales, y su objetivo es garantizar el acceso a alimentos vegetales a los miembros de una familia o de una comunidad: esto dependerá del tamaño de la granja vertical. Este tipo de sistema busca maximizar la producción hortícola por unidad de área, por lo tanto, se requiere de una infraestructura básica, entre las que cabe mencionar el sistema vertical de siembra y el sistema de riego y fertilización (figura 47). Estas experiencias se desarrollan a campo abierto y,

por ende, tienen la desventaja de ser vulnerables a las condiciones climáticas locales y al ataque de plagas y enfermedades. Sin embargo, cuentan con la ventaja de ser sistemas asequibles para un mayor número de individuos con menor capacidad económica.



Figura 47. Agricultura vertical a campo abierto.

Fuente: Elaboración propia

Agricultura vertical en ambiente protegido

Este tipo de sistema se conoce también como agricultura protegida vertical (APV) y consiste en un cultivo establecido bajo condiciones de invernadero, en las que se incluyen estructuras verticales de siembra, ya sea para aeropónica o hidroponía. Respecto a los sistemas anteriormente descritos, es importante mencionar que este es menos vulnerable a las condiciones climáticas externas, y que con un adecuado manejo de áreas de ventilación puede limitar al máximo la presencia de plagas y enfermedades limitantes para el crecimiento de los cultivos (Candia Pacheco & Quiroga Sossa, 2018). Los invernaderos

usados para este tipo de producción pueden ser de baja o media tecnología. Es importante contar con sistemas de riego y fertirriego precisos y con sistemas de recirculación de soluciones nutritivas que permitan aumentar la eficiencia en el uso de fertilizantes (figura 48).

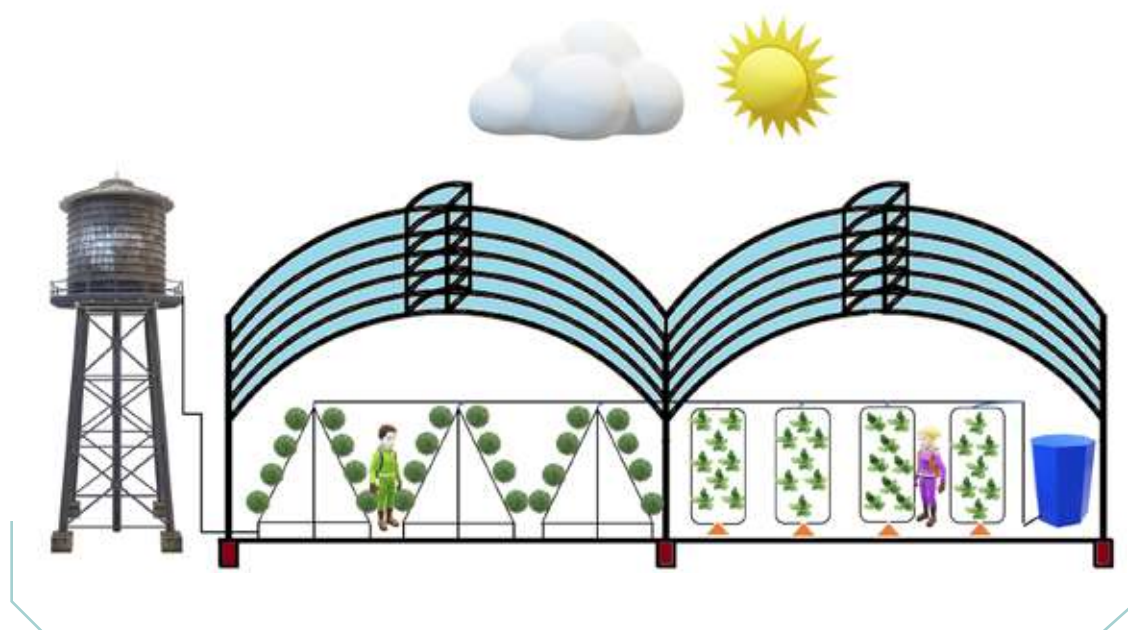


Figura 48. Agricultura vertical en ambiente protegido.

Fuente: Elaboración propia

Agricultura vertical en granjas modulares de alta tecnología (*indoor farms*)

Esta tipología de sistema se desarrolla completamente en ambientes interiores, para lo cual pueden usarse bodegas o contenedores acondicionados con sistemas verticales de siembra, y donde, además, se cuenta con un control total de las condiciones de temperatura, humedad, nivel de luminosidad y concentración de CO_2 . Por lo tanto, con este sistema se pueden producir alimentos vegetales bajo cualquier condición climática a nivel mundial. Estas granjas modulares cuentan con equipos y controladores para la gestión climática y el control preciso de riego y fertirriego. Asimismo, el registro de datos de crecimiento y desarrollo de las plantas es continuo y se usa para la toma de decisiones de manejo agronómico (Zaręba et al., 2021). Es importante mencionar que este tipo de sistema, altamente tecnológico, busca el continuo uso de energías renovables

para satisfacer parcial o totalmente el consumo energético de la granja vertical (figura 49). Por último, dentro de sus desventajas principales se debe mencionar que es demasiado costoso, por lo cual es poco asequible para un gran número de agricultores.

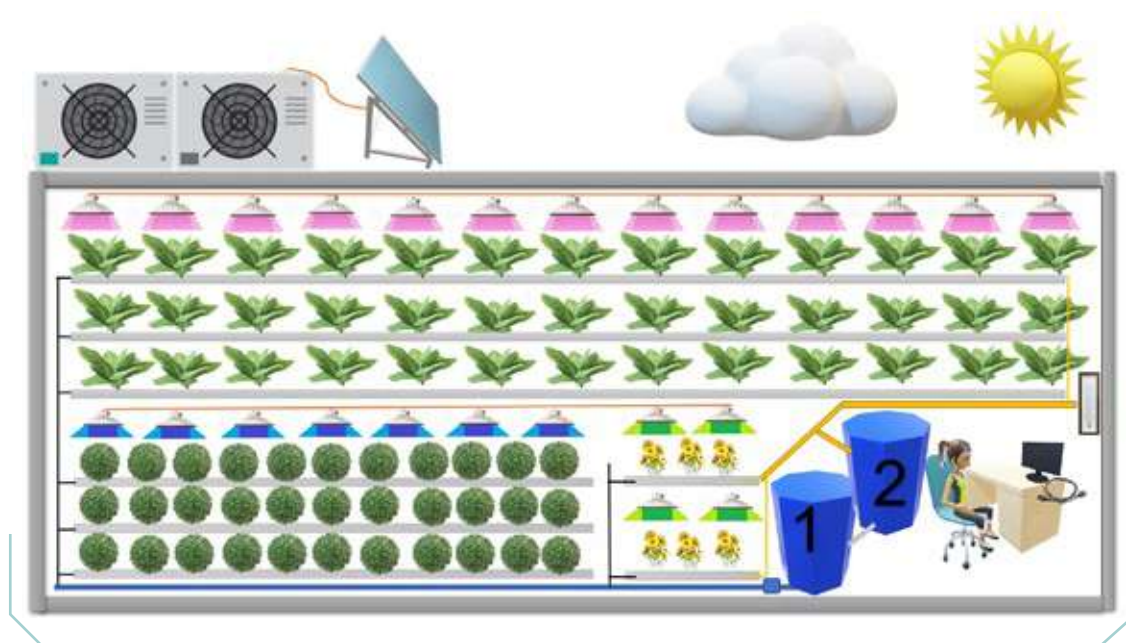


Figura 49. Agricultura vertical en granja modular de alta tecnología.

Fuente: Elaboración propia

Experiencia con un modelo de producción de lechuga en agricultura vertical

Infraestructura

La experiencia de agricultura vertical con la técnica de hidroponía se realizó en un invernadero pasivo de cubierta plástica de 110 m², cuyos costados laterales y frontales se cubrieron con una malla antiinsecto (figura 50).



Figura 50. Estructura de invernadero usado para producción vertical.

Foto: Edwin Villagrán

Para el sistema hidropónico, se utilizó una estructura de frente triangular, proyectado a profundidad en dos vertientes o laterales (2,5 m de base, 2,8 m de alto y 6 m de largo), en la cual se colocaron los tubos de 3 ¼" de diámetro distanciados cada 25 cm, y perforados con agujeros de 3,6 cm de diámetro cada 15 cm (40 agujeros/tubo) (figura 51). Se contó con once tubos ubicados a diferentes alturas (niveles) por cada lateral de la estructura. La alimentación hídrica se hizo de la parte alta hacia abajo. La solución nutritiva se subió a la punta de la estructura mediante bombeo, y bajó por gravedad desde el último hasta el primer tubo en la base, haciendo un recorrido en zig-zag, considerando que los tubos estaban interconectados por un solo lado mediante tubos de PVC de ½". Se aplicó el sistema hidropónico de producción por raíz flotante, para lo cual los tubos de PVC de la estructura se llenaron a la mitad de su capacidad con la solución nutritiva. De este modo, una parte del sistema radicular permanecía aireado, mientras otra parte se sumergía en la solución y aprovechaba sus nutrientes.

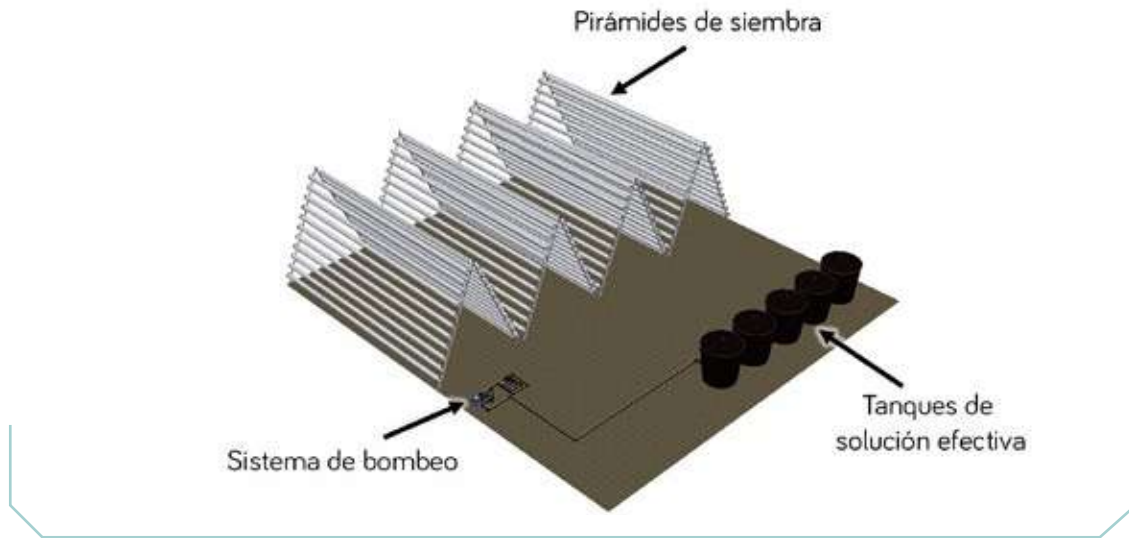


Figura 51. Estructura de dos vertientes para el soporte de los tubos hidropónicos.

Fuente: Elaboración propia

El sistema de riego se presurizó con una electrobomba y la aplicación de agua y solución nutritiva de fertilización fue automatizada mediante un controlador de riego de ocho estaciones (figura 52).

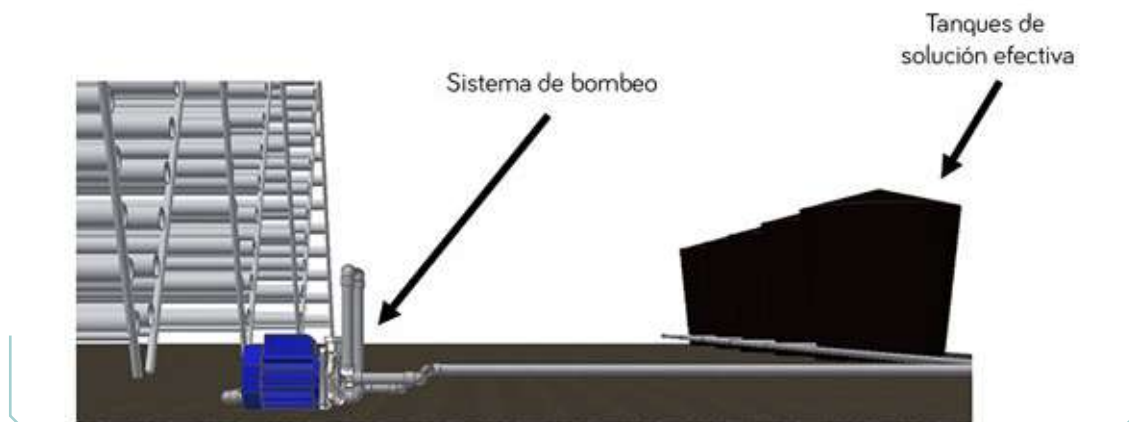


Figura 52. Sistema de aplicación de riego y fertilizantes.

Fuente: Elaboración propia

Manejo del cultivo

Selección del material de siembra

Es importante que el material de siembra esté certificado, con el fin de garantizar buena calidad y evitar al máximo futuros problemas fitosanitarios, fisiológicos y genéticos. Por lo tanto, el establecimiento donde se produce el material debe cumplir con las buenas prácticas agrícolas, lo cual debe estar respaldado por una entidad certificadora, como el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA).

Los ensayos realizados en el C. I. Tibaitatá de AGROSAVIA (Mosquera, Cundinamarca) utilizaron los materiales de lechuga tipo batavia (Iceberg), verde crespa (Vera) y crespa morada (Carmim), a los cuales se hace referencia más adelante.

En el trasplante, las plantas pueden diferir por su tamaño y vigor, y su desarrollo posterior en el cultivo hidropónico frecuentemente mantendrá o, incluso, aumentará dichas diferencias. Por ello, es importante hacer una selección inicial del material, de modo que sea lo más uniforme posible.

Por motivo del trasplante, las plantas pueden sufrir lesiones que les impedirán desarrollarse normalmente. Por lo tanto, es conveniente contar con una reserva de plantas para sustituir aquellas que no puedan establecerse adecuadamente en el cultivo hidropónico. Por ejemplo, puede estimarse entre un 5 y un 10 % el material adicional que debe estar listo para suplir descartes por selección (vigor y sanidad) y reponer posibles daños en el trasplante.

Manejo del agua

En general, se ha observado que el consumo de agua en un sistema hidropónico es menor al que se presenta para un mismo número de plantas en sistemas de producción en suelo a campo abierto. Esto es importante, considerando que la demanda de agua en el mundo está aumentando, debido al incremento de la población humana y al calentamiento global (Ercilla-Montserrat et al., 2018), por lo que se requieren alternativas más eficientes en el uso de este recurso.

En parte, la razón por la cual se requiere menos agua en un sistema cerrado consiste en que las paredes de la estructura ayudan a reducir el impacto del viento, lo cual contribuye a reducir la evapotranspiración del cultivo. Además, en cuanto las arvenses no intervienen en estos sistemas, no habrá transpiración vegetal por parte de esas fuentes. Adicionalmente, no hay pérdidas de percolación, como ocurre en el suelo, sino que, más bien, puede darse el reciclaje de agua (Zimmermann & Fischer, 2020). El techo de la estructura ayuda

a atenuar el impacto de la radiación solar, lo cual puede reducir la transpiración excesiva de las plantas. La recirculación de agua y la mínima descarga en los sistemas hidropónicos se ha validado en múltiples cultivos, incluyendo papa y batata (Wheeler, 2017).

De acuerdo con la experiencia de AGROSAVIA, para un ciclo de cultivo de lechuga crespa verde de 45 días, se requieren aproximadamente 4,83 l de agua por planta. También es importante resaltar que 30 días después del trasplante se presenta un mayor consumo hídrico (figura 53). Por último, la eficiencia aproximada en el uso de agua fue de 25 gl^{-1} , comparable con los resultados de Michelin et al. (2020).

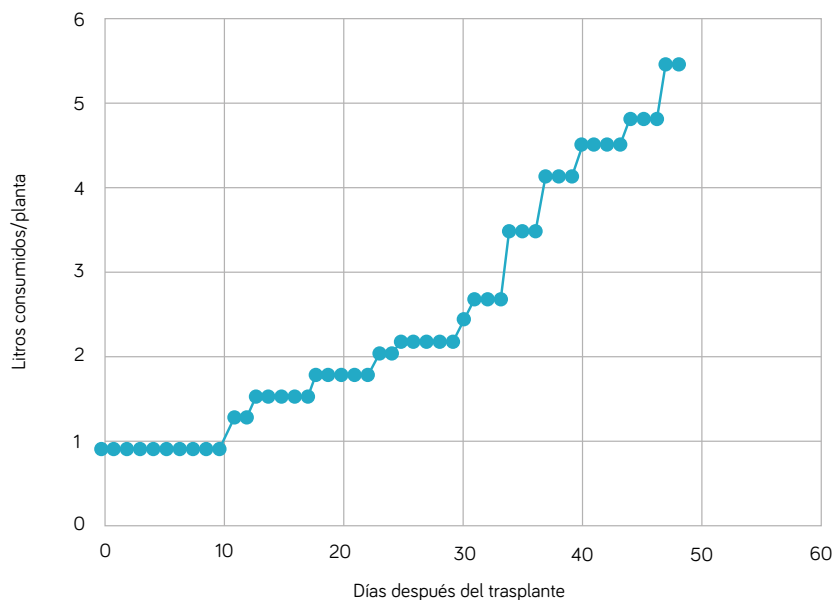


Figura 53. Curva del consumo acumulado de agua por planta de lechuga verde crespa.

Fuente: Elaboración propia

Manejo de la nutrición vegetal

Con el consumo de solución nutritiva a lo largo del ciclo de cultivo de la lechuga crespa, y considerando las variaciones en la dosificación de nutrientes, que se hizo mayor con el desarrollo vegetal, se obtuvo el consumo por nutrientes que se presenta en la figura 54. Se calculó el consumo por unidad de área, considerando la cobertura de la estructura.

Capítulo VII. Avances de un modelo de producción hidropónico en agricultura vertical para hortalizas de hoja bajo ambiente protegido en la Sabana del occidente de Bogotá

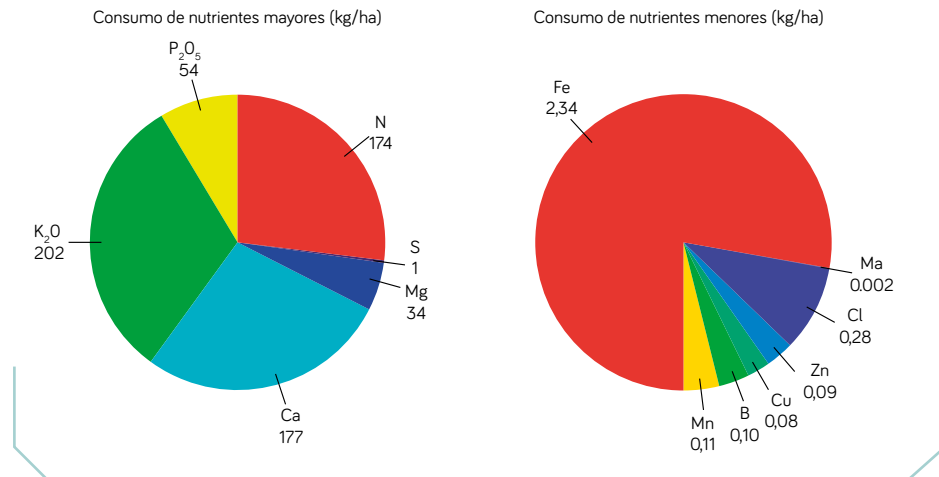


Figura 54. Consumo de nutrientes mayores y menores por el cultivo hidropónico.

Fuente: Elaboración propia

Se destaca que el potasio (K) es el elemento que más consume el cultivo. Entre los elementos menores, el hierro (Fe) sobresale por consumirse incluso en mayor cantidad que el azufre (S). Las propuestas de investigación a futuro se relacionan con el uso de sustitutos de la fertilización mineral o, también, de fuentes orgánicas, como complementos (vermicompuestos) y otras posibilidades, considerando la experiencia que se tiene en la acuicultura (Deepthi et al., 2021). Arcas-Pilz et al. (2021) probaron diferentes sustitutos de la fertilización mineral para el cultivo del frijol (*Phaseolus vulgaris*) sin suelo, utilizando subproductos del tratamiento de aguas residuales (estruvita) y la inoculación con *Rhizobium* (bacteria fijadora del nitrógeno [N] atmosférico). De esta forma, lograron surtir las necesidades de N de la planta.

Comportamiento de la radiación fotosintéticamente activa bajo invernadero

Para las condiciones imperantes bajo cubierta plástica, la radiación solar fotosintéticamente activa presentó una distribución asimétrica (figura 55), con un promedio en $380 \mu\text{mol}$ de fotones $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$, y un máximo de 1.200, según las mediciones del sistema de medición de fotosíntesis portátil (LICOR-LI 6800). En estas condiciones protegidas, la radiación acumulada por día se estimó en $16,416 \text{ mol}$ de fotones $\text{m}^{-2} \text{ día}^{-1}$.

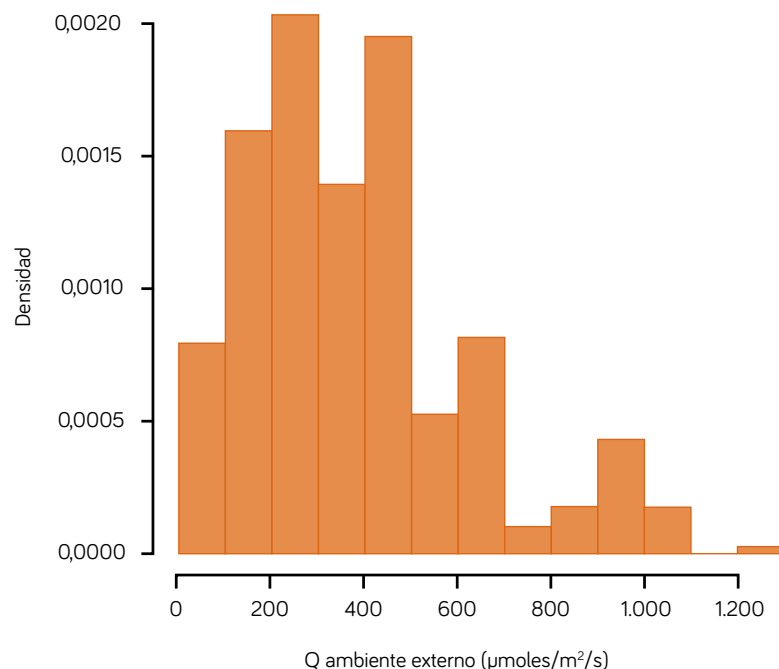


Figura 55. Distribución de la radiación fotosintéticamente activa en condiciones de cubierta plástica en el Centro de Investigación Tibaitatá de AGROSAVIA.

Fuente: Elaboración propia

El sistema hidropónico puede recibir diferentes niveles de luminosidad, según el número de tubos que estén alineados en una misma ala de la estructura, por lo que el rendimiento a cada nivel puede afectarse en alguna medida. Por tanto, en agricultura vertical, se utilizan *light emitting diodes* (LED) para suministrar la energía lumínica extra que las plantas requieran para su crecimiento (Wheeler, 2017). Con el manejo adecuado de la longitud de onda y de la intensidad, es posible cultivar diferentes especies, incluyendo la patilla (Moosavi-Nezhad et al., 2022). Incluso, con el manejo de diferentes longitudes de onda, se puede mejorar el desempeño de las plantas respecto al resultado con luz solar. Zou et al. (2020) encontraron una razón de efectividad del 83,6 % entre la luz LED de espectro solar y la LED combinada rojo-azul, en cuanto a la fotosíntesis neta evaluada en lechuga.

Obviamente, si se depende de la radiación solar disponible en la zona, es importante conocer sus aportes y comportamiento a lo largo del año. La radiación que puede incidir en el invernadero depende de las condiciones externas, que corresponden, en este caso, a la Sabana de Bogotá, específicamente, en Mosquera, Cundinamarca. La radiación global incidente en las condiciones del

Capítulo VII. Avances de un modelo de producción hidropónico en agricultura vertical para hortalizas de hoja bajo ambiente protegido en la Sabana del occidente de Bogotá

Centro de Investigación Tibaitatá de AGROSAVIA, según mediciones de la estación climática del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam) en el sitio, es de un promedio de 12,87 MJ/día (figura 56), para el mes de febrero, uno de los meses más soleados del año. Este resultado es similar a las observaciones del Ideam para Bogotá, que promedian al año una radiación de 14 MJ/día, según la estación de El Dorado (figura 57), y que aumenta ligeramente a finales y comienzos de año.

Tratándose de radiación global, es importante estimar la radiación fotosintéticamente activa (RFA). Dicha radiación se define comprendida entre los 400 y 700 nm de longitud de onda y constituye un 46 % de la radiación global filtrada por la atmósfera (figura 58). Por lo tanto, para una radiación media de 14 MJ/día, se estima que la RFA es de 6,3 MJ/día.

Para el ciclo de cultivo de 67 días de una lechuga batavia, se calculó que la radiación fotosintética total fue de 422 MJ. Se estima que el cultivo logra interceptar un 59 % de la radiación recibida durante el ciclo. Sin embargo, el cálculo de la biomasa exige que se consideren las variaciones de la eficiencia en el uso de la luz, como se verá más adelante.



Figura 56. Radiación global diaria en condiciones del Centro de Investigación Tibaitatá de AGROSAVIA.

Fuente: Elaboración propia con base en datos de la estación del Ideam en el Centro de Investigación Tibaitatá de AGROSAVIA

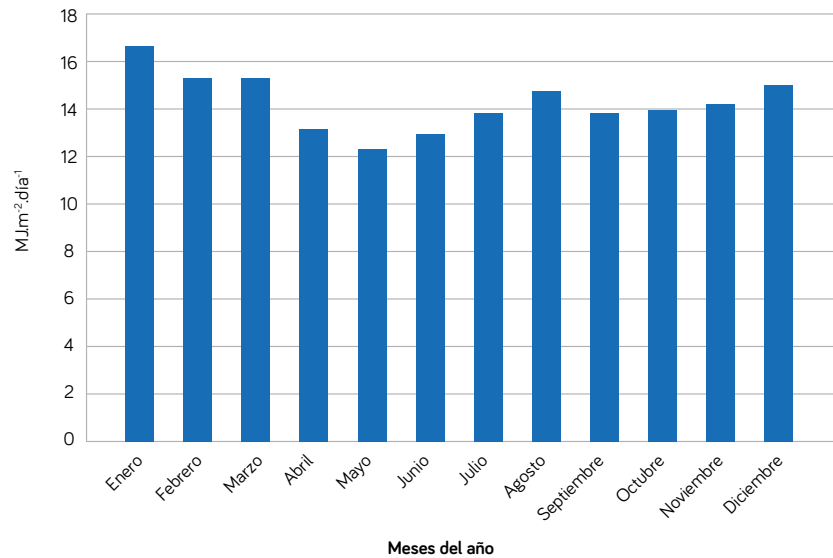


Figura 57. Distribución anual de la radiación global en Bogotá.

Fuente: Elaboración propia

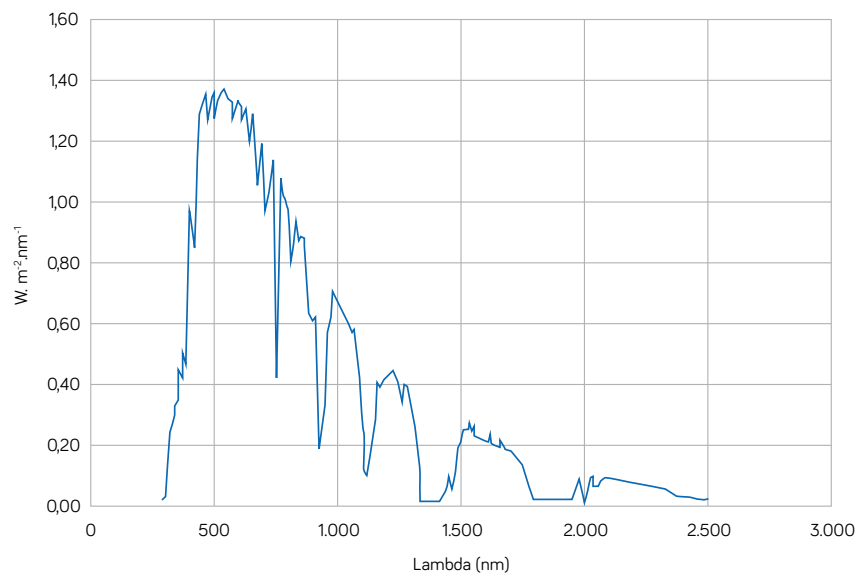


Figura 58. Espectro de la radiación solar filtrada por la atmósfera terrestre.

Fuente: Nick84 - File:Solar_spectrum_ita.svg, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=24648395>

Control de las condiciones de pH y CE

La automatización de estos sistemas de producción se puede llevar a cabo con el uso de sensores y actuadores. Con los sensores, se puede monitorear el crecimiento del cultivo, el nivel de pH y la conductividad eléctrica, con frecuencia diaria. Con ayuda de actuadores, se puede suplir el agua según la necesidad de la planta, ajustar los nutrientes según el consumo, y corregir la concentración de oxígeno en la solución nutritiva (Sangeetha & Ezhumalai, 2020). En condiciones del experimento, el pH de la solución nutritiva estuvo alrededor de 6 y la conductividad, en 1440 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Respuesta del cultivo y modelación del crecimiento

Crecimiento del cultivo

El ciclo de vida del cultivo de lechuga se limita al desarrollo vegetativo, con la formación de nuevas hojas, hasta llegar al peso y tamaño deseado del producto para la cosecha (alrededor de los 150 g para lechuga verde crespita). En un experimento en el C. I. Tibaitatá, se contaron, en promedio, alrededor de 19,4 hojas formadas durante este periodo para dicho tipo de lechuga.

Sin embargo, hay un cambio importante en el desarrollo de la planta cuando el número de hojas es tan grande que se produce autosombreamiento, a lo cual la planta responde mejorando su eficiencia fotosintética. El máximo de asimilación observado fue de 17 μmol de CO_2 $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$, con 1.500 μmol de fotones $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$, en las fases iniciales del cultivo, mientras que en la fase final se lograron los mismos 17 μmol de CO_2 con solo 500 μmol de fotones.

Este fenómeno sugiere la conveniencia de realizar un seguimiento adecuado al cultivo para identificar el modo de variación de la eficiencia fotosintética según el desarrollo vegetal. También indica que la planta de mayor edad ha tenido un proceso de aclimatación para adaptarse a una mayor condición de sombrío, que surge de la alta densidad de hojas. Como resultado de la aclimatación, la planta puede aprovechar mejor las condiciones de baja luminosidad, para lograr metas de asimilación. Finalmente, también se deduce que la eficiencia en el uso de la luz puede ser variable, en la medida que la respuesta a la RFA no sea lineal.

Intercepción de luz por el cultivo

Para evaluar cuánto de la RFA puede aprovechar un cultivo, es necesario calcular la curva de intercepción de luz. Una forma indirecta de calcularla parte del análisis de cobertura, que se realizó en el sistema hidropónico con ayuda de imágenes fotográficas y de su posterior procesamiento en el computador para estimar el área cubierta por planta (figura 59).



Figura 59. Reconocimiento de bordes (línea amarilla) para calcular el área de cobertura por planta de lechuga verde crespa en un tubo hidropónico.

Foto: Julio Galindo (algoritmo en NetLogo)

Los resultados indican una curva de crecimiento exponencial (figura 60). Aunque para muchos cultivos la curva de cobertura a través del ciclo sigue una forma sigmoidea, para el caso de la lechuga, que no desarrolla fruto, el área foliar llega a su máximo sin que al momento de la cosecha se presente declinación o estabilización (Tei et al., 1996). De manera similar, la relación entre el índice de área foliar (IAF) y la cobertura sigue la forma lineal para el periodo del cultivo desde el trasplante hasta el inicio del máximo desarrollo foliar (Ramírez-García et al., 2012). En el caso del experimento con lechuga batavia, se alcanzó un IAF de 4,21 al final del ciclo de cultivo, y con el modelo de crecimiento en cobertura se pudo estimar la curva del IAF, partiendo de las ecuaciones 1 y 2.

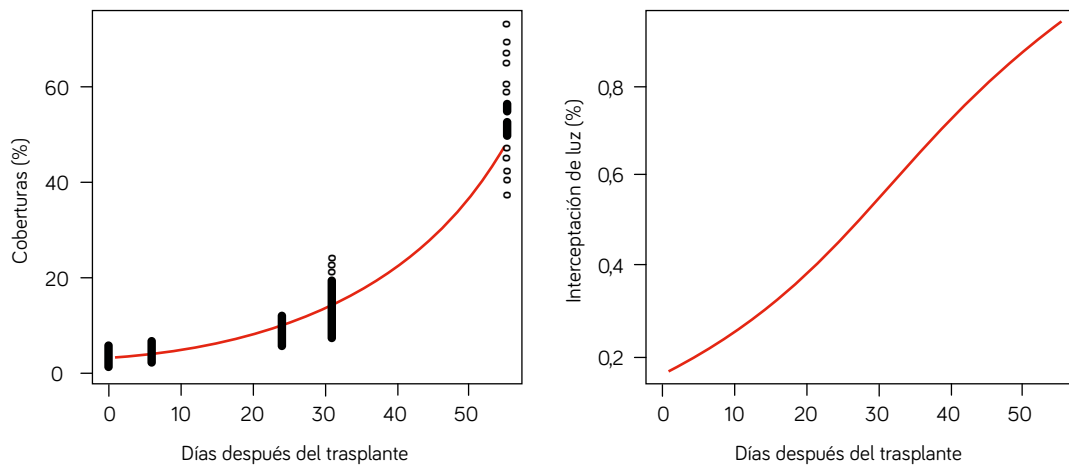


Figura 60. Dinámica de la extinción de luz por cobertura del cultivo. a. Curva de la cobertura del cultivo según los días después del trasplante; b. Curva de interceptación de luz estimada para el ciclo de cultivo de lechuga.

Fuente: Elaboración propia

$$IAF = \alpha \cdot COBER \Rightarrow \alpha = \frac{IAF}{COBER}$$

Ecuación 1

$$\alpha = \frac{4,2131}{47,5218} = 0,0887$$

Ecuación 2

La radiación interceptada (RI) se calculó con base en la ecuación 3, establecida por Monsi y Saeki (1953), aún vigente como aproximación (Campillo et al., 2010).

$$RI = 1 - e^{K \cdot IAF}$$

Ecuación 3

donde K se refiere al coeficiente de extinción de luz por la cobertura del cultivo, para lo cual se tomó el valor de $K = 0,66$, establecido por Tei et al. (1996). La curva correspondiente se presenta en la figura 60. Con esta información, una aproximación al rendimiento final del cultivo dependerá de la eficiencia en la conversión de la energía lumínica interceptada en biomasa.

Estimación del rendimiento potencial del cultivo

Tei et al. (1996) establecieron que, en el ciclo, la eficiencia en el uso de luz para el cultivo de lechuga variaba de 1,44 g/MJ de RFA, para los primeros días hasta el cierre del cultivo por el dosel (40 días después del trasplante), a 2,43 g/MJ de RFA, para los siguientes días hasta la cosecha. En este caso, la fuente de luz es el sol, por lo cual hay que considerar el espectro de radiación correspondiente bajo condiciones locales. La variabilidad observada en la eficiencia fotosintética normalmente está asociada a cambios fenológicos. Para el caso de la lechuga iceberg, el cambio fenológico importante corresponde al inicio de la formación de cabeza, que ocurre aproximadamente a los 40 días.

Finalmente, hay que considerar la partición de la biomasa entre los distintos órganos. Para el caso de la lechuga, dado que se cosecha la parte aérea en su totalidad, se distingue únicamente entre la parte aérea y la parte radicular. La razón de peso entre estos dos componentes es de aproximadamente 0,85 (Cambui et al., 2011). Para el total del ciclo, se deduce una curva de crecimiento en área foliar, y, considerando el nivel de interceptación de luz, se estima el crecimiento en biomasa (figura 61), que al final puede alcanzar hasta 681,01 g m² ciclo⁻¹. Con la partición de biomasa, la parte aérea corresponde a 578,9 g, que en peso fresco corresponden a 13.156 g m² ciclo⁻¹, considerando el contenido de agua en la lechuga, del 95,55 % (Instituto Colombiano de Bienestar Familiar [ICBF], 2015; MyFoodData, 2021). En condiciones de campo, este resultado debe corregirse para incluir el espaciamiento entre camas de siembra, de modo que el rendimiento final será aproximadamente del 80 % del potencial (105,2 ton ha⁻¹). Este resultado es comparable con el encontrado por Tei et al. (1996) para lechuga mantequilla (Butterhead).

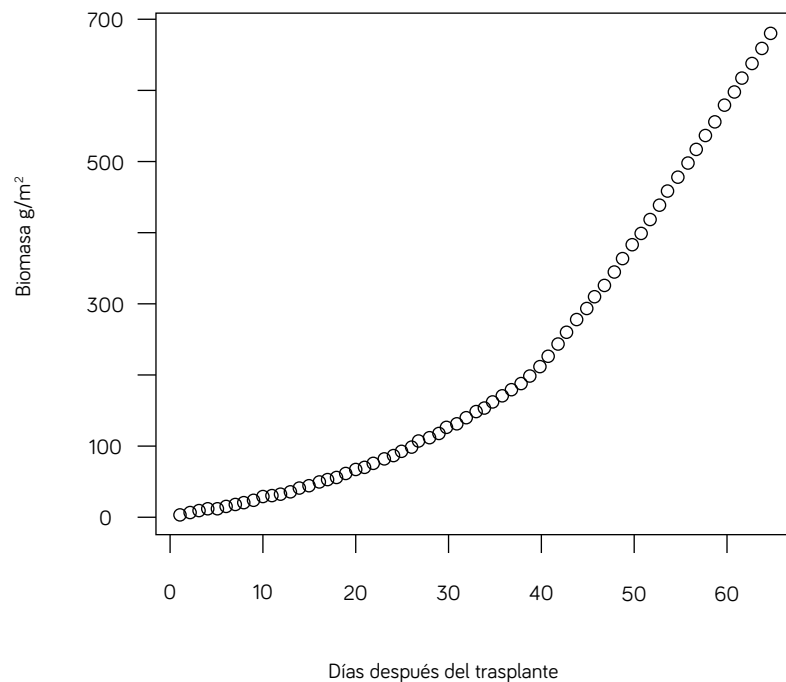


Figura 61. Simulación del desarrollo de biomasa para el cultivo de lechuga en condiciones de la Sabana de Bogotá.

Fuente: Elaboración propia

Rendimiento observado

La distribución del peso por planta se presenta en la figura 62, comparando la lechuga verde crespa con la crespa morada. El promedio de peso de la crespa morada fue de $106,92 \pm 33,52$ g, y para la crespa verde, de $145,85 \pm 58,50$ g. Por lo tanto, el rendimiento calculado fue de 15,30 t/ha para la crespa morada y de 20,87 t/ha para la crespa verde. Para el caso de la lechuga batavia, el promedio de peso por planta fue de $636,85 \pm 205,61$ g, para un rendimiento calculado de 91,11 t/ha, lo cual indica que está muy cercano a su potencial (105,2 t/ha).

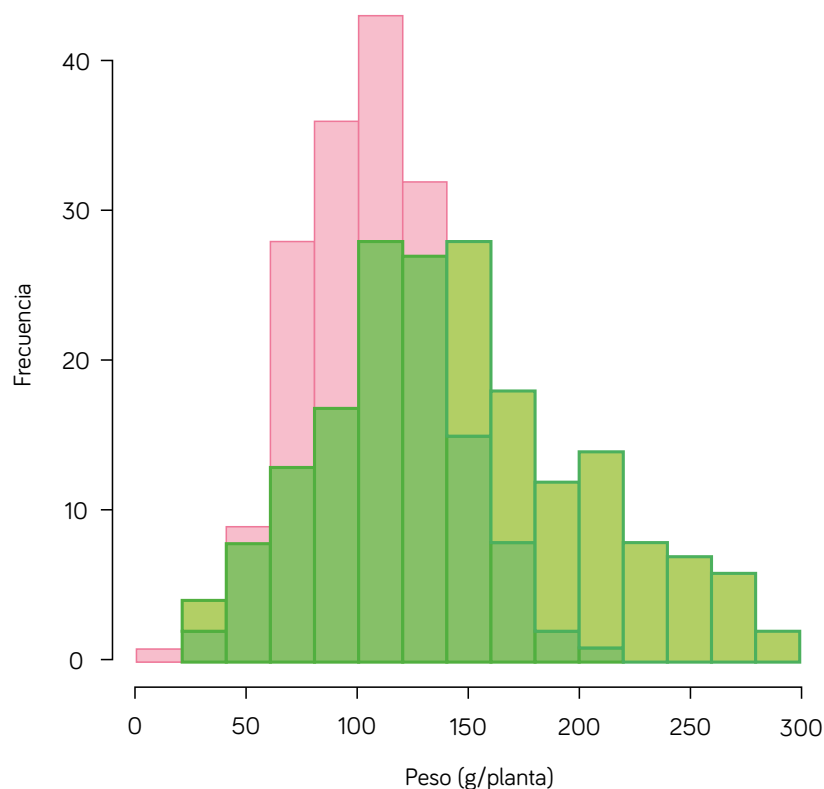


Figura 62. Distribución del peso por planta (g) en la cosecha en diferentes materiales. El color rosado corresponde a la distribución según peso de lechugas tipo crespa morada. El color verde corresponde a la distribución según peso de lechugas tipo verde crespa.

Fuente: Elaboración propia

Balance del sistema

Para establecer los cultivos hidropónicos se requiere, en primer lugar, un área de terreno y buena disponibilidad de agua. Dado que no se utiliza suelo, no aplicará si la zona correspondiente es apta o no para la agricultura a campo abierto, más allá de las condiciones de temperatura y luminosidad. Finalmente, dado que la hidroponía no depende de la calidad del suelo, puede establecerse en puntos cercanos a los centros de consumo, lo cual reducirá los costos de transporte y favorecerá una mejor conservación del producto poscosecha. Además, si los suelos de la zona tienen problemas de contaminación física, biológica o química, es posible utilizar buenas prácticas para evitar que el cultivo se afecte (Ercilla-Montserrat et al., 2018). Los sistemas de agricultura circular y vertical representan una solución que puede integrarse con otros sectores económicos para crear un sistema eficiente de abastecimiento de alimentos (Al-Saidi et al., 2021).

Una mayor automatización del sistema ayudará a reducir costos de operación y facilitará un rendimiento y calidad más estables (Ahamed et al., 2023). Según Naranjani et al. (2022), el aumento de la demanda por los productos agrícolas y la escasez de recursos (como el suelo fértil, el agua para irrigación y el clima apropiado) han conducido al incremento de los sistemas de granjas verticales de interior. Según Gentry (2019), las granjas hidropónicas verticales ofrecen muchas ventajas sobre las granjas convencionales, incluyendo un uso más eficiente del agua y la tierra, y, si se desarrollan en el área urbana, una reducción considerable de los costos de transporte. Además, como consecuencia, se facilita el manejo poscosecha y se puede garantizar mayor vida útil de los productos.

Para evitar o disminuir pérdidas en rendimiento por motivo del autosombreamiento de la estructura, se ha evaluado el uso de luz LED, pero también es posible utilizar especies o variedades adaptadas a la baja radiación (Widyastuti et al., 2020). En comparación con las estructuras abiertas (sin paredes), el invernadero propuesto reduce la velocidad de los vientos incidentes y, con ello, puede disminuir considerablemente el consumo de agua por transpiración de las plantas cultivadas (Weidner et al., 2021). Estos sistemas de hidroponía vertical han sido evaluados con modelos adaptables a grandes urbes, como Ciudad de México, para que sean de bajo costo, fáciles de operar y capaces de integrarse en una pared de una casa pequeña, con el fin de producir ciertas especies hortícolas durante todo el año (Velázquez et al., 2020).

Reflexiones y perspectivas

Bajo el contexto de cambio climático y la creciente necesidad de garantizar la seguridad alimentaria de las naciones, es claro que las granjas verticales en contextos urbanos, periurbanos y rurales irán aumentando año tras año. Esta técnica de cultivo tiene distintos niveles tecnológicos, lo cual facilitará su adopción en diferentes comunidades, con disímiles niveles de capacidad de inversión. Por otro lado, el desarrollo tecnológico continuo que presenta este tipo de sistemas de cultivo y las investigaciones que se vienen realizando en diversos cultivos vegetales ayudará a aumentar la eficiencia en el uso de agua y fertilizantes.

La economía circular (ec) se considera cada vez más un paradigma promotor para la transición de los sistemas agroalimentarios hacia modelos de producción y consumo más sostenibles, que permiten metabolismos biológicos virtuosos y regenerativos basados en estrategias de ecoeficiencia.

Estos nuevos sistemas de producción agrícola deben ayudar a resolver problemas de urbanización, contaminación de suelos y reducción de recursos

para la agricultura. Además, deben motivar un mejor manejo de los recursos naturales para conservar la riqueza de la biodiversidad y los ambientes saludables, y para reducir el impacto de la variabilidad y el cambio climático, aspectos que pueden ser decisivos para la calidad de vida de las futuras generaciones.

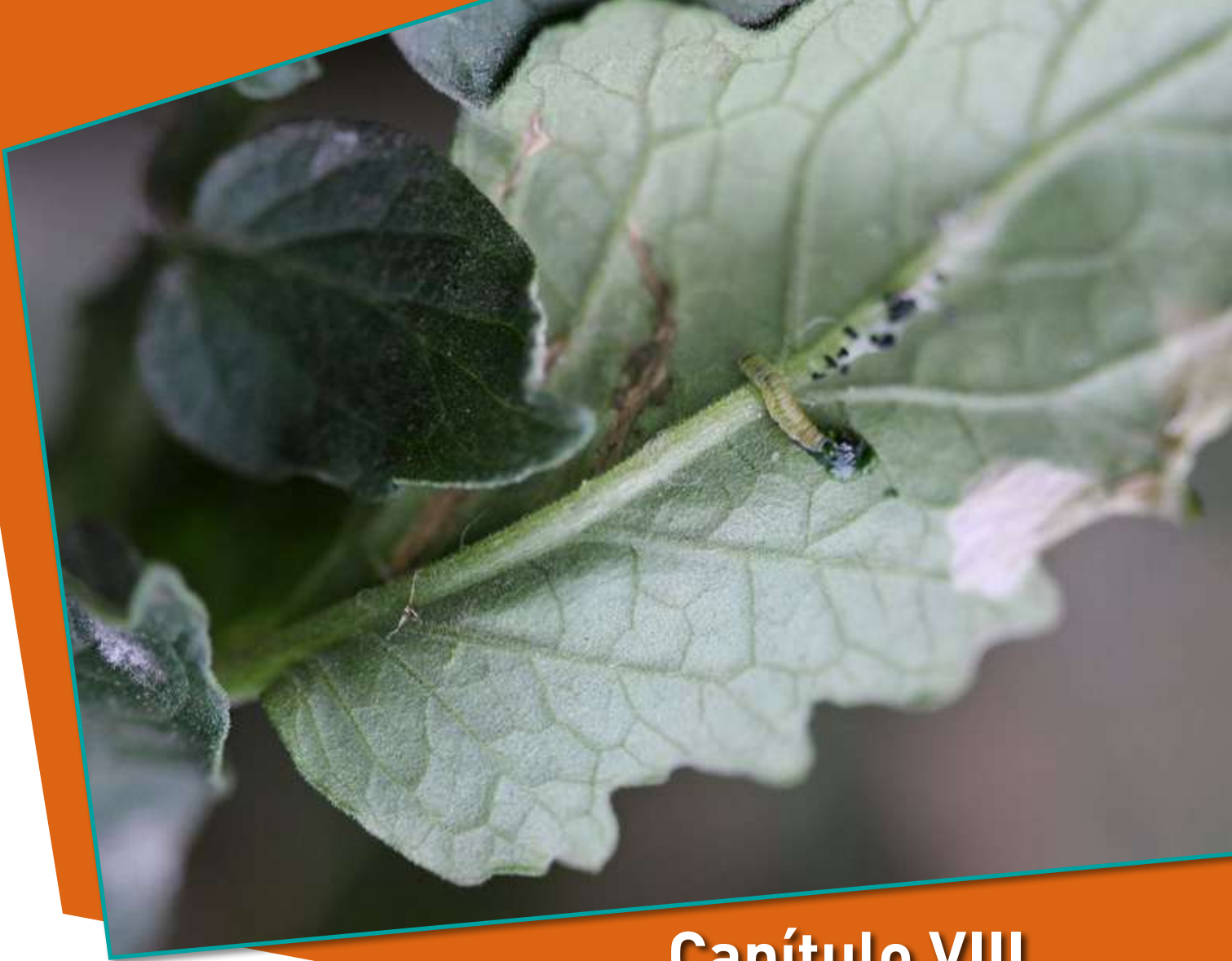
Referencias

- Ahamed, M. S., Sultan, M., Shamshiri, R. R., Rahman, M. M., Aleem, M., & Balasundram, S. K. (2023). Present status and challenges of fodder production in controlled environments: a review. *Smart Agricultural Technology*, 3, 100080. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100080>
- Al-Saidi, M., Das, P., & Saadaoui, I. (2021). Circular economy in basic supply: framing the approach for the water and food sectors of the gulf cooperation council countries. *Sustainable Production and Consumption*, 27, 1273-1285.
- Alvarado, E. G. (2021). Una reflexión en relación con la Conservación y la Restauración de Ecosistemas, en la declaratoria de las Naciones Unidas y del programa para el medio ambiente (PNUMA) periodo 2021-2030. *Revista Académica Arjé*, 4(2), 4-8.
- Arcas-Pilz, V., Parada, F., Villalba, G., Rufí-Salis, M., Rosell-Melé, A., & Gabarrell Durany, X. (2021). Improving the fertigation of soilless urban vertical agriculture through the combination of struvite and rhizobia inoculation in *Phaseolus vulgaris*. *Frontiers in Plant Science*, 12, 649304. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.649304>
- Batra, K., & Gandhi, P. (2019). Recent trends of predictive modeling in protected cultivation. En A. Weigelt (Ed.), *International Conference on Machine Learning, Big Data, Cloud and Parallel Computing (Com-IT-Con)* (pp. 580-583). University of Leipzig. <https://doi.org/10.1109/COMITCon.2019.8862227>
- Béné, C. (2019). When food systems meet sustainability - Current narratives and implications for actions. *World development*, 113, 116-130. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2018.08.011>
- Cambui, C. A., Svennerstam, H., Gruffman, L., Nordin, A., Ganeteg, U., & Näsholm, T. (2011). Patterns of plant biomass partitioning depend on nitrogen source. *Plos One*, 6(4), e19211. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0019211>
- Campillo, C., García, M. I., Daza, D. C., & Prieto, M. (2010). Study of a non-destructive method for estimating the leaf area index in vegetable crops using digital images. *Horticultural Science*, 45, 1459-1463. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.45.10.1459>
- Candia Pacheco, L. R., & Quiroga Sossa, M. (2018). Production of acelga (*Beta vulgaris*) in vertical system at different distances in a protected environment. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*, 5(2), 101-116.
- Committee on World Food Security (2017). *Nutrition and food systems. A report by the High Level Panel of Experts on Food Security and Nutrition of the Committee on World Food Security*. FAO
- Deepthi, M. P., Nivethitha, S., Saminathan, K., Narendhirakannan, R. T., Karmegam, N., & Kathireswari, P. Effect of vermiwash prepared from livestock biowaste as vermiponics medium on the growth

Capítulo VII. Avances de un modelo de producción hidropónico en agricultura vertical para hortalizas de hoja bajo ambiente protegido en la Sabana del occidente de Bogotá

- and biochemical indices of *Amaranthus viridis* L. *Environmental Technology & Innovation*, 21, 101300. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101300>
- Degli, M., Morselli, D., Fava, F., Bertin, L., Cavani, F., Viaggi, D., & Fabbri, P. (2021). The role of biotechnology in the transition from plastics to bioplastics: an opportunity to reconnect global growth with sustainability. *Febsopenbio*, 28, 40131. <https://doi.org/10.1002/2211-5463.13119>
- Ercilla-Montserrat, M., Muñoz, P., Montero, J. I., Gabarrell, X., & Rieradevall, J. (2018). A study on air quality and heavy metals content of urban food produced in a Mediterranean city (Barcelona). *Journal of Cleaner Production*, 195, 385-395.
- Gentry, M. (2019). Local heat, local food: integrating vertical hydroponic farming with district heating in Sweden. *Energy*, 174, 191-197.
- Goddek, S., Joyce, A., Kotzen, B., & Burnell, G. M. (2019). *Aquaponics food production systems. Combined aquaculture and hydroponic production technologies for the future*. Springer Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6>
- Harris, D. (1992). *Hydroponics: a practical guide for the soilless grower*. New Holland Publishing.
- Hindle, R. L. (2012). A vertical garden: origins of the Vegetation-bearing architectonic structure and system. *Studies in the History of Gardens & Designed Landscapes*, 32(2), 99-110.
- Instituto Colombiano de Bienestar Familiar (ICBF) (2015). Tabla de composición de alimentos colombianos. https://www.icbf.gov.co/system/files/tcac_2015_final_para_imprimir.pdf
- Jacquet, F., Jeuffroy, M. H., & Jouan, J. (2022). Pesticide-free agriculture as a new paradigm for research. *Agronomical Sustainable Development*, 42, 8. <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00742-8>
- Kalantari, F., Tahir, O. M., Joni, R. A., & Fatemi, E. (2018). Opportunities and challenges in sustainability of vertical farming: a review. *Journal of Landscape Ecology*, 11(1), 35-60.
- Mechaqrane, A., & Ouazzani Chahidi, L. (2021). Energetic and economic analysis for improving greenhouse energy efficiency. *Journal of Energy Systems*, 5(4), 296-305. <https://doi.org/10.30521/jes.950754>
- Michelon, N., Pennisi, G., Myint, N. O., Orsini, F., & Gianquinto, G. (202). Strategies for improved water use efficiency (wUE) of field-grown lettuce (*Lactuca sativa* L.) under a semi-arid climate. *Agronomy*, 10(5), 668. <https://doi.org/10.3390/agronomy10050668>
- Moosavi-Nezhad, M., Salehi, R., Aliniaiefard, S., Winans, K. S., & Nabavi-Pelesaraei, A. (2022). An analysis of energy use and economic and environmental impacts in conventional tunnel and LED-equipped vertical systems in healing and acclimatization of grafted watermelon seedling. *Journal of Cleaner Production*, 361, 132069. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132069>
- MyFoodData (2021). *Iceberg lettuce*. MyFoodData. <https://tools.myfooddata.com/nutrition-facts/169248/wt1/1>
- Naranjani, B., Najafianashrafi, Z., Pascual, C., Agulto, I., & Chuang, P. A. (2022). Computational analysis of the environment in an indoor vertical farming system. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 186, 122460.
- Quintero, M. F., González, C. A., & Guzmán, J. M. (2011). Sustratos para cultivos hortícolas y flores de corte. En R. Flórez R. (Ed.), *Sustratos, manejo del clima, automatización y control en sistemas de cultivo sin suelo* (pp. 79-108). Universidad Nacional de Colombia.

- Ramírez-García, J., Almendros, P., & Quemada, M. (2012). Ground cover and leaf area index relationship in a grass, legume and crucifer crop. *Plant Soil and Environment*, *58*, 385-390.
- Rees, G. (1981). An unpublished manuscript by Francis Bacon: *Sylva Sylvarum* drafts and other working notes. *Annals of Science*, *38*(4), 377-412.
- Sánchez-Bayo, F., & Wyckhuys, K. A. (2019). Worldwide decline of the entomofauna: A review of its drivers. *Biological Conservation*, *232*, 8-27.
- Sangeetha, T., & Ezhumalai, P. (2020). Enhanced and cost-effective techniques used for plant growth in vertical agriculture. *Materials Today: Proceeding*.
- Serrano-Carreón, L., Aranda-Ocampo, S., Balderas-Ruiz, K., Juárez, A., Leyva, E., Trujillo-Roldán, M., Valdez-Cruz, N., & Galindo, E. (2022). A case study of profitable mid-tech greenhouse for the sustainable production of tomato, using a biofertilizer and a biofungicide. *Electronic Journal of Biotechnology*, *59*, 12-24. <https://doi.org/10.1016/j.ejbt.2022.06.003>
- Tei, F., Scaife, A., & Aikman, D. (1996). Growth of lettuce, onion and red beet. 1. Growth analysis, light interception, and radiation use efficiency. *Annals of Botany*, *78*, 633-643.
- United Nations International Children's Emergency Fund [Unicef], World Health Organization [WHO], World Bank. (2021). *Levels and trends in child malnutrition: key findings of the 2019 edition of the Joint Child Malnutrition Estimates*. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240025257>
- Velázquez, J. F., Rodríguez, E., Almanza, P. G., Fuentes D., & Flores H. (2020). *Hydroponics vertical farm as a viable utility model to implantation in Mexico City*. Asabe 2020 Annual International Meeting. <https://doi.org/10.13031/aim.202000346>
- Weidner, T., Yang, A., & Hamm, M. W. (2021). Energy optimization of plant factories and greenhouses for different climatic conditions. *Energy Conversion and Management*, *243*, 114336. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890421005124>
- Wheeler, R. M. (2017). Agriculture for space: people and places paving the way. *Open Agriculture*, *2*, 14-32.
- Widyastuti, P. Y., Suwarno, W. B., & Aswidinnoor, H. (2020). Genotype by environment analysis on multi-canopy cropping system towards vertical harvest space in rice. *Agronomy Journal*, *112*(6), 4568-4577.
- Zaręba, A., Krzemińska, A., & Kozik, R. (2021). Urban vertical farming as an example of nature-based solutions supporting a healthy society living in the urban environment. *Resources*, *10*(11), 109. <https://doi.org/10.3390/resources10110109>
- Zimmermann, M., & Fischer, M. (2020). Impact assessment of water and nutrient reuse in hydroponic systems using Bayesian Belief Networks. *Journal of Water Reuse and Desalination*, *10*(4), 431-442. <https://doi.org/10.2166/wrd.2020.026>
- Zou, J., Zhou, C., Xu, H., Cheng, R. Q., & Li, T. (2020). The effect of artificial solar spectrum on growth of cucumber and lettuce under controlled environment. *Journal of Integrative Agriculture*, *19*, 2027-2034.



Capítulo VIII

151

Uso de invernaderos en la ejecución de investigaciones aplicadas a la evaluación de artrópodos plaga en Colombia

Stephanie Johana Numa-Vergel
Adriana Marcela Santos-Díaz

Introducción

La ejecución de investigaciones en condiciones semicontroladas (invernaderos) requiere de rigurosidad, desde el diseño del espacio, pasando por la planificación de áreas de trabajo para evitar la contaminación cruzada durante el desarrollo de los bioensayos, hasta el adecuado diseño experimental, factores cruciales en la obtención de resultados trazables y confiables para generar así estrategias de manejo de artrópodos de importancia agrícola.

Por eso, este capítulo aborda aspectos como los requerimientos básicos para el diseño de invernaderos (estructura interna y externa), las recomendaciones para buenas prácticas y el diseño de experimentos para la ejecución de bioensayos con artrópodos en invernadero. Finalmente, se mencionan algunas experiencias documentadas en la cría de artrópodos y en el desarrollo de bioensayos para la evaluación de microorganismos entomopatógenos en condiciones de invernadero.

Requerimientos básicos para el diseño de invernaderos útiles en la ejecución de bioensayos con artrópodos

El uso de invernaderos para la realización de bioensayos permite que se validen resultados de laboratorio en condiciones semicontroladas, con el fin de seleccionar, posteriormente, las estrategias con mayor potencial para el manejo de artrópodos en cultivos comerciales. Por eso el diseño de los invernaderos es crítico, siendo indispensable evaluar los componentes internos y externos de la infraestructura protegida, de tal manera que puedan ser útiles para establecer y optimizar las condiciones necesarias (principalmente ambientales) para cada tipo de bioensayo.

A continuación, se presentan algunos de los requerimientos básicos que un investigador debe tener en cuenta para el diseño de estructuras internas y externas de los invernaderos:

Infraestructura exterior

Para el diseño de esta estructura, se debe elegir el material de la cubierta de acuerdo con los requerimientos del bioensayo, debido a que influye en la generación del microclima dentro del invernadero. Entre tales requerimientos se encuentran las fluctuaciones en la temperatura, la humedad relativa y la radiación, entre otras variables que afectan directamente a las plantas,

a los artrópodos y, por supuesto, los resultados obtenidos en el bioensayo. Adicionalmente, como se presentó en el capítulo IV, “Materiales de cubierta y cerramiento para la construcción de invernaderos: criterios técnicos para su selección”, se deben contemplar las características propias del material de cubierta (tabla 23) y el tipo de estructura (figura 63), con el fin de definir el invernadero ideal según el diseño experimental y su uso.

Teniendo en cuenta las ventajas y desventajas presentadas en la tabla 23 y en la figura 63, en el trópico alto colombiano, el invernadero adecuado para este tipo de experimentos correspondería al de arquitectura tipo venlo con cubierta de policarbonato, debido a que permite mantener en su interior condiciones ambientales homogéneas (temperatura, humedad relativa) para la ejecución de bioensayos (Lin et al., 2020). Además de esto, posibilita, por su estructura, que se instalen mallas que permiten limitar físicamente el ingreso y salida de artrópodos.

Tabla 23. Materiales utilizados para cubierta de invernadero

Material de cubierta	Costo	Durabilidad	Instalación	Fotoestable	Fragilidad	Lugares ideales para instalación
Plástico de polietileno.	Bajo	Baja	Fácil	Sí	Alta	Baja precipitación y sin climas extremos.
Plástico de policarbonato.	Medio	Alta	Fácil	Sí	Baja	Versátil en climas extremos por la resistencia de la estructura al impacto de altas precipitaciones de lluvia.
Vidrio.	Alto	Alta	Medio	Sí	Alta	Climas con extremos fríos.

Fuente: Elaboración propia con base en Đević y Dimitrijević (2008), Román-Roldán et al. (2019) y Villagrán et al. (2019)

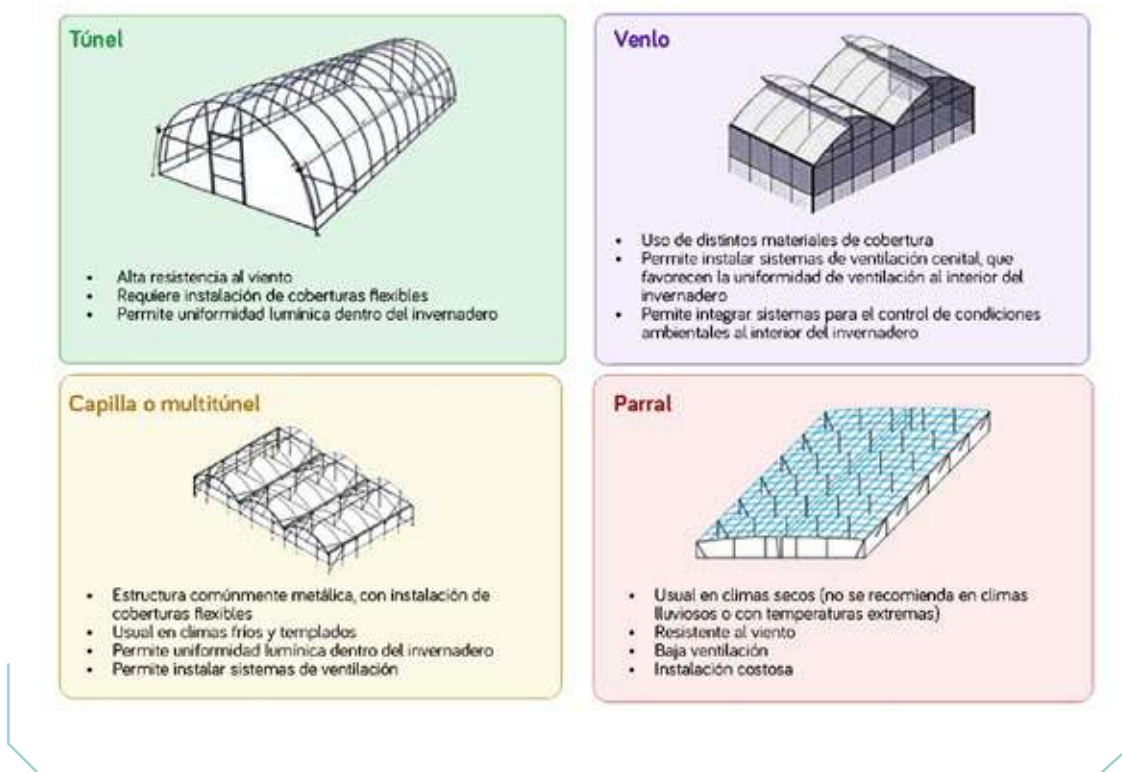


Figura 63. Tipos de estructura de invernaderos más comunes.

Fuente: Elaboración propia con base en Baeza et al. (2006), Baille et al. (2002), Lin et al. (2020), Parra et al. (2004), Senhaji et al. (2019) y Yu et al. (2022)

Infraestructura interior

El diseño del interior del invernadero es también fundamental para el éxito de los bioensayos, así como para la confiabilidad de los resultados obtenidos. Por esta razón, se deben contemplar las áreas básicas para que dentro de la estructura se puedan realizar procesos como lavado y alistamiento de material, y las áreas que prevengan la contaminación cruzada en las unidades experimentales. A continuación, se describen las áreas que debe contener un invernadero enfocado en la evaluación de artrópodos.

Área de ingreso

Se encuentra en la entrada del invernadero, en donde se debe ubicar, como mínimo, un área de *transfer* con doble puerta con prediluvio (poceta baja con cal o con un desinfectante líquido) para desinfección de calzado y cortina de aire en el medio de las dos puertas. Lo anterior, con el propósito de minimizar

el ingreso y salida de artrópodos u otros contaminantes. Después de la cortina de aire, se debe disponer de un área que pueda ser utilizada por los trabajadores, especialmente para colocarse los elementos de protección personal (EPP) requeridos para la ejecución, el seguimiento y la lectura del bioensayo (figura 64).



Figura 64. Área de ingreso en invernadero tipo venlo con cubierta de policarbonato.

Fotos: Stephanie Numa-Vergel

Área de preparación de muestras

Se recomienda que esta área cuente con punto de agua potable, un espacio para la siembra de plantas e, incluso, con un mesón para el alistamiento del material y demás elementos utilizados en el montaje de los ensayos (figura 65).



Figura 65. Área de preparación de muestras en invernadero tipo venlo con cubierta de policarbonato.

Fotos: Stephanie Numa-Vergel

Área de experimentación

Esta área debe estar provista de mesones metálicos, sistema de riego (p. ej., goteo o microaspersión), sistema de iluminación artificial, y sistema retráctil para la apertura y cierre de una malla térmica para sombrío o polisombra. Dentro de esta área se pueden ubicar sistemas automatizados y acoplados para la programación de las condiciones ambientales (temperatura, humedad relativa), y ventilación tipo cenital y lateral. Adicionalmente, dentro de la misma área, se recomienda ubicar los sensores de alta precisión que permitan el monitoreo de las condiciones ambientales, así como del encendido de los sistemas integrados (figura 66). Los sistemas anteriormente mencionados del invernadero automatizado permiten que sean áreas útiles para la ejecución de bioensayos según el diseño experimental, y generan las condiciones óptimas para los niveles tróficos evaluados para la generación de estrategias de manejo integrado de plagas (Choab et al., 2019; Kittas et al., 2008; Shipp et al., 2003).



Figura 66. Área de experimentación en invernadero tipo venlo con cubierta de policarbonato.

Fotos: Stephanie Numa-Vergel

Buenas prácticas en la ejecución de investigaciones bajo invernaderos

En este apartado se explicarán, de manera sucinta, dos condiciones mínimas para la aplicación de las buenas prácticas requeridas en la ejecución de investigaciones en invernaderos. La primera corresponde a lineamientos básicos para la aplicación de buenas prácticas y la segunda, al diseño adecuado de experimentos en invernaderos.

Buenas prácticas en invernaderos

Las buenas prácticas agrícolas en invernaderos están encaminadas a reducir la pérdida de material vegetal y animal, así como a evitar la contaminación cruzada. Dentro de las prácticas más importantes se pueden encontrar las mencionadas a continuación.

Uso de elementos de protección personal (EPP)

En los invernaderos, se debe asegurar que el personal utilice los EPP requeridos para evitar incidentes laborales al momento de realizar actividades de preparación de suelo, lavado de material e, incluso, aplicación o liberación de agentes patógenos o controladores biológicos, pues el uso inadecuado de los EPP es uno de los factores que ocasionan contaminaciones cruzadas en los experimentos, ya que los patógenos son transportados en la ropa y el calzado. Por eso es necesario contar con botas, overol, batas y demás elementos de uso exclusivo dentro del invernadero (Martínez, 2014), y que deben ser usados por el personal antes de ingresar a las áreas mencionadas en la sección anterior.

Microclima

Este es uno de los factores que afectan drásticamente la generación de resultados confiables, ya que al presentarse microclimas diferentes en el área de experimentación, es posible que se obtengan resultados contradictorios. En el interior de esta área, se debe contar con sensores para monitorear continuamente, en distintas ubicaciones, las condiciones ambientales, con el complemento de la incorporación de sistemas de ventilación natural o forzada que permitan una recirculación homogénea dentro del invernadero, así como otros sistemas de climatización para regular el microclima a valores deseados (Li et al., 2018; Teitel, 2007).

Manejo de residuos de cosecha

Otro factor que incide en las poblaciones de plagas que afectan (directa o indirectamente) los bioensayos es el inadecuado manejo de los residuos de cultivos, o de las unidades experimentales, en el caso de bioensayos. Aunque existen pocas publicaciones al respecto, varios autores (Forcella et al., 2018; Murrell, 2017; Surekha et al., 2003) han demostrado que en los residuos de cosechas quedan artrópodos e, incluso, nematodos o microorganismos patógenos, que, al no ser tratados a tiempo, pueden contaminar futuros experimentos en el invernadero. Existen varios métodos para el manejo de residuos de cosecha, dentro de los que se encuentra la solarización, que consiste en ubicar dichos residuos debajo de plástico delgado transparente y utilizar la radiación solar para destruir a la mayoría de los patógenos y arvenses (Stapleton, 2000).

Medidas de seguridad y limpieza

Se recomienda que, al inicio de cada bioensayo, se realice en el invernadero la limpieza y la desinfección con las herramientas y productos químicos necesarios. En general, los equipos y los materiales para el montaje, seguimiento y toma de datos (cuchillos, recipientes, mesas, cestas, materiales de empaque, tijeras, cepillos, etc.) se deben usar de forma adecuada y mantener siempre limpios, para disminuir la contaminación cruzada (Somoza et al., 2019). Respecto a la seguridad, es importante cerciorarse de que las condiciones de trabajo sean las adecuadas para el personal y contar con procedimientos para identificar y atender los riesgos o posibles accidentes de trabajo que se puedan presentar (Díaz, 2008).

Diseño de experimentos biológicos en invernadero

El diseño de experimentos (DOE, por su sigla en inglés) en condiciones de invernadero es uno de los factores más críticos para asegurar la confiabilidad de los resultados. En general, el objetivo del DOE es obtener datos confiables para establecer diferencias y comparaciones entre tratamientos que se aplican en espacios, parcelas o unidades experimentales, y que posteriormente permiten cuantificar las respuestas obtenidas (Marín Rodríguez & García Mendoza, 2019).

En general, los experimentos en invernadero se pueden clasificar según diferentes criterios. Por ejemplo, Trapero-Casas et al. (2015) los clasifican en tres:

- Experimentos preliminares: aquellos en los que se prueba un número grande de tratamientos, con el objetivo de realizar una selección rápida (*screening*).
- Experimentos críticos o definitivos: aquellos en los cuales se comparan las respuestas de diferentes tratamientos y que buscan detectar diferencias estadísticamente significativas para establecer conclusiones.
- Experimentos demostrativos: aquellos que permiten establecer visualmente una respuesta positiva de un tratamiento versus un tratamiento control o convencional, para demostrar dicha respuesta.

El proceso de diseño y experimentación tiene diferentes etapas. Brevemente, se relacionan a continuación: definición de problema a resolver, establecimiento de objetivos, selección de tratamientos a evaluar, selección de material vegetal, definición de diseño experimental, toma correcta de datos, análisis, representación y presentación correcta de los resultados (Trapero-Casas et al., 2015).

Como factores críticos en el DOE, se destaca la definición de las unidades experimentales y de los tratamientos. La unidad experimental se define como la mínima unidad de material a la que se aplica un tratamiento, por ejemplo, puede ser una planta o varias plantas. El tratamiento corresponde al procedimiento cuyo efecto se cuantifica y se compara con otro procedimiento. Al seleccionar de forma correcta los tratamientos y las unidades, se busca disminuir el error experimental, dado que este es una variación que existe entre las observaciones de las unidades experimentales de un mismo tratamiento (Gupta et al., 2008).

En condiciones de invernadero, casas de malla o espacios controlados, se busca que un experimento cumpla con los principios básicos de réplica, aleatorización y bloqueo (Marín Rodríguez & García Mendoza, 2019). Las *réplicas* corresponden a repeticiones de los tratamientos que se pueden realizar en el tiempo o al mismo tiempo. Este proceso permite suministrar una estimación válida del error experimental. La estimación del error experimental posibilita la inferencia estadística, por ejemplo, al realizar pruebas de significancia u obtención de intervalos de confianza. La *aleatorización* corresponde a una asignación aleatoria de las condiciones “tratamientos” a las unidades experimentales, para asegurar que todas tengan las mismas probabilidades, y evitar el sesgo sistemático y subjetivo en un experimento. El *bloqueo* permite generar ciertas restricciones sobre la selección aleatoria y disminuir el error experimental, es decir que bloquear un experimento es dividir las unidades experimentales en

grupos o bloques de unidades similares, de tal manera que las observaciones de cada bloque se recopilen en condiciones relativamente similares. Este diseño es útil para experimentos en los que no es muy alto el número de tratamientos que se evalúan y en los que el área experimental tiene un gradiente (p. ej., luz solar, radiación ultravioleta, aireación, riego, salinidad).

En condiciones de invernadero, se deben aplicar mínimo dos principios de los tres expuestos anteriormente (aleatorización, repetición y bloqueo), y para esto se utilizan frecuentemente dos tipos de diseño de experimentos: *diseño completo al azar* (DCA) y *diseño de bloques al azar* (DBA).

El DCA es el más simple y utiliza los principios de aleatorización y de réplica. En este diseño, no se utiliza el bloqueo, debido a que se asume que las unidades experimentales son homogéneas y pueden ser asignadas a los tratamientos de forma aleatoria (Santos Díaz et al., 2022). La única causa identificable de variabilidad son los tratamientos, y la parte restante de la variabilidad es el error experimental (Gupta et al., 2008). En este caso, la cantidad de unidades experimentales y tratamientos depende de la disponibilidad de recursos y de las necesidades de precisión y reproducibilidad de las comparaciones. Es decir que, si el material experimental para algunos tratamientos está limitado por la cantidad, se reduce el número de repeticiones en ellos. Sin embargo, este tipo de decisiones afecta la precisión del ensayo y, por lo tanto, su error. Esta clase de diseño se utiliza en bioensayos en donde se evalúan microorganismos (hongos, bacterias y virus) contra insectos de interés agrícola.

El DBA aplica los tres principios (aleatorización, repetición y bloqueo) y consiste en que las unidades experimentales se pueden agrupar de forma lógica, formando bloques (Trapero-Casas et al., 2015). Los bloques pueden contener el mismo número de unidades experimentales y los tratamientos se distribuyen de manera aleatoria. Si el bloque se realiza correctamente, se reduce el error experimental. Es importante que durante el curso del experimento todas las unidades experimentales de cada bloque sean tratadas de manera uniforme en todos los aspectos, por ejemplo, el riego, la recolección de material, la evaluación de síntomas, la aplicación de fertilizantes, entre otros. Estas prácticas permiten controlar la variación entre los bloques y obtener resultados confiables. Este diseño experimental es equilibrado, es decir que cada tratamiento cuenta con un número igual de unidades experimentales en cada bloque y cada bloque tiene todos los tratamientos (Hartung et al., 2019).

Idealmente, los tratamientos dentro del bloque deben ser aleatorios, pero a menudo el *bloque 1* se ordena de manera consecutiva con el número de tratamientos (p. ej., del uno al cinco), ya que esto brinda la ventaja de tener

una fila de demostración. Un ejemplo de DBA con cuatro tratamientos y cinco bloques se describe en la figura 67.

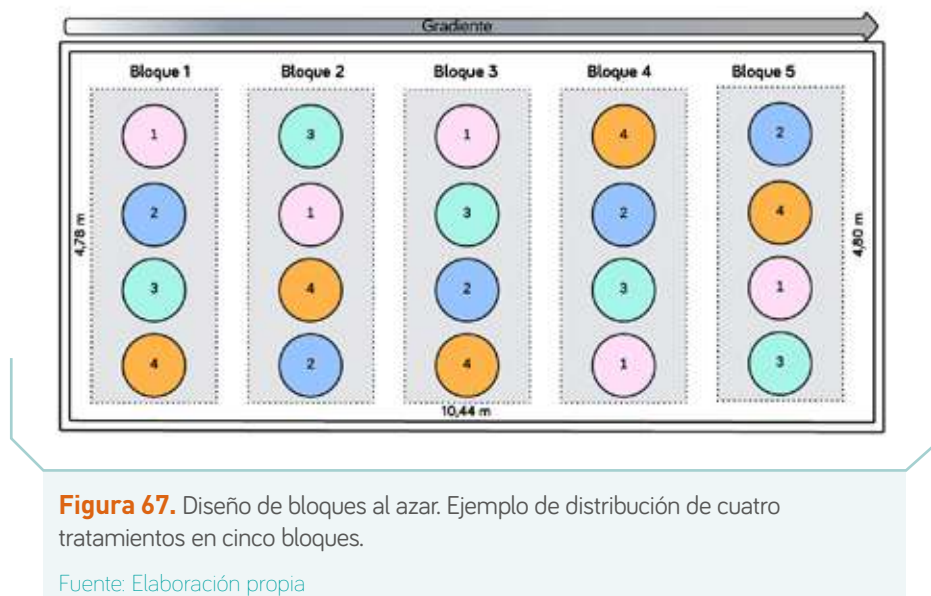


Figura 67. Diseño de bloques al azar. Ejemplo de distribución de cuatro tratamientos en cinco bloques.

Fuente: Elaboración propia

Entre las ventajas de la utilización de este tipo de diseño se presentan las siguientes: permite aumentar el número de unidades experimentales o de réplicas dentro de cada bloque para los tratamientos que lo requieren, y si se eliminan unidades experimentales por condiciones externas (p. ej., el clima), se puede estimar su valor teniendo en cuenta las unidades experimentales restantes (Santos Díaz et al., 2022).

Existen otros diseños experimentales que se pueden utilizar en condiciones de invernadero, pero con más frecuencia en condiciones de campo. Uno de estos es el diseño de cuadrado latino (CL), el cual se puede utilizar en los experimentos en los que existen dos fuentes de variación, por ejemplo, la iluminación y la temperatura, o fuentes de variación, como el gradiente de fertilidad en suelo y el gradiente de humedad. La característica principal de este modelo es que los tratamientos se organizan de dos maneras diferentes: por filas y por columnas (Trapero-Casas et al., 2015). También se pueden aplicar los experimentos factoriales, que corresponden a una forma simultánea de estudiar los efectos que tienen varios factores sobre una respuesta, en donde se combinan los niveles de un factor con los niveles de otro factor, formando lo que se denomina *tratamiento*. Este diseño permite, con mayor precisión y ahorro en tiempo y material, el establecimiento de inferencias entre los factores que se evalúan (Marín Rodríguez & García Mendoza, 2019).

A continuación, se describen algunas experiencias de uso de invernadero en el manejo integrado de plagas, enfocándose en dos temas: crías de insectos y bioensayos enfocados en la búsqueda, selección y aplicación de microorganismos contra plagas de interés agrícola.

Experiencias en el mantenimiento de crías de artrópodos bajo invernadero

Uno de los factores críticos para el éxito de investigaciones en la entomología moderna es la disponibilidad continua, y en las cantidades requeridas, de los artrópodos necesarios para la ejecución de bioensayos encaminados a generar estrategias de manejo cuando aquellos se convierten en plaga (Parra, 2013). Por esta razón, las crías de artrópodos en laboratorio e invernadero se han convertido en un insumo fundamental para la investigación enfocada en la generación de estrategias para el manejo integrado de plagas en cultivos de importancia agrícola.

Cuando se habla de crías de artrópodos en invernadero, no solo se evalúan dos niveles tróficos (planta-plaga), sino también del hospedero-presa y de parasitoide-depredador, es por esto que según Parra (2013), en programas de control biológico de plagas, se deben tener en cuenta las siguientes etapas:

Etapas 1. Selección del cultivo: se refiere a la planta que será el hospedante de la plaga o, en muchos casos, la dieta natural (planta completa, tubérculo, entre otras partes). Esta planta puede ser aquella sobre la cual se realizará un control en cultivo comercial o un hospedante alternativo del que se alimente el artrópodo de estudio. Es necesario que su mantenimiento sea más económico por unidad de área (Parra, 2013). La selección del cultivo debe realizarse soportada por investigaciones de tablas de vida del artrópodo con distintas plantas hospedantes (figura 68).

Etapas 2. Cría del hospedero y enemigo natural: en esta etapa se deben tener conocimientos previos del hospedero natural o alternativo del enemigo natural (parasitoide o depredador), para elegir el hospedero más adecuado y así proceder al escalamiento de la cría del controlador biológico en cultivos de importancia agrícola (figura 68).

Etapas 3. Cría masiva: el éxito de esta etapa depende de investigaciones previas en las cuales se determinen parámetros como densidad de siembra, respuesta funcional y demás variables que afectan el crecimiento de las

poblaciones. Es importante aclarar que no se debe iniciar una cría masiva sin antes tener las instalaciones adecuadas, lo que, para el caso de artrópodos en invernaderos, se refiere a la infraestructura adecuada para evitar contaminaciones cruzadas, tanto desde el exterior del invernadero como dentro de este. Así, la delimitación de espacios de cría de presas-hospederos y depredadores-parasitoides evitará que se contaminen. Se recomienda que las crías se encuentren en módulos de invernaderos separados, que cada módulo cuente con mínimo malla antitrips y que en cada uno existan las áreas mencionadas en la sección “Infraestructura interior de los invernaderos”, del presente capítulo (figura 68).

Etapa 4. Transferencia de tecnología al usuario: en esta etapa se informa al usuario sobre los beneficios de la adopción de la estrategia de manejo de plagas, aunque no debe ser la última, ya que, antes de iniciar la cría masiva, se deben realizar estudios de mercado para identificar las demandas del sector de interés. Esta transferencia se puede realizar de distintas formas, desde programas de vinculación de tecnología hasta tecnologías de la información y las comunicaciones (TIC). De esta etapa depende la continuidad de la estrategia de control biológico desarrollada.

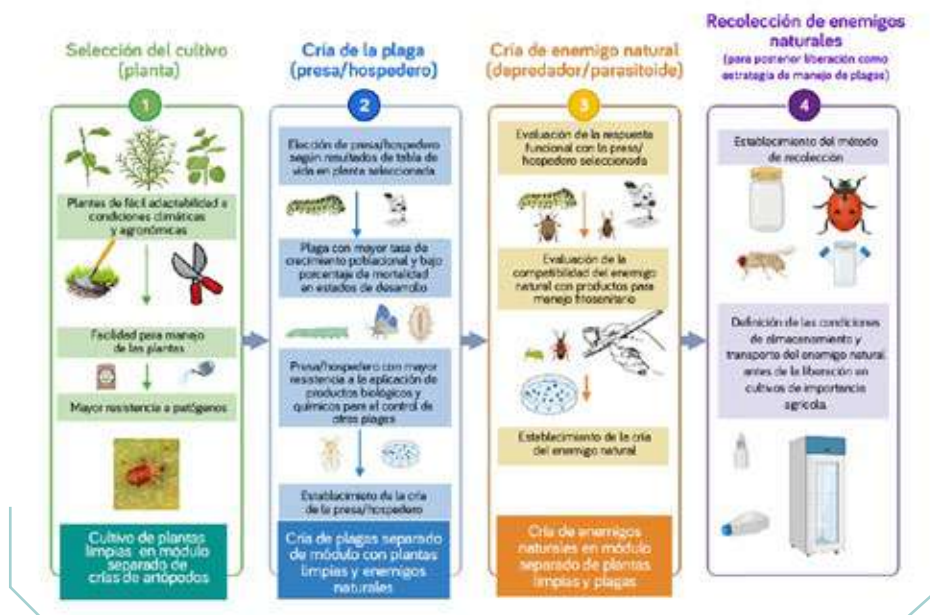


Figura 68. Pasos básicos para la producción de artrópodos en invernadero.

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se presentan los pasos básicos que se proponen para el mantenimiento de artrópodos bajo invernadero.

En Colombia, y especialmente en el trópico alto, se han realizado estudios para estandarizar las crías de plagas y los enemigos naturales en invernadero, los cuales han sido insumo fundamental para el suministro de artrópodos requeridos para la investigación y generación de estrategias de manejo en varios sistemas productivos, entre los que se destacan los cultivos de tomate y flores bajo cubierta.

Algunos casos de estudio de crías de plagas y de enemigos naturales en cultivos de tomate bajo invernadero son los siguientes:

- Mosca blanca (*Trialeurodes vaporariorum*): desde hace varios años se han publicado estudios en los que se definen parámetros para la cría de *T. vaporariorum* en invernadero, así como para la de su controlador biológico, el parasitoide *Encarsia formosa*. Dentro de estos estudios se ha encontrado que las tasas de consumo de *T. vaporariorum* no solo dependen del hospedante, sino también de las condiciones ambientales (Suárez et al., 2015), y que, por lo tanto, influyen en la producción de *E. formosa* en invernadero (Díaz et al., 2019; Díaz et al., 2011).

Además, se han estandarizado crías de parasitoides, como *Amitus fuscipennis*, que, al liberarse en conjunto con *E. formosa* en cultivos de tomate en invernadero, generan un mayor efecto para el manejo de *T. vaporariorum* (De Vis et al., 1999; De Vis et al., 2002).

- Cogollero del tomate (*Tuta absoluta*): la cría de este insecto se ha realizado principalmente en invernadero sobre plantas de tomate, y se han estimado desde los parámetros poblacionales de este microlepidoptero (Pérez-Marulanda & Giraldo-Sánchez, 2020) hasta las condiciones de la cría bajo invernadero (Bajonero et al., 2008; Morales et al., 2013) y las condiciones de almacenamiento (Morales-Perdomo et al., 2018) de su parasitoide, *Apanteles gelechiidivoris*, así como el potencial para el manejo de este con el uso en conjunto de feromonas sexuales para control de *T. absoluta* (Morales et al., 2014), entre otros enemigos naturales (Desneux et al., 2021).

A continuación, se presentan algunas de las crías que se realizan en invernadero para el control de ácaros plaga en cultivos de flores.

En Colombia, desde hace varias décadas, se han realizado estudios para generar estrategias de manejo de ácaros como *Tetranychus urticae*, el cual

genera importantes pérdidas económicas para la exportación de flores. Por esta razón, se han publicado trabajos que implementan crías tanto del ácaro plaga como de ácaros depredadores, y que van desde la simulación de parámetros para cría (Rodríguez et al., 2006; Bustos et al., 2009) hasta la optimización del proceso de producción de *T. urticae* sobre planta de frijol (como hospedero alternativo) (Bustos et al., 2016), así como sobre los criterios para la cría del ácaro depredador *Phytoseiulus persimilis* en invernadero (Daza et al., 2010).

Experiencias en el desarrollo de bioensayos para la evaluación de microorganismos entomopatógenos

El control biológico es una estrategia de manejo que consiste en la regulación de poblaciones de plantas y animales por enemigos naturales (agentes de mortalidad biótica) que normalmente se encuentran en el ambiente. Dentro de los enemigos naturales se pueden encontrar insectos, ácaros, arañas, hongos, virus, bacterias, nematodos, anfibios, reptiles, aves, mamíferos, entre otros grupos que reducen las plagas (Parra, 2013).

Específicamente, para el control de plagas en cultivos de importancia económica, se utilizan métodos etológicos y culturales; aplicación de bioinsumos con ingredientes activos a base de hongos, bacterias y virus, así como liberaciones de artrópodos (parasitoides y depredadores). La evaluación de estas estrategias de manejo integrado de plagas inicia, normalmente, con la ejecución de bioensayos en laboratorio en los que se seleccionan los más eficaces controladores de plagas, y con la determinación de la compatibilidad con otras estrategias de manejo. Después de los ensayos en condiciones controladas (laboratorio), se procede a validar los resultados en condiciones semicontroladas de invernadero, momento en el que es crucial contar con un diseño experimental que permita obtener resultados que puedan ser validados luego en cultivos comerciales (Baron et al., 2019; Cotes et al., 2018), como se mencionó en las primeras partes de este capítulo.

Un bioensayo puede ser utilizado para determinar y cuantificar las relaciones huésped-patógeno y el efecto de los parámetros bióticos y abióticos. Los bioensayos con microorganismos entomopatógenos se han utilizado ampliamente en cinco componentes: i) determinación de la virulencia, ii) comparación de la virulencia entre los diferentes microorganismos de interés, iii) determinación y establecimiento del rango de huéspedes (plaga), iv) determinación del potencial de uso y v) estudios sobre los efectos de factores bióticos y abióticos, como el estadio del insecto plaga, la planta, la temperatura,

la humedad y la formulación-bioinsumo a evaluar (Torres-Torres et al., 2020). Debido a esto, la actividad biológica mediante un bioensayo se convierte en una herramienta de importancia para el desarrollo de estrategias de manejo integrado de plagas.

Teniendo en cuenta lo descrito, este apartado se enfocará en describir de manera práctica los requerimientos y la experiencia en el diseño y ejecución de bioensayos para estimar y cuantificar el desempeño del microorganismo biocontrolador en condiciones de invernadero, información que sirve para predecir el comportamiento en campo.

Hay diferentes pruebas disponibles para la evaluación de la actividad biológica, sin embargo, no existen métodos estandarizados y específicos para cada tipo de microorganismo e insecto plaga (Torres-Torres et al., 2020). En los bioensayos diseñados para predecir el desempeño del microorganismo biocontrolador contra el insecto plaga en condiciones de invernadero, se deben tener en cuenta los parámetros ambientales pertinentes (p. ej., temperatura, fotoperiodo), las condiciones de aplicación (aspersión o goteo), entre otros factores.

Existen lineamientos básicos para el desarrollo de bioensayos, los cuales se describen a continuación (Brownbridge & Buitenhuis, 2017; Navon & Ascher, 2000; Santos Díaz et al., 2022; Torres-Torres et al., 2020):

1. Todos los bioensayos deben incluir un control *sin tratamiento* para monitorear y cuantificar la supervivencia de los insectos en las condiciones establecidas en el bioensayo.
2. La selección del tamaño de la muestra y la concentración de dosis depende del sistema patógeno-huésped a evaluar. Por ejemplo, Gulzar et al. (2021) establecieron, al evaluar hongos entomopatógenos contra trips, que los factores con mayor influencia en la precisión del ensayo fueron el tamaño de la muestra y la posibilidad de realizarlo a través del tiempo.
3. Selección adecuada del método de inoculación: en condiciones de invernadero, es posible realizar la inoculación del entomopatógeno de diferentes formas, siendo las más utilizadas la aspersión, el espolvoreo y la inoculación directa en suelo o en hoja. Como recomendación, es importante determinar la viabilidad del entomopatógeno antes de realizar el bioensayo (Santos Díaz et al., 2022), con el fin de garantizar la eficacia del microorganismo.

4. Se recomienda que la mortalidad se cuantifique a través del tiempo del montaje del bioensayo, no solo al final. Este tiempo de incubación o de seguimiento depende de los tipos de insecto y de entomopatógeno que se estén evaluando.
5. Es necesario tener en cuenta que, en bioensayos en donde se requiera inocular el suelo con los diferentes estadios del insecto, se deben considerar las características químicas, físicas y microbiológicas del suelo (textura, humedad, indicadores biológicos, entre otros).
6. Para insectos que presenten el estadio de ninfas, como opción de inoculación se utiliza la contaminación de la superficie de las hojas de la planta.
7. Para todos los bioensayos realizados en condiciones de invernadero, se recomienda realizar la verificación de síntomas en condiciones de laboratorio. Para ello, se pueden muestrear de forma aleatoria insectos con sintomatología y verificar en laboratorio el microorganismo.

En Colombia, se han desarrollado diversos trabajos (artículos, tesis, participación en congresos) en los que se evalúan microorganismos entomopatógenos contra insectos plaga en condiciones de invernadero. A continuación, se describe un ejemplo de bioensayo en el que se aplican las recomendaciones anteriormente descritas.

Modelo hongo biocontrolador-insecto plaga

La mosca blanca (Homoptera: Aleyrodidae) es una plaga que tiene gran impacto en la agricultura actual, debido a su amplia distribución, la gran cantidad de plantas hospederas y el número de cultivos que afecta. Para su control, se han desarrollado varias estrategias que se enfocan en el uso de hongos entomopatógenos, como *Akanthomyces lecanii* (anteriormente *Lecanicillium lecanii*) y *Beauveria bassiana* (De Barro et al., 2011; Sani et al., 2020). Uno de los bioensayos más utilizados es el descrito en varios trabajos del Grupo de Control Biológico de Plagas Agrícolas de AGROSAVIA, el cual consiste en evaluar la actividad biológica de cepas de hongos de interés y de bioplaguicidas sobre ninfas en segundo instar de *Trialeurodes vaporariorum*, mantenidas en la planta hospedera de fríjol en condiciones de invernadero. En general, se evalúan tres tratamientos: testigo absoluto, muestra a evaluar y control relativo (agua). Como variable de respuesta se determina el porcentaje de eficacia mediante la mortalidad. A continuación, se describe la metodología.

Se siembran semillas de frijol de la variedad ICA-Calima en materas con capacidad de dos kilogramos de suelo. Una vez la planta emerge y tiene mínimo dos trifolios formados, se realiza la infestación con adultos de *T. vaporariorum*. Para esto, se ubican 30 insectos dentro una jaula pinza dispuesta en cada foliolo (figura 69) y, transcurridas 48 horas, se lleva a cabo la desinfestación, mediante la recolección de los adultos por medio de un aspirador bucal. Una vez se evidencian las ninfas de segundo instar, se hace el conteo en cada foliolo. Posteriormente, se aplican los tratamientos a evaluar mediante aspersiones sobre el envés del foliolo. Se realiza el seguimiento del bioensayo cada tres días, hasta alcanzar el cuarto instar o hasta evidenciar exuvias en el testigo absoluto. Finalmente, se hace el conteo de los insectos vivos y muertos sobre cada foliolo y se calcula la eficacia (Espinel, Lozano et al., 2008; Espinel, Torres et al., 2008; Espinel et al., 2009; Cotes et al., 2009; Santos-Díaz et al., 2022).

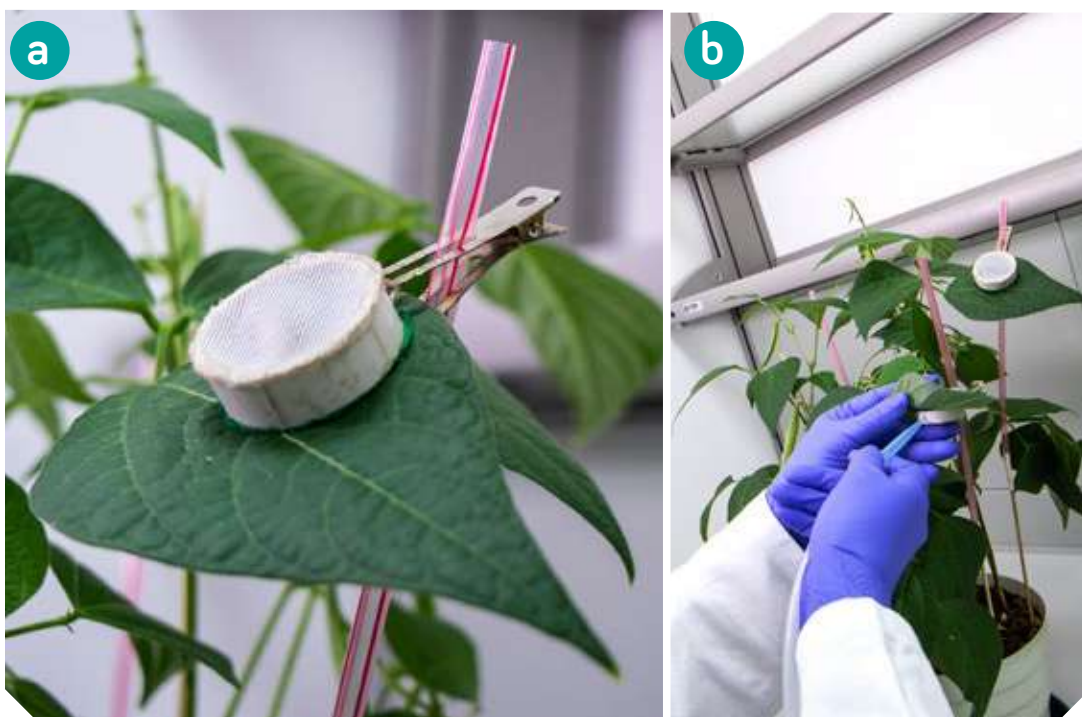


Figura 69. Bioensayo *in vivo*. a. Jaula pinza en hoja de frijol utilizada para bioensayo con *T. vaporariorum*. b. Proceso de aspiración para remoción de insectos de *T. vaporariorum*.

Fotos: Mónica Páramo

Conclusiones

Los espacios en invernadero son fundamentales para el desarrollo exitoso de bioensayos aplicados a la evaluación de artrópodos plaga. La validez de los resultados de estos bioensayos para la producción o cría de artrópodos depende del diseño y uso adecuado del invernadero, así como de la ejecución, el análisis y la interpretación correcta de los resultados.

La utilización de invernaderos en investigación con artrópodos permite generar información que puede usarse para predecir o estimar comportamientos en condiciones de campo. Por esta razón, el diseño y las buenas prácticas en invernaderos deben mejorarse constantemente para proporcionar una mayor precisión y validez en dicha información. La inclusión de equipos de monitoreo de condiciones ambientales permite el diseño de metodologías para crías de artrópodos y de bioensayos acordes a la realidad y a las necesidades actuales.

En este capítulo se han proporcionado algunos parámetros que se consideran importantes y que se deben tener en cuenta para el desarrollo y ejecución de un bioensayo con artrópodos de interés agrícola. También se brindaron varios ejemplos de crías de artrópodos y de bioensayos para ilustrar algunos métodos que se han utilizado con una variedad de especies de interés. Se espera que esta información estimule y facilite el uso de invernaderos bajo conceptos de buenas prácticas, que incluyan el uso adecuado de la infraestructura, para obtener resultados válidos por medio del diseño de experimentos adecuados.

Referencias

- Baeza, E. J., Pérez-Parra, J. J., López, J. C., & Montero, J. I. (2006). CFD study of the natural ventilation performance of a parral type greenhouse with different numbers of spans and roof vent configurations. *Acta Horticulturae*, 719(719), 333-340. https://www.actahort.org/books/719/719_37.htm
- Baille, A., González-Real, M. M., López, J. C., Cabrera, J., & Pérez-Parra, J. (2002). Characterization of the solar diffuse component under "Parral" plastic greenhouses. *Acta Horticulturae*, 614(614), 341-346. https://www.actahort.org/books/614/614_51.htm
- Bajonero, J., Córdoba, N., Cantor, F., Rodríguez, D., & Cure, J. R. (2008). Biology and life cycle of *Apanteles gelechiidivoris* (Hymenoptera: Braconidae) parasitoid of *Tuta absoluta* (Lepidoptera: Gelechiidae). *Agronomía Colombiana*, 26(3), 417-426.
- Baron, N. C., Rigobelo, E. C., & Zied, D. C. (2019). Filamentous fungi in biological control: current status and future perspectives. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 79(June), 307-315. <https://doi.org/10.4067/S0718-58392019000200307>

- Brownbridge, M., & Buitenhuis, R. (2017). Integration of microbial biopesticides in greenhouse floriculture: the Canadian experience. *Journal of Invertebrate Pathology*, 165, 4-12. <https://doi.org/10.1016/j.jip.2017.11.013>
- Bustos, A., Cantor, F., Cure, J. R., & Rodríguez, D. (2009). Standardization of a rearing procedure of *Tetranychus urticae* Koch (Acari: Tetranychidae) on Bean (*Phaseolus vulgaris*): plant age and harvest time. *Neotropical Entomology*, 38, 653-659.
- Bustos, A., Rodríguez, D., Cure, J. R., & Cantor, F. (2016). A simulation model of the mass rearing of *Tetranychus urticae* Koch (Acari: Tetranychidae) on beans. *Neotropical Entomology*, 45(3), 291-299.
- Choab, N., Allouhi, A., El Maakoul, A., Kousksou, T., Saadeddine, S., & Jamil, A. (2019). Review on greenhouse microclimate and application: design parameters, thermal modeling and simulation, climate controlling technologies. *Solar Energy*, 191, 109-137.
- Cotes, A. M., Villamizar, L., Espinel, C., García, J., Jiménez, L., Garzón, I., & López-Ávila, A. (2009). Bioplaguicida con base en *Lecanicillium lecani* para el control de la mosca blanca de los invernaderos *Trialeurodes vaporariorum*. *Innovación y Cambio Tecnológico*, 4, 17-23.
- Cotes, A. M., Fargetton, X., & Köhl, J. (2018). Diseño conceptual, selección y prueba de concepto de microorganismos biocontroladores. En A. Cotes (Ed.), *Control biológico de fitopatógenos, insectos y ácaros: aplicaciones y perspectivas* (vol. 2). AGROSAVIA.
- Daza, M., Cantor, F., Rodríguez, D., Bustos, A., & Cure, J. R. (2010). Criteria for the production of *Phytoseiulus persimilis* (Parasitiformes: Phytoseiidae) under greenhouse conditions. *Acta Biológica Colombiana*, 15(1), 37-46.
- De Barro, P. J., Liu, S.-S., Boykin, L. M., & Dinsdale, A. B. (2011). *Bemisia tabaci*: a statement of species status. *Annual Review of Entomology*, 56, 1-19.
- Desneux, N., Han, P., Mansour, R., Arnó, J., Brévault, T., Campos, M. R., ... & Biondi, A. (2021). Integrated pest management of *Tuta absoluta*: practical implementations across different world regions. *Journal of Pest Science*, 95, 1-23.
- Đević, M., & Dimitrijević, A. (2008). Energy consumption for different greenhouses' structures. *Journal of Agricultural Sciences*, 53(1), 71-78.
- De Vis, R., Fuentes, L. E., & Van Lenteren, J. C. (1999). Development of biological control of *Trialeurodes vaporariorum* with *Encarsia formosa* and *Amitus fuscipennis* on greenhouse tomato in Colombia. *IOBC-WPRS Bulletin*, 22, 267-270.
- De Vis, R., Fuentes, L. E., & Van Lenteren, J. C. (2002). Life history of *Amitus fuscipennis* (Hym., Platygastridae) as parasitoid of the greenhouse whitefly *Trialeurodes vaporariorum* (Hom., Aleyrodidae) on tomato as function of temperature. *Journal of Applied Entomology*, 126(1), 24-33.
- Díaz, A. (2008). *Buenas prácticas agrícolas: guía de pequeños y medianos agroempresarios*. IICA.
- Díaz-Tapias, M. A. D., Rincón, F. C., & Caicedo, D. R. (2011). Análisis estadístico de la producción de un biocontrolador de la mosca blanca en plantas de frijol bajo invernadero. *Comunicaciones en Estadística*, 4(2), 95-107.

- Díaz, M. A., Rodríguez, D., & Cantor, F. (2019). A scouting method for estimating insect populations in an *Encarsia formosa* (Hymenoptera: Aphelinidae) mass rearing system. *Neotropical Entomology*, 48(3), 476-483.
- Espinel, C., Torres, L., Grijalba, E., Villamizar, L., Cotes, A. (2008). Preformulados para el control de la mosca blanca *Bemisia tabaci* (Hemiptera: Aleyrodidae) en condiciones de laboratorio. *Revista Colombiana de Entomología*, 34(1), 22-27.
- Espinel, C., Lozano, M. D., Villamizar, L., Grijalba, E., & Cotes, A. M. (2008). Estrategia MIP para el control de *Bemisia tabaci* (Hemiptera: Aleyrodidae) en melón y tomate. *Revista Colombiana de Entomología*, 34, 163-168.
- Espinel, C., Torres, L., & Cotes, A. M. (2009). Efecto de hongos entomopatógenos sobre estados de desarrollo de *Bemisia tabaci* (Hemiptera: Aleyrodidae). *Revista Colombiana de Entomología*, 35, 18-21.
- Forcella, F., Buhler, D. D., & McGiffen, M. E. (2018). Pest management and crop residues. En J. L. Hatfield (Ed.), *Crops residue management* (pp. 173-190). CRC Press.
- Gulzar, S., Wakil, W., & Shapiro-ilan, D. I. (2021). Potential use of entomopathogenic nematodes against the soil dwelling stages of onion thrips, *Thrips tabaci* Lindeman: laboratory, greenhouse and field trials. *Biological Control*, 161, 104677. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2021.104677>
- Gupta, V. K., Parsad, R., Bhar, L. M., & Mandal, B. N. (2008). *Statistical analysis of agricultural experiments. Part I: single factor experiments*. ICAR-Indian Agricultural Statistics Research Institute.
- Hartung, J., Wagener, J., Ruser, R., & Piepho, H. P. (2019). Blocking and re-arrangement of pots in greenhouse experiments: which approach is more effective? *Plant Methods*, 15(1), 1-11. <https://doi.org/10.1186/s13007-019-0527-4>
- Kittas, C., Katsoulas, N., Bartzanas, T., Mermier, M., & Boulard, T. (2008). The impact of insect screens and ventilation openings on the greenhouse microclimate. *Transactions of the ASABE*, 51(6), 2151-2165.
- Li, G., Tang, L., Zhang, X., Dong, J., & Xiao, M. (2018). Factors affecting greenhouse microclimate and its regulating techniques: a review. En *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 167(1), p. 012019. IOP Publishing.
- Lin, D., Zhang, L., & Xia, X. (2020). Hierarchical model predictive control of Venlo-type greenhouse climate for improving energy efficiency and reducing operating cost. *Journal of Cleaner Production*, 264, 121513.
- Marín Rodríguez, C., & García Mendoza, P. (2019). El diseño de experimentos en la investigación agrícola. *Tayacaja*, 1(2), 64-81. <https://doi.org/10.46908/rict.v1i2.28>
- Navon, A., & Ascher, K. (Eds.). (2000). *Bioassays of entomopathogenic microbes and nematodes*. CAB International.
- Martínez, L. D. O. (2014). Uso y manejo de plaguicidas en invernaderos de la región norte del estado de Puebla, México. *Acta Universitaria. Multidisciplinary Scientific Journal*, 24(3), 3-12.

Capítulo VIII. Uso de invernaderos en la ejecución de investigaciones aplicadas a la evaluación de artrópodos plaga en Colombia

- Morales, J., Rodríguez, D., & Cantor, F. (2013). Estandarización de la cría masiva de *Apanteles gelechiivoris* Marsh (Hymenoptera: Braconidae) para el control de *Tuta absoluta* Meyrick (Lepidoptera: Gelechiidae). *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 9(1), 20-37.
- Morales, J., Muñoz, L., Rodríguez, D., & Cantor, F. (2014). Acción combinada de feromona sexual y de avispa *Apanteles gelechiivoris* para el control de *Tuta absoluta* en cultivos de tomate bajo invernadero. *Acta Biológica Colombiana*, 19(2), 175-184.
- Morales-Perdomo, J. A., Rodríguez-Caicedo, D., & Cantor-Rincón, F. (2018). Effect of different temperatures and cold storage on pupae of *Apanteles gelechiivoris* (Hymenoptera: Braconidae). *Revista Colombiana de Entomología*, 44(2), 217-222.
- Murrell, E. G. (2017). Can agricultural practices that mitigate or improve crop resilience to climate change also manage crop pests? *Current Opinion in Insect Science*, 23, 81-88.
- Parra, J. P., Baeza, E., Montero, J. I., & Bailey, B. J. (2004). Natural ventilation of parral greenhouses. *Biosystems Engineering*, 87(3), 355-366.
- Parra, J. R. P. (2013). *Técnicas de criação de insetos para programas de controle biológico*. Universidade de São Paulo.
- Pérez-Marulanda, J. A., & Giraldo-Sánchez, C. E. (2020). Parámetros poblacionales de *Tuta absoluta* (Lepidoptera: Gelechiidae) y pérdidas asociadas en tomate de invernadero. *Revista de Biología Tropical*, 68(4), 1025-1038.
- Rodríguez, A. A., Uscátegui, N. P., Díaz, L. T., Rincón, F. C., Rodríguez, A. B., & Caicedo, D. R. (2006). Evaluación de un método a campo abierto para la producción de *Tetranychus urticae*-Koch (Acari: Tetranychidae), como suministro de presas para *Phytoseiulus persimilis*-Athias. *Revista de la Facultad de Ciencias Básicas*, 2(1), 117-122.
- Román-Roldán, N. I., López-Ortiz, A., Ituna-Yudonago, J. F., García-Valladares, O., & Pilatowsky-Figueroa, I. (2019). Computational fluid dynamics analysis of heat transfer in a greenhouse solar dryer "chapel-type" coupled to an air solar heating system. *Energy Science & Engineering*, 7(4), 1123-1139.
- Sani, I., Ismail, S. I., Abdullah, S., Jalinas, J., Jamian, S., & Saad, N. (2020). A review of the biology and control of whitefly, *Bemisia tabaci* (Hemiptera: Aleyrodidae), with special reference to biological control using entomopathogenic fungi. *Insects*, 11(9), 619. <https://doi.org/10.3390/insects11090619>.
- Santos Díaz, A. M., Grijalba Bernal, E. P., Torres Torres, L., & Uribe Gutiérrez, L. A. (2022). *Plaguicidas microbianos: control y aseguramiento de calidad*. AGROSAVIA. <https://doi.org/10.21930/agrosavia.manual.7405125>
- Senhaji, A., Mouqallid, M., & Majdoubi, H. (2019). CFD assisted study of multi-chapels greenhouse vents openings effect on inside airflow circulation and microclimate patterns. *Open Journal of Fluid Dynamics*, 9(2), 119-139.
- Shipp, J. L., Zhang, Y., Hunt, D. W. A., & Ferguson, G. (2003). Influence of humidity and greenhouse microclimate on the efficacy of *Beauveria bassiana* (Balsamo) for control of greenhouse arthropod pests. *Environmental Entomology*, 32(5), 1154-1163.

- Somoza, A., Vázquez, P., & Zulaica, L. (2019). Implementación de buenas prácticas agrícolas para la gestión ambiental rural. *RIA. Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 44(7000), 398-423.
- Stapleton, J. J. (2000). Soil solarization in various agricultural production systems. *Crop Protection*, 19(8-10), 837-841.
- Surekha, K., Padma Kumari, A. P., Narayana Reddy, M., Satyanarayana, K., & Sta Cruz, P. C. (2003). Crop residue management to sustain soil fertility and irrigated rice yields. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 67(2), 145-154
- Suárez González, L. F., Díaz Tapias, M. A., Rodríguez Caicedo, D., & Cantor Rincón, F. (2015). Indirect measurement of the rate of consumption of adult and immature of *Trialeurodes vaporariorum* (Hemiptera: Aleyrodidae) on common bean. *Acta Biológica Colombiana*, 20(3), 99-109.
- Teitel, M. (2007). The effect of screened openings on greenhouse microclimate. *Agricultural and Forest Meteorology*, 143(3-4), 159-175.
- Torres-Torres, L., Espinel-Correal, C., & Santos-Díaz, A. M. (2020). Hospederos alternativos y estandarización de métodos para evaluar la actividad biocontroladora de micoinsecticidas. *Revista Colombiana de Entomología*, 46(2), e7678.
- Trapero-Casas, A., Escobar, R. F., & J. Domínguez. (2015). *Experimentación en agricultura*. Junta de Andalucía-Consejería de Agricultura y Pesca.
- Villagrán, E. A., & Bojacá, C. R. (2019). Determination of the thermal behavior of a Colombian hanging greenhouse applying CFD simulation. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 28(3), 1-10.
- Yu, G., Zhang, S., Li, S., Zhang, M., Benli, H., & Wang, Y. (2022). Numerical investigation for effects of natural light and ventilation on 3D tomato body heat distribution in a venlo greenhouse. *Information Processing in Agriculture*, 9(3), 343-474.



Capítulo IX

175

Proceso de aclimatación y acondicionamiento de material vegetal con potencial productivo en condiciones protegidas semicontroladas

Linda Gómez Arias
Sandra Valbuena Aguilar
Tatiana Miranda Salas
Edwin Andrés Villagrán Munar

Introducción

Desde su descubrimiento como herramienta para la multiplicación masiva de especies vegetales, la micropropagación ha sido empleada para la producción a grandes escalas de material vegetal de importancia económica, ya que permite obtener, en menor tiempo y espacio, plántulas completas, con criterios de calidad. A partir de un explante obtenido de una planta madre sana y cultivado bajo condiciones de laboratorio, sobre un medio artificial, el cual le provee todos los nutrientes necesarios para su crecimiento y desarrollo, se puede multiplicar y producir un gran número de plántulas hijas o clones que conservan las mismas características de la madre.

El éxito de las técnicas de cultivo de tejidos vegetales depende, en gran medida, de establecer todas las etapas del proceso, como son la propagación, el enraizamiento y la aclimatación de las plantas (Resende et al., 2015). Esta última es crítica, considerando que, durante la transición de *in vitro* a *ex vitro*, se presentan los problemas más serios, ya que en este momento ocurren las mayores pérdidas (Gil et al., 2017). Durante esta etapa se produce un retorno gradual al funcionamiento autotrófico, así como la recuperación de las características morfológicas y fisiológicas normales de la planta (Sánchez et al., 2012). Para reducir el estrés en la etapa de aclimatación e incrementar la supervivencia de las plántulas, es importante manejar adecuadamente la humedad relativa del aire, las condiciones del sustrato, la temperatura y la luz (Oliveira et al., 2013).

El uso de invernaderos con condiciones controladas permite programar las variables ambientales según la especie vegetal que se requiera aclimatar de forma gradual, lo que optimiza el proceso de adaptación de grandes cantidades de material vegetal producido en el laboratorio.

Aclimatación de plantas producidas mediante la técnica *in vitro*

Los cultivos bajo invernadero han tomado gran importancia, por las múltiples ventajas, tanto económicas como culturales, que ofrecen, como preservación del suelo y su estructura, condiciones climáticas controladas, mayor calidad de frutos y flores, control fitosanitario más efectivo, eficiencia productiva y mejor aprovechamiento del uso del agua. La producción *in vitro* de plantas es una técnica que se ha venido implementando cada vez más, debido a la variación de las condiciones climáticas, por lo tanto, es necesario buscar y

adoptar diferentes alternativas de producción vegetal, enfocadas en la obtención de especies de importancia agronómica y ambiental.

Las plantas micropropagadas a través de técnicas biotecnológicas, durante la etapa del cultivo *in vitro*, poseen características anatomorfológicas que las diferencian de las plantas propagadas en ambientes naturales. Una plántula en condiciones *in vitro* no tiene necesidad de desarrollar sus funciones fotosintéticas, debido a que toma la energía del medio de cultivo en el cual vive, es decir, no tiene activado su aparato fotosintético para capturar el CO₂, fabricar sus propios asimilados y desarrollarse por sí sola. A esta característica se le denomina *heterótrofa*, esto es, que para vivir depende de otro. Las plantas propagadas en medio natural son autótrofas desde sus primeros momentos (Molina et al., 2008).

Condiciones de adaptación *ex vitro*

Una de las fases de producción de plantas por la técnica *in vitro* contempla la adaptación *ex vitro*, o aclimatación de plantas a condiciones de invernadero. Esto permite que las plantas realicen su transición hacia la activación de su sistema fotosintético y la conexión de su sistema radicular con los haces vasculares. En esta etapa, es de vital importancia controlar los cambios físicos de manera gradual, para evitar estrés por deshidratación o cambios bruscos de temperatura que puedan ocasionar una pérdida considerable de material vegetal, por lo que contar con un área de aclimatización o invernadero que permita mantener condiciones de humedad, temperatura y luminosidad controladas favorecerá el proceso de aclimatización, lo que reduce las pérdidas y mejora los porcentajes de supervivencia según la especie.

A continuación, se pueden evidenciar las condiciones y el proceso de adaptación de las plántulas, una vez salen del laboratorio, con miras a su aclimatización o endurecimiento, o rusificación, para ser llevadas finalmente a campo (figura 70).

Material vegetal *in vitro*. Selección de plántulas con buen desarrollo vegetativo y radicular

Alistamiento: las plantas deben ser retiradas del frasco, procurando mantener su estructura y sistema radicular completo.



Hidratación: el material vegetal debe permanecer en constante hidratación. Es necesario lavar cuidadosamente las raíces y eliminar totalmente cualquier residuo del medio de cultivo.



Substrato: brinda soporte e hidratación a las plántulas, por lo que debe ser preferiblemente estéril o aséptico. Pueden emplearse bandejas de germinación, vasos, bolsas, etc. El tamaño de las cavidades debe ser proporcional a la especie que se esté trabajando.



Siembra: se realiza sobre las bandejas de germinación o el contenedor seleccionado, procurando no dañar el sistema radicular y evitando la deshidratación de las plantas.



Humedad relativa (HR): Después de la siembra, las plantas deberán mantenerse en una cámara húmeda, al 90 % de HR. La temperatura dependerá de la especie y se usará una iluminación de 16 horas luz.



Bajo estas condiciones físicas, las plantas se mantendrán por una o dos semanas. Este tiempo puede variar en especies de lento crecimiento.



La adaptación empezará de forma gradual y se irán cambiando paulatinamente las condiciones físicas, hasta obtener plantas totalmente endurecidas y autótrofas.



Figura 70. Procedimiento fase de adaptación *ex vitro*.

Fotos: Cristian Rodríguez

Adaptación de plantas *in vitro* a condiciones de invernadero

Durante la fase de aclimatación del material vegetal, es importante mantener las condiciones físicas adecuadas para dar continuidad al crecimiento de las plantas. Estas deben ser evaluadas continuamente para caracterizar su proceso de adaptación a condiciones externas. La temperatura no deberá variar significativamente con respecto a la establecida en cada una de las etapas de producción *in vitro*. También se debe tener en cuenta que, en los contenedores o frascos de vidrio, las plantas se conservan en un alto porcentaje de humedad, que deberá mantenerse durante la primera fase de endurecimiento.

En esta etapa, en la que el sustrato inicialmente no aporta ningún tipo de nutriente a las plantas, se considera de gran importancia establecer un plan de fertilización, siguiendo las recomendaciones de un ingeniero agrónomo, que garantice la disponibilidad de elementos tanto mayores como menores para el material vegetal, y que se inicie la activación fisiológica y autotrófica de las plantas. También es habitual el uso de microorganismos benéficos (hongos micorrizógenos) durante la adaptación *ex vitro* de las plantas, como agentes controladores de problemas fitosanitarios y promotores de crecimiento.

En estudios como el de Valderrama et al. (2008), se obtuvieron porcentajes de supervivencia de plantas de seis genotipos de mora (*Rubus glaucus*), en la fase de aclimatación *ex vitro*, de entre 90 y 95 %. Se usó como sustrato turba con micorriza, y se mantuvo el material vegetal en cámara húmeda y bajo invernadero por dos semanas, a una temperatura de 22 °C. Se efectuaron fertilizaciones foliares una vez por semana con elementos mayores (N, P, K; 10/52/10), y se complementó con elementos menores hasta la quinta semana con aplicaciones de *Trichoderma koningiopsis* Th003 (1×10^6 conidios/ml por cada aspersión foliar).

Otra especie de interés agrícola que presenta rápida y fácil aclimatación en invernadero es la uchuva (*Physalis peruviana*), cuyas plántulas, al realizar la transición a condiciones *ex vitro*, por tratarse de una especie de rápido crecimiento, mostraron un porcentaje de supervivencia cercano al 99 %. El desarrollo de primordios foliares se evidencia en menos de una semana, y las nuevas hojas garantizan la apertura y cierre de estomas, lo que evita la deshidratación de las plantas. Adicionalmente, las hojas que emergen después de la fase *in vitro* ya ejercen la función de transformación de la energía por medio de la fotosíntesis, pues la planta inicia la captura de CO₂ y fisiológicamente dejará de ser heterótrofa (Suárez et al., 2006).

Para la aclimatación de especies leñosas, como sucede con el roble (*Tabebuia rosea* [Bertol.] DC.), en la mayoría de los casos se hace necesario realizar ajustes en las etapas *in vitro* y *ex vitro*, para incrementar los porcentajes de supervivencia del material. Un trabajo realizado por Suárez et al. (2006) evaluó la fase de aclimatación *ex vitro* de plántulas de roble (*Tabebuia rosea* [Bertol.] DC.), las cuales provenían de una fase de enraizamiento previa, utilizando cuatro concentraciones diferentes de ácido naftalenacético (ANA) como regulador de crecimiento vegetal, lo que indujo el desarrollo de raíces adventicias hasta en el 100 % de los explantes expuestos a la mayor concentración hormonal.

Aunque en la mayoría de los casos se busca pasar directamente de la multiplicación a la transferencia *ex vitro*, como una forma de ganar eficiencia, la producción de raíces afecta significativamente las posibilidades de recuperación de especies leñosas perennes en el estado de enraizamiento de la micropropagación. Estudios realizados por Suárez et al. (2006) mostraron la necesidad de aplicar un suplemento de auxina para inducir e incrementar los porcentajes de enraizamiento, alcanzar un mayor número de raíces por explantes y lograr la proporción entre el número de raíces producidas y la concentración de ANA aplicada (Suárez et al., 2006).

Para otras especies leñosas se han utilizado metodologías de adaptación que consisten en impregnar las bases de los tallos en soluciones con altas concentraciones de auxinas, lo que logra un efecto generador de raíces hasta en 80 % de los explantes o esquejes utilizados.

En ensayos de aclimatación de plantas de arándanos (*Vaccinium myrtillus*) provenientes de cultivos *in vitro*, en los que se conoce que en esta etapa los procesos de enraizamiento no son tan efectivos, ya que se han encontrado porcentajes por debajo del 45 % de los explantes expuestos a diferentes concentraciones y reguladores, se han debido considerar alternativas para inducir el desarrollo radicular con el uso de extractos vegetales, tanto en la fase de enraizamiento *in vitro* como durante la transición a fase de invernadero, en condiciones controladas, siendo esta una alternativa eficiente para obtener plantas con mayor desarrollo radicular antes de ser llevadas a campo. Cabe resaltar que, de acuerdo a un análisis descriptivo, se determinó que, en plántulas que no superan los 3 cm de altura, el desarrollo de raíces es significativamente menor, si se compara con explantes de mayor tamaño (figura 71).

El desarrollo radicular de especies arbustivas en condiciones *in vitro* está determinado por diferentes factores fisiológicos y por la capacidad de los tejidos vegetales para responder a una inducción hormonal, ya sea natural o suministrada en el medio de cultivo utilizado en cada una de las fases de crecimiento.

La estimulación de raíces en etapa de laboratorio (*in vitro*) no siempre es un factor determinante para que la plántula se desarrolle en condiciones de invernadero (*ex vitro*). En casos como el de los arándanos, en los que las plántulas son llevadas a etapa de aclimatación sin raíz, se logró desarrollar en esta etapa, un sistema radicular fibroso y superficial (figura 71), característico de esta especie.



Figura 71. Planta de arándano producida *in vitro*, con tres meses de adaptación en invernadero, lista para ser entregada y llevada a campo.

Foto: Sandra Valbuena

Criterios de calidad de los inventarios entregados al cliente final

Uno de los elementos más importantes que se debe tener en cuenta al momento de establecer un cultivo en condiciones de campo es la semilla. La calidad de esta permitirá disminuir el riesgo de problemas sanitarios que puedan ser limitantes para el desarrollo de las plantas. Para asegurar su vigor y buen comportamiento durante el crecimiento y desarrollo en condiciones de campo, el material vegetal que se produce bajo condiciones semicontroladas debe cumplir con los criterios de calidad física, fisiológica, genética y sanitaria. Por esta razón, durante el proceso de producción, aclimatación y acondicionamiento del material, es indispensable hacer un seguimiento continuo de las plántulas, para garantizar su trazabilidad en el sistema de propagación. Estos criterios se deben considerar desde cuatro dimensiones, las cuales se describen a continuación.

Sanidad

La sanidad vegetal está definida como la salud de las plantas para la producción de alimentos (Food and Agriculture Organization [FAO], 2021), razón por la cual, durante el proceso de producción, aclimatación y acondicionamiento del material, se hace un monitoreo constante de las plántulas, de acuerdo con la etapa del proceso en el que se encuentren. Las dos grandes etapas son *en condiciones de laboratorio* y *en invernadero*.

Etapa en condiciones de laboratorio

Durante el proceso de producción bajo condiciones de laboratorio, el material vegetal puede presentar, especialmente, problemas sanitarios asociados a enfermedades. Si al momento de realizar el monitoreo se presentan síntomas de pudriciones blandas, pudriciones acuosas, micelio, clorosis, necrosamiento, hiperhidratación de tejidos u oxidación, entre otros, se tomará la decisión de eliminar el material contaminado, considerando la cantidad de material total disponible.

Cuando el material vegetal en producción es suficiente, es posible descartar las plántulas contaminadas y continuar el proceso con aquellas que presenten las mejores características, pero si, por el contrario, la cantidad de material es limitada, se debe definir la implementación de técnicas de limpieza fitosanitaria. En la tabla 24, se describen las técnicas a considerar.

Tabla 24. Descripción, ventajas y desventajas de las técnicas de limpieza fitosanitaria en condiciones de laboratorio

Técnica	Características	Ventajas	Desventajas
Siembra de meristemas.	Eliminación de patógenos virales (Margara, 1988). Uso de medios de cultivo de acuerdo con la especie vegetal a propagar.	Alta tasa de multiplicación.	En algunos casos, no hay eliminación total de la presencia de virus.
Termoterapia.	Erradicación de patógenos causantes de enfermedades (Varés Megino, 2009). Uso de altas temperaturas (Heredia Guerrero, 2016). Aplicación de diferentes temperaturas para eliminar problemas sanitarios.	Menor costo para la implementación de esta técnica. Puede ser empleada conjuntamente con la siembra de meristemas.	Pérdida de material vegetal. Se requiere el uso de equipo especializado (cámara climática).
Quimioterapia.	Adición de antivirales y sustancias químicas a los medios de cultivo (Heredia Guerrero, 2016).	En algunos casos, limpieza del 100 % de la carga viral.	Mayor costo por el uso de productos químicos.
Crioterapia.	Exposición de los medios de cultivo a temperaturas de ultracongelación (Méndez Chávez, 2014).	Obtención de material vegetal libre de virus.	Estandarización de protocolos por especie. Altas tasas de pérdida de material vegetal.

Fuente: Elaboración propia

Una vez definida e implementada la técnica de limpieza del material, se continuará con el monitoreo sanitario de las plántulas para asegurar su calidad.

Etapa en condiciones de invernadero

Cuando las plántulas finalizan el periodo en condiciones de laboratorio, son llevadas a invernadero para iniciar el proceso de aclimatación. En esta etapa, se debe tener claro el manejo agronómico que se le dará a las plántulas, el cual dependerá de la especie vegetal a trabajar. El manejo agronómico deberá contemplar lo descrito en la tabla 25.

Tabla 25. Consideraciones para el manejo agronómico de las plántulas en condiciones de invernadero

Labor	Consideraciones
Siembra.	Tipo de sustrato. Distancia de siembra (cuando es en camas). Tipo de bandeja germinadora.
Fertilización.	Dosis. Frecuencia. Tipo (foliar o edáfico).
Riego.	Tipo de riego (goteo o aspersión). Tiempo de riego. Frecuencia (diario, dos veces a la semana, semanal).
Manejo de enfermedades.	Monitoreo semanal. Identificación de síntomas*. Aplicación preventiva de productos biológicos** para el manejo de patógenos. Aplicación curativa de productos químicos** para el control de enfermedades. Descarte de material cuando se trata de enfermedades limitantes para la producción.
Manejo de plagas.	Monitoreo semanal. Identificación de signos*. Aplicación preventiva de productos biológicos** para el manejo de insectos plaga. Aplicación curativa de productos químicos** para el control de insectos plaga. Descarte de material cuando el daño producido por los insectos es limitante para la producción.
Cosecha.	Selección de plántulas que cumplan con el vigor y desarrollo para el trasplante a sitio definitivo.

* Los síntomas o signos de problemas fitosanitarios deben ser consultados antes del inicio del proceso de multiplicación, teniendo en cuenta que esto dependerá del material vegetal que se trabajará.

** Deben cumplir con el registro ICA.

Fuente: Elaboración propia

Por medio del manejo agronómico en etapa de invernadero, se asegura la etapa de aclimatación y el buen desarrollo de las plántulas, para luego ser trasplantadas a campo, según el caso. Asimismo, a través del monitoreo y seguimiento constante se identifican a tiempo los problemas sanitarios, con el fin de determinar si es necesario el descarte o la implementación de estrategias como podas sanitarias, o aplicación de productos biológicos o químicos para disminuir la proliferación de aquellos —o para su total erradicación—.

Calidad fisiológica

Este criterio de calidad corresponde a la capacidad que tienen las plantas para producir un nuevo individuo de acuerdo con las funciones propias de la especie vegetal y con el tipo de semilla (Becerra Campiño et al., 2019). Para el caso del proceso de producción, aclimatación y acondicionamiento, este criterio se evalúa específicamente en la etapa de laboratorio, por medio de la tasa de multiplicación, la cual dependerá de la especie vegetal y de sus características al momento de la introducción.

Calidad física

La calidad física de las plántulas contempla el vigor y buen comportamiento de estas durante el proceso de producción, aclimatación y acondicionamiento (Garay, 1991; Becerra Campiño et al., 2019). Es decir, que, desde el momento de la introducción del material hasta la entrega de inventarios al cliente final, se debe garantizar:

- Ausencia de daños mecánicos de las plantas.
- Ausencia de síntomas y signos causados por problemas fitosanitarios.
- Pureza de la semilla/material vegetal.
- Buen desarrollo de los meristemas en condiciones de laboratorio.
- Óptimo desarrollo de las plantas en condiciones de invernadero.

Calidad genética

Este último criterio de calidad para el proceso de producción, aclimatación y acondicionamiento del material vegetal está directamente relacionado con las características de desarrollo de la planta de acuerdo con su morfología, y debe contemplarse desde el momento en el que se colecta el material que será introducido inicialmente al laboratorio, para lograr la trazabilidad del proceso. Es decir que este criterio corresponde a la autenticidad y estabilidad que

tiene el material vegetal respecto a las características definidas al momento de su liberación (Terenti, 2004; Becerra Campiño et al., 2019).

Además de los criterios anteriormente descritos, se deberán cumplir las condiciones pactadas con el cliente final para la entrega del material vegetal, las cuales pueden incluir:

- Altura de la plántula.
- Número de hojas.
- Sistema radicular.
- Tipo de sustrato.
- Embalaje.
- Informe de manejo de las plántulas aclimatadas y diagnóstico sanitario de estas.

Conclusiones

La biotecnología se ha convertido en una herramienta robusta que ha permitido a la sociedad avanzar en técnicas sostenibles para la producción de alimentos. Los efectos —cada día más adversos— del cambio climático han generado una alta vulnerabilidad de los sistemas de producción de alimentos, lo que obliga a la sociedad a buscar estrategias para intensificar de manera sostenible su producción. Por lo tanto, las técnicas de producción *in vitro* son una herramienta que permite a los productores acceder a material vegetal con altos estándares de calidad física, fisiológica, genética y sanitaria. Lo anterior puede considerarse una estrategia de adaptación al cambio climático, ya que con material vegetal de mayor calidad se puede hacer frente a condiciones de estrés biótico y abiótico que pueden limitar la producción de alimentos y la seguridad alimentaria de una región.

Referencias

- Becerra Campiño, J. J., Rodríguez Yzquierdo, G. A., Alzate Henao, S. V., Miranda Salas, T. C., Tibadui-za Castañeda, L. P. & Cañar Serna, D. Y. (2019). *Manual técnico para la producción de semilla de plátano Hartón Llanero en los Llanos Orientales*. AGROSAVIA. <https://doi.org/10.21930/agrosavia.manual.7403206>
- Garay, A. E. (1991). La calidad de la semilla y sus componentes. En M. A. Irastorza (Coord.), *Control de calidad en el campo, beneficio y almacenamiento* (pp. 1-12). Centro Internacional de Agricultura Tropical. Disponible en: https://cgspace.cgiar.org/bitstream/handle/10568/55667/SB117.C65_Control_de_Calidad_1991..pdf?sequence=1

- Gil Rivero, A. E., López Medina, S. E y López Zabaleta, A. (2017). Aclimatación de plántulas *in vitro* de *Saintpaulia ionantha* (Gesneriaceae) "violeta africana" a condiciones de invernadero. *Arnaldoa*, 24(1), 343-350. <http://www.scielo.org.pe/pdf/arnal/v24n1/a16v24n1.pdf>
- Heredia Guerrero, S. C. (2016). Erradicación de onion yellow dwarf virus (OYDV) en cebolla Shallot (*Allium cepa* var. *Aggregatum*), mediante el cultivo de meristemas, quimioterapia y termoterapia para la producción de bulbos libres de virus. [Trabajo de grado, Universidad San Francisco de Quito]. USFQ Repositorio Digital. <https://repositorio.usfq.edu.ec/bitstream/23000/5198/1/124560.pdf>
- Margara, J. (1988). *Multiplicación vegetativa y cultivo 'in vitro'*. Mundiprensa.
- Méndez Chávez, M. (2014). Evaluación del efecto de la aplicación de métodos criogénicos sobre el saneamiento del virus del mosaico de la caña de azúcar (*sugarcane mosaic virus*, SCMV). [Tesis de maestría, Universidad Veracruzana]. <https://cdigital.uv.mx/bitstream/handle/1944/49249/MendezChavezManuel.pdf?sequence=1&isAllowed=y#>
- Molina, L. A., González Olmedo, J. L., Fundora, Z., Abdunour J. (2008). Aclimatización *in vitro* y *ex vitro*: una estrategia para mejorar la productividad de la micropropagación de plantas. *Revista Revive. Biotecnología*, 15. https://www.researchgate.net/publication/311736525_Aclimatizacion_in_vitro_y_ex_vitro_una_estrategia_para_mejorar_la_productividad_de_la_micropropagacion_de_plantas_Revista_Revive_Biotecnologia_Bolivia_15_2008
- Oliveira, L. S., Dias, P. C., & Brondani, G. E. (2013). Micropropagação de espécies florestais brasileiras. *Pesq. flor. bras.*, 33(76), 439-453. <https://pfb.cnpf.embrapa.br/pfb/index.php/pfb/article/view/481/342>
- Food and Agriculture Organization [FAO]. (2021). *Agrovoc Multilingual Thesaurus*. https://agrovoc.fao.org/browse/agrovoc/en/page/c_25398?clang=es
- Resende, C. F., Bianchetti, R. E., Oliveira, M. S. de, Braga, V. F., & Peixoto, P. H. P. (2015). *In vitro* propagation and acclimatization of *Lippia rotundifolia*, an endemic species of Brazilian Campos Rupestres. *Revista Ciencia Agronómica*, 46(3), 582-589. <http://dx.doi.org/10.5935/1806-6690.20150041>
- Sánchez, L. A., Saavedra, D., & Romero, H. (2012). Aclimatación y endurecimiento de materiales de palma de aceite obtenidos mediante técnicas de cultivo de tejidos vegetales. *Palmas*, 33(4), 41-52. <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/10739/10726>
- Suárez, E. I., Jarma, J. A., & Ávila, M. (2006). Desarrollo de un protocolo para propagación *in vitro* de roble (*Tabebuia rosea* Bertol DC.). *Temas Agrarios*, 11(2), 52-62. <https://doi.org/10.21897/rtav11i2.645>
- Terenti, O. (2004). *Calidad de semilla, qué implica y cómo evaluarla*. Sitio Argentino de Producción Animal. https://www.produccion-animal.com.ar/produccion_y_manejo_pasturas/pasturas%20artificiales/27-calidad_semillas.pdf
- Valderrama, A. M., Álvarez, R., Barrero, L. S., Robayo, M., & Núñez, V. (2008). Validación y escalamiento de plántulas de mora 'in vitro' y manejo 'ex vitro' para entrega a agricultores de Silvania. En L. S. Barrero (Ed.), *Caracterización, evaluación y producción de material limpio de mora con alto valor agregado* (pp. 64-75). Corpoica.



Capítulo X

188

Respuestas fisiológicas, bioquímicas y moleculares al estrés por déficit hídrico en especies forrajeras

Gabriela Toro-Tobón
Carolina Pachón-Venegas
Daniel Torres-Cuesta
Germán Estrada-Bonilla
Fagua Álvarez-Flórez

Introducción

El uso de forrajes en la producción bovina constituye la base fundamental de un sistema de alimentación de bajo costo, debido a que son la fuente de nutrientes más económica (Mccarthy et al., 2013). En Colombia, la alimentación del ganado bovino se basa en el consumo de pastos, suplementados con alimentos concentrados, en caso de que los bovinos así lo requieran (Guerrero & Londoño Martínez, 2014). No obstante, la utilización de esta suplementación alimenticia en la producción láctea, por ejemplo, representa alrededor del 50 % de los costos totales (Flórez-Delgado & Gómez-Parada, 2016), siendo el pasto la fuente más rentable respecto al suministro de concentrados.

Aunque el área precisa de cobertura de las diversas especies forrajeras utilizadas para la ganadería bovina en el país no está bien documentada, sí se conocen las especies representativas por nicho agroecológico. En el caso de la lechería especializada del trópico alto (zonas ubicadas entre los 2.000 y 3.000 m s. n. m.), la base forrajera predominante es el pasto Kikuyo (*Cenchrus clandestinus*) (Marín et al., 2017; Mojica et al., 2009; Restrepo Arias, 2016) y los Ryegrass anuales o perennes (*Lolium multiflorum*, *Lolium perenne*), que son utilizados para incrementar la calidad de las praderas, tanto en monocultivo como en asocio con pasto Kikuyo (Restrepo Arias, 2016). En las explotaciones ganaderas del trópico medio y bajo (zonas ubicadas entre los 0 y 1.900 m s. n. m.), las especies más utilizadas como base forrajera en las praderas son el pasto estrella (*Cynodon plectostachyus*), diferentes especies de *Brachiaria* spp. (*B. decumbens*, *B. humidicola* y *B. brizantha*) y algunas especies nativas (Tapasco et al., 2015), cuyo uso se encuentra relacionado al tipo de suelo, las características climáticas y los tipos de manejo.

En los últimos años, la producción bovina en Colombia se ha visto afectada por diferentes situaciones de índole social (paros nacionales y un excesivo sobrecosto en los insumos y fertilizantes) y por efecto de la variabilidad climática. El comportamiento climático de las diferentes zonas afecta la actividad ganadera, incidiendo drásticamente sobre la productividad de las explotaciones. En general, la productividad de los pastos y forrajes en los sistemas ganaderos de Colombia es estacional, con abundancia de forraje en las praderas durante las épocas de lluvia y rendimientos reducidos en épocas de baja precipitación, lo que ocasiona elevadas pérdidas en la producción animal (Arteaga Álvarez, 2009; Betancourt et al., 2012) y aumento en los costos de producción, debido al uso de alimentos concentrados (Nieto-Sierra et al., 2020).

Desde el punto de vista productivo, tanto la escasez como el exceso de precipitaciones, además de disminuir el rendimiento de los pastos nativos o

introducidos, incide en una reducción drástica de la capacidad de carga animal de las praderas y afecta el estado nutricional del ganado. Ello debido a que, ante el estrés hídrico, los pastos aceleran su metabolismo, lo que ocasiona el paso en menor tiempo de la fase de crecimiento a la fase reproductiva o de formación de semilla, reduciendo su contenido nutricional en cuanto a cantidad y calidad de sus nutrientes, razón por la cual los bovinos no puedan cubrir sus requerimientos nutricionales de mantenimiento, de producción o reproductivos (Vanegas Moreno, 2015). Tapasco et al. (2015) reportaron que el cambio climático tendrá efectos negativos sobre la ganadería, lo que provocará pérdidas en la producción de leche y carne del 7,6 % y 2,2 %, respectivamente, siendo los departamentos de Nariño, Caquetá, Casanare, Cundinamarca y Córdoba los más afectados por los efectos de la variabilidad climática.

El conocimiento de los efectos de la variabilidad climática sobre la ganadería es un reto para la ciencia aplicada, y también lo es entender cuantitativamente cómo los cambios climáticos afectan la fisiología de las especies de pastos.

En el presente capítulo, se aborda la revisión de las respuestas fisiológicas, bioquímicas y moleculares de especies forrajeras ante el estrés por déficit hídrico y se plantean algunas estrategias para mitigar su efecto.

Respuestas al estrés por déficit hídrico

En el medio ambiente, las plantas responden a diferentes estímulos que condicionan su crecimiento, su desarrollo y su supervivencia. La percepción de cambios en el entorno natural es de gran importancia para los organismos vivos, desde los procariontes hasta los eucariotes, y ello es especialmente válido para el caso de las plantas, que son organismos sésiles y que dependen de las fluctuaciones abióticas y bióticas del lugar donde se encuentran.

Cuando una planta se encuentra en condiciones diferentes de las óptimas para cumplir con sus funciones vitales, estaría sometida a estrés. Cada especie o variedad vegetal difiere en sus requerimientos óptimos. Además, de acuerdo con su etapa de desarrollo, puede ser más susceptible a un determinado estrés (Hsiao, 1973; Levitt, 1980). Los tipos de estrés conocidos en plantas son de tipo biótico (relacionados con organismos vivos) y abiótico (relacionados con el entorno). En el segundo grupo encontramos el estrés por temperaturas (altas o bajas), disponibilidad hídrica (déficit o anegamiento), radiación, presencia de metales pesados, estrés oxidativo, salinidad y nutrientes

(deficiencia o exceso). En general, los diferentes tipos de estrés generan en la planta una cascada de reacciones que causan cambios a nivel morfológico, fisiológico, bioquímico y molecular.

Uno de los tipos de estrés abiótico que más afectan el crecimiento y desarrollo de las plantas es la disponibilidad de agua, bien sea por déficit o por exceso. El efecto del estrés por déficit hídrico es el más común y el que genera mayor impacto en la agricultura. A nivel mundial, los principales factores por sequía, temperaturas altas y salinidad provocan las mayores reducciones en el rendimiento de los cultivos (Kosová et al., 2018). Cuando hay sequía, disminuye el potencial hídrico del suelo, lo que afecta la absorción de agua por parte de la raíz y genera diferentes efectos, como aumento de las especies reactivas de oxígeno, mientras que las tasas de fotosíntesis y transpiración disminuyen como resultado del cierre estomático, lo que resulta en un bajo contenido relativo de agua en las hojas (*rwc*, sigla de *relative water content*). Además, la sequía influye en la fotosíntesis, lo que reduce la asimilación del dióxido de carbono en la hoja, los contenidos de clorofila y carotenoides, y los pigmentos accesorios. Todos estos efectos reducen el rendimiento y la producción en los cultivos (Jaleel et al., 2009; Sharma et al., 2019; Yang et al., 2020).

Para adaptarse a las condiciones adversas, las plantas han generado estrategias de supervivencia, como evitar el estrés, escape, tolerancia y recuperación (Fang & Xiong, 2015; Seleiman et al., 2021). Estos mecanismos varían entre las especies. La estrategia para evitar el estrés por escasa disponibilidad de agua se produce cuando las plantas consiguen mantener un balance hídrico, lo que aumenta su eficiencia en el uso del agua. Esto también se consigue mediante adaptaciones morfológicas, como la reducción de superficies foliares para disminuir la tasa de transpiración, y el aumento de la longitud o densidad de las raíces, para utilizar el agua disponible de manera más eficiente (Haddoudi et al., 2021). Los mecanismos de escape están asociados a un rápido desarrollo de la planta, para permitir la finalización del ciclo vital completo antes de un evento de estrés. Por su parte, la tolerancia es el resultado de la coordinación de cambios fisiológicos y bioquímicos a nivel celular y molecular, pues las plantas tolerantes son capaces de compensar la disminución de la turgencia mediante el ajuste osmótico, o la producción de metabolitos que pueden ayudarles a reparar el daño. Indirectamente, se induce la expresión de genes para la síntesis de prolina, azúcares solubles, acuaporinas y proteínas quinasas —como, por ejemplo, CDPK, MAPK HD-*zip*/bZIP, AP2/ERF, NAC, MYB y WRKY—, entre otros (Ilyas et al., 2021; Yang et al., 2021).

Respuestas en el balance hídrico

Las plantas pueden generar diferentes tipos de respuesta a los cambios en la disponibilidad hídrica para mantener el balance o estatus hídrico. Entre ellos se encuentran variar la superficie foliar, para disminuir la transpiración; cerrar estomas, para controlar la pérdida de agua; modificar la conductividad hidráulica en diferentes partes de la planta, para minimizar embolias, y adaptar el sistema radicular, para mejorar la captación de agua. Cuando las plantas están sometidas a déficit hídrico, disminuyen las tasas de fotosíntesis y transpiración, como resultado del cierre estomático, lo que se traduce en un bajo contenido relativo de agua (RWC) (Yang et al., 2020).

La mayor parte de las gramíneas forrajeras tropicales muestra respuestas a la sequía de tipo evasivo, así como tolerancia (Baruch & Fisher, 1991; Fisher & Ludlow, 1984; Guenni et al., 2007). Las primeras incluyen cambios morfológicos que incrementan el acceso a la humedad del suelo y minimizan las pérdidas de agua por transpiración, por lo que la eficiencia de uso de agua (WUE, sigla de *water use efficiency*) aumenta. Las respuestas de tolerancia permiten el mantenimiento de la turgencia celular, aun a potenciales hídricos foliares bajos. Como consecuencia, las plantas mantienen, durante la sequía, una actividad fotosintética reducida, pero capaz de soportar el crecimiento por un tiempo mayor (Guenni et al., 2004).

Por ejemplo, en avena (*Avena sativa*), los efectos más notorios frente a la baja disponibilidad de agua en el suelo se observan en el crecimiento y vigorosidad de las plantas, en las que hay baja turgencia en las hojas, relacionada con un bajo RWC; disminución en la acumulación de biomasa seca, y afección en el desarrollo de anteras y en el llenado del grano (Canales et al., 2021; Sadras et al., 2017; Sadras & Calderini, 2021; Sánchez-Martín et al., 2015). No obstante, algunos genotipos de avena han presentado cierta resistencia al estrés, por medio de un mejor control estomático; mayor producción de biomasa; estrategias de acumulación de agua; regulación de la producción de ácido abscísico (ABA), para mantener la transpiración, y una alta conductancia hidráulica radicular (Canales et al., 2021; Gong et al., 2022; Sánchez-Martín et al., 2015).

Por otra parte, en comunidades forrajeras de *Lolium perenne*, *Dactylis glomerata*, *Poa pratensis*, *Phleum pratense* y *Trifolium repens*, Vitra et al. (2019) observaron un aumento en la pérdida de conductividad hidráulica en las plantas en la medida que aumentaba el déficit hídrico, lo que se traduce en una limitación del transporte de agua a lo largo del xilema y en disminución en la producción de biomasa aérea. En especies del género *Brachiaria*, se han evidenciado estrategias de evasión por su alta sensibilidad estomática, ya que

realizan cierre estomático temprano, como consecuencia de una rápida reducción del RWC foliar (Guenni et al., 2006). De igual modo, dos variedades de *Brachiaria* disminuyeron el potencial hídrico foliar y el RWC bajo estrés por déficit hídrico (Rocha et al., 2021).

Asimismo, Wang et al. (2018) reportaron, en plantas de sorgo, la disminución de la conductancia estomática y de la transpiración, pero también el aumento de wUE . En las especies de leguminosas *Trifolium repens*, *Medicago lupulina* y *Lotus corniculatus*, Komainda et al. (2019) identificaron un alto control estomático y un aumento en la wUE intrínseca bajo estrés en las plantas, el cual está relacionado con una mayor cantidad de carbono fijado por mol de agua. En trébol blanco (*T. repens*), Norton & Morgan (2020) observaron variación intraespecífica en el potencial hídrico, potencial osmótico y RWC de las plantas, como respuesta al déficit de agua. Igualmente, Kirigwi et al. (2022) evidenciaron variación intraespecífica en el RWC y potencial hídrico en 1.000 genotipos de pasto *Festuca arundinacea*.

Respuestas en la fotosíntesis

La fotosíntesis es el proceso fisiológico a partir del cual las plantas usan la energía lumínica para oxidar el agua (H_2O), liberando oxígeno (O_2), y reducir el dióxido de carbono (CO_2), para formar largos compuestos de carbono, principalmente azúcares (Taiz et al., 2015a). Es así como la fotosíntesis está compuesta de dos reacciones globales diferenciadas: en la primera se da la transducción de la energía lumínica a química, y en la segunda se realiza la reducción y fijación del carbono (Solarte et al., 2010; Taiz et al., 2015b).

En la primera reacción global, la luz es absorbida por las moléculas de clorofila de la hoja con el fin de desencadenar reacciones de oxidorreducción a lo largo de una serie de moléculas que actúan como donadores y aceptores de electrones, para destinar la energía en la reducción de $NADP^+$ a $NADPH$, en la oxidación de H_2O a O_2 , y en la generación de un gradiente protónico para la síntesis de ATP (Stirbet y Govindjee, 2011). A través de la primera reacción global, la energía lumínica puede tomar tres destinos, que compiten entre sí: i) puede ser utilizada para el proceso fotosintético, por medio de reacciones fotoquímicas, ii) puede ser disipada en forma de calor o iii) puede ser reemitida en una longitud de onda diferente como fluorescencia (Maxwell & Johnson, 2000; Strasser et al., 2000).

A causa de ello, con la cuantificación de la fluorescencia de la clorofila se pueden obtener múltiples parámetros asociados a la primera reacción global de la fotosíntesis, como, por ejemplo, la eficiencia fotoquímica del fotosistema II

($PSII$) (F_v/F_m), el decaimiento no fotoquímico (NPQ) y la tasa del transporte de electrones (ETR) (Maxwell & Johnson, 2000), que constituyen una herramienta no invasiva o destructiva, sensible y útil, para evaluar el desempeño fotoquímico frente a múltiples tipos de estrés biótico y abiótico, y que funge como indicador de la estructura y funcionamiento de la fotoquímica de la planta (González Moreno et al., 2008; Maxwell & Johnson, 2000; Stirbet & Govindjee, 2011; Strasser et al., 2000).

Bajo estrés por déficit hídrico —por ejemplo, en especies forrajeras leguminosas del género *Trifolium*—, se ha observado un mejor desempeño fotoquímico en comparación con especies de pastos de los géneros *Avena*, *Lolium* y *Triticosecale* (Leitão et al., 2021). Mouradi et al. (2022) reportaron disminución del F_v/F_m y de la tasa de transporte de electrones (ETR, por su sigla en inglés) en genotipos de alfalfa (*Medicago sativa*). Contrario a esto, Fariaszewska et al. (2020) no evidenciaron disminución significativa del F_v/F_m después de dos semanas de estrés en variedades de pastos de los géneros *Festuca*, *Lolium* y *Festulolium*. Resultados similares reportaron Perera et al. (2019) en los pastos forrajeros *Lolium perenne*, *Dactylis glomerata*, *Festuca arundinacea* y *Cichorium intybus*, sometidos a déficit hídrico moderado a corto plazo. Sin embargo, al combinar el estrés hídrico con el estrés por alta temperatura, sí se observaron disminuciones del F_v/F_m en todas las especies. Por otro lado, las especies promisorias para la alimentación de ganado *Raphanus sativus* y *Crambe abyssinica*, que son tolerantes a la sequía, no demostraron cambios en los parámetros F_v/F_m , NPQ, rendimiento cuántico efectivo de $PSII$ ($\Delta F/F_m$), ni en la ETR (Moura et al., 2018). Así pues, no evidenciar cambios en el F_v/F_m tras someter las plantas a déficit hídrico da indicio de tolerancia en el modelo vegetal utilizado a dicho estrés, y puede estar relacionado con la activación de mecanismos antioxidantes y de fotoprotección, que permiten mantener en óptimas condiciones el $PSII$, y los procesos y biomoléculas asociados al transporte de electrones en la primera reacción global de la fotosíntesis (Mouradi et al., 2022).

En relación con la segunda reacción global de la fotosíntesis, que sucede en el estroma del cloroplasto, consiste en reacciones cíclicas para la fijación del carbono (ciclo de Calvin-ruta C_3), con tres etapas: carboxilación, reducción y regeneración, mediadas principalmente por la enzima ribulosa-1,5-bisfosfato carboxilasa/oxigenasa (RuBisCO). Este proceso de fotosíntesis puede ser alterado por la fijación de O_2 , que también realiza la RuBisCO (fotorrespiración), por lo que algunas plantas han desarrollado mecanismos metabólicos que mitigan el impacto que genera la fotorrespiración, por medio de la fijación de carbono C_4 , metabolismo del ácido de las crasuláceas (CAM), o de bombas de CO_2 en la membrana plasmática (Solarte et al., 2010; Taiz et al., 2015a).

Bajo condiciones de estrés hídrico, la asimilación de CO_2 está determinada por la apertura y el cierre estomático, pues, en la medida que las células empiezan a perder turgencia, las plantas reaccionan por medio del cierre de estomas para disminuir la transpiración, y de esta manera evitar la pérdida de agua, lo que ocasiona una disminución del CO_2 y, por consiguiente, de su suministro en los sitios de carboxilación dentro de la hoja (Cousins et al., 2020; Fariaszewska et al., 2020). Por otra parte, cuando el estrés por déficit hídrico es excesivo, se da una reducción de la tasa fotosintética, asociada a limitaciones bioquímicas como consecuencia del daño en el sitio de carboxilación de la enzima RuBisCO o en la regeneración de la enzima ribulosa-1,5-bifosfato (RuBP) (Moura et al., 2018). El proceso de fotorrespiración que se da por estrés hídrico es uno de los principales factores que ocasionan la acumulación de especies reactivas de oxígeno (ROS), lo que genera estrés oxidativo en la planta (Hussain et al., 2019).

En condiciones de déficit hídrico, en genotipos de sorgo, por ejemplo, se ha observado que hay una disminución de la tasa fotosintética neta (A), de la conductancia estomática (g_s) y de la tasa de transpiración (E), sin embargo, en algunos genotipos las concentraciones internas de CO_2 aumentaron (Shehab et al., 2020). De igual manera, la disminución de A , g_s y de la tasa máxima de carboxilación de la enzima RuBisCO (V_{cmax}) se evidenció en el pasto Guinea (*Panicum maximum*), lo cual tuvo implicaciones en la calidad nutricional del forraje (Habermann et al., 2019). Igualmente, Fariaszewska et al. (2020) reportaron una disminución en la asimilación de CO_2 , y en la transpiración en variedades de pastos de los géneros *Festuca*, *Lolium* y *Festulolium*. Sin embargo, en el wUE se observó un aumento, lo que posiblemente estuvo relacionado con el cierre estomático realizado por las plantas y con la correlación inversa del wUE con la transpiración (Fariaszewska et al., 2020).

Efectos similares se han reportado en otras especies forrajeras, como la avena (*Avena sativa*), donde la intensidad del estrés por déficit hídrico puede variar según el estado fenológico de la planta. Por ejemplo, Zhao et al. (2021) sometieron dos genotipos de avena (Shadow y Bia), en tres estadios de desarrollo (crecimiento GS40, formación de espiga GS55 y floración GS65), a estrés por déficit hídrico durante 15 días, y determinaron que en los estadios de producción, específicamente, GS55 para Shadow y GS65 para Bia, son más sensibles a este tipo de estrés, lo que muestra reducción en la economía de la hoja (menor fotosíntesis neta y área foliar), bajas tasas de g_s y reducción en la producción de grano.

Contrario a esto, en *Raphanus sativus* y *Crambe abyssinica*, no se observaron cambios en la tasa fotosintética neta, en la tasa de transpiración, ni en la

relación de la concentración interna y externa del CO_2 (C_i/C_a), lo que evidenció la tolerancia de ambas especies al déficit hídrico (Moura et al., 2018). Por otra parte, Leitão et al. (2021) observaron que, para mitigar los efectos de la sequía, las especies de leguminosas forrajeras poseen estrategias diferentes a aquellas de las especies de pastos, pues las leguminosas del género *Trifolium* obtuvieron mayores tasas de asimilación de CO_2 , fotosíntesis neta y wUE , en comparación con especies de la familia *Poaceae* bajo condiciones de irrigación y déficit hídrico.

Respuestas bioquímicas

El estrés por déficit hídrico induce la generación de ROS, como los radicales superóxido (O_2^-), hidroxilo (OH^\cdot) y alcoxi (RO^\cdot), y peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y oxígeno singlete (O_2), que son moléculas de moderada a elevada reactividad y que, en grandes cantidades, pueden reaccionar con biomoléculas de la célula (ácidos nucleicos, proteínas, carbohidratos, lípidos y enzimas), lo que genera interrupciones en la homeostasis celular y desencadena efectos sobre el crecimiento y el desarrollo (Hussain et al., 2019; Moreno et al., 2010; Yadav et al., 2021). Por consiguiente, la planta realiza cambios bioquímicos para desencadenar respuestas relacionadas con el ajuste osmótico y la desintoxicación de ROS, por medio de la acumulación de biomoléculas que no interfieren con los procesos metabólicos de la planta y que permiten realizar un ajuste para aliviar los efectos deletéreos que genera el estrés. De esta manera, puede acumular proteínas protectoras, como las proteínas de choque térmico (HSP, sigla de *heat shock proteins*), las proteínas de la embriogénesis tardía (LEA, de *late embryogenesis abundant*) y enzimas antioxidantes. También puede acumular osmolitos, como prolina, trealosa, glicina y azúcares, y hormonas como el ácido abscísico, etileno y metil jasmonatos (Kumar et al., 2018).

Dentro de estas diferentes biomoléculas, se destaca el papel que desempeñan los osmolitos, ya que cumplen la función de proteger la planta del daño oxidativo, generar balance osmótico, estabilizar las membranas y mantener la estructura de múltiples enzimas y proteínas (Zia et al., 2021). Por ejemplo, los azúcares median el desarrollo y crecimiento de la planta, y son sustratos para procesos de protección contra el estrés hídrico, lo que permite la estabilización de la membrana celular y el mantenimiento de la turgencia, de la homeóstasis y de la estructura celular (Kacienė et al., 2021). De esta manera, para el mantenimiento de la estructura celular los azúcares interactúan con la membrana y con las proteínas por medio de enlaces de hidrógeno que forman con sus grupos hidroxilos, así, los azúcares mantienen las interacciones hidrofílicas y pueden estabilizar y evitar la desnaturalización de las biomoléculas (Ayub et

al., 2021). La prolina juega un papel multifuncional metabólico en la planta, pues se ha observado que contribuye a la adaptación al estrés —por medio de la osmorregulación en la célula—, a la protección del aparato fotosintético, a la detoxificación de ROS —a través de enzimas antioxidantes—, a la estabilización del balance redox y a la disposición de carbono y nitrógeno en la rehidratación celular (Moreno et al., 2010; Pouris et al., 2022).

De igual modo, los metabolitos secundarios desempeñan múltiples funciones en la respuesta de la planta al estrés, pues están involucrados en funciones de señalización, comunicación, regulación de actividad enzimática, y defensa biótica y abiótica (Taiz et al., 2015c; Yadav et al., 2021). Específicamente, en la respuesta a la sequía se ha observado que los compuestos fenólicos inducen el sistema antioxidante a disminuir el daño ocasionado por los ROS, reducen la peroxidación de la membrana lipídica, modulan la pared celular e inducen el ciclo de Krebs y la glicólisis, para modular la síntesis de energía y de prolina, y, de esta manera, inducir procesos osmorreguladores en la planta (Yadav et al., 2021).

Bajo condiciones de déficit hídrico, por ejemplo, en variedades de pastos de los géneros *Festuca*, *Lolium* y *Festulolium*, se observó aumento en la concentración de prolina, de flavonoides y de contenido de ácidos fenólicos (Fariaszewska et al., 2020). De igual manera, en variedades de sorgo se evidenció el incremento de prolina, de proteína y de azúcares solubles en la etapa previa a la polinización, que corresponde a un estado susceptible fenológico del sorgo (Sarshad et al., 2021). Lo mismo ocurre en genotipos tolerantes de maíz, en los que hay una mayor concentración de prolina, azúcares totales y aminoácidos en genotipos susceptibles, en comparación con genotipos tolerantes (Ayub et al., 2021). Resultados similares del aumento de prolina, de azúcares totales, de proteína, de compuestos fenólicos, de ácido ascórbico y de glicina betaína reportaron Ghafar et al. (2021) en los pastos forrajeros *Cenchrus ciliaris* y *Cyperus arenarius*. Cabe resaltar que el ácido ascórbico funciona como un antioxidante no enzimático para la detoxificación de ROS y que la glicina betaína es un osmolito que actúa en la primera línea de defensa contra el estrés hídrico, ya que mantiene la turgencia celular y protege la célula contra el estrés oxidativo (Ghafar et al., 2021). En consecuencia, los osmolitos desempeñan un papel importante en la estabilización de biomoléculas y en la osmorregulación celular, como parte de la respuesta tolerante al estrés hídrico.

De igual modo, para evitar el daño oxidativo generado por el déficit hídrico, las plantas han desarrollado un sistema de defensa antioxidante que neutraliza la acumulación de ROS y mantiene un adecuado balance redox en la célula

(Mouradi et al., 2022). Dentro de este sistema antioxidante, se encuentran enzimas como la superóxido dismutasa (SOD), que cataliza el O_2^- en H_2O_2 ; la catalasa (CAT), que cataliza H_2O_2 en H_2O (agua) y O_2 (oxígeno molecular); y las peroxidasas (POD), que reducen el H_2O_2 (Hussain et al., 2019; Moreno et al., 2010). También están las enzimas del ciclo de la glutatión-ascorbato o ciclo de Halliwell-Asada, como la ascorbato peroxidasa (APX), la dehidroascorbato reductasa (DHAR), la monodeshidroascorbato reductasa (MDAR) y la glutatión reductasa (GR), que se encargan de detoxificar el H_2O_2 (Avashthi et al., 2018; Hussain et al., 2019), y moléculas no enzimáticas, como ascorbato, glutatión, carotenoides, flavonoides y prolina, como se mencionó anteriormente.

Para ejemplificar el déficit hídrico en genotipos tolerantes de sorgo, algunas ROS aumentan —como el O_2^- , H_2O_2 , malondialdehído (MDA)—, y también lo hacen las concentraciones de enzimas antioxidantes, como POD, SOD, CAT y APX (Shehab et al., 2020). Igualmente, la canola (*Brassica napus*), utilizada como especie forrajera, responde a este estrés por medio del incremento de carotenoides, flavonoides, y de las enzimas SOD y CAT, sin evidenciar cambios de las enzimas del ciclo glutatión-ascorbato (Kacienė et al., 2021). De manera similar, las especies de pastos *Cenchrus ciliaris* y *Cyperus arenarius* aumentaron el contenido de CAT, SOD y POD (Ghafar et al., 2021). Contrario a esto, en la leguminosa forrajera *Stylosanthes capitata*, no se evidenciaron cambios en la concentración de CAT, SOD ni en GR, enzimas cuantificadas a las 6:00 a. m., después de 46 días de déficit hídrico combinado con altas temperaturas. De esta forma, al no haber cambios enzimáticos antioxidantes, se generó un aumento de MDA y H_2O_2 en la célula (Borjas-Ventura et al., 2020).

Respuestas moleculares

Como se observó anteriormente, los forrajes generan una respuesta al déficit hídrico a nivel fisiológico y bioquímico, según la especie, su estado fenológico y la intensidad del estrés. De igual manera, a nivel molecular, se producen cambios relacionados con dichas respuestas, pues la activación o silenciamiento de genes es consecuencia de los diferentes estímulos del exterior. Para el caso de un estrés por déficit hídrico, la supervivencia de la planta dependerá del tipo de genes que se activen y del momento en el que se realice. A nivel general, bajo este tipo de estrés, se activan rutas de señalización relacionadas con el transporte de agua, el recambio de proteínas, la desintoxicación de ROS, la síntesis de osmolitos y la acumulación de fitohormonas, así como otros señalizadores, como Ca^{+} y proteínas quinzas, y regulación de la transcripción de ADN (Chaves et al., 2003; Trejo-Calzada & O'Connell, 2005).

Uno de los principales señalizadores bajo este tipo de estrés es el ABA. La acumulación de esta fitohormona activa diferentes estrategias —como el cierre de estomas—, aumenta la longitud de las raíces, inhibe la expansión foliar e induce la expresión de genes relacionados al estrés (Seki et al., 2007; Zia et al., 2021). Estos genes pueden ser activados por dos rutas: ABA dependiente y ABA independiente (Fang & Xiong, 2015; Shinozaki et al., 2003).

Bajo la primera ruta, se encuentran genes involucrados en la biosíntesis de ABA con genes que codifican las proteínas 9-cis epoxicarotenoide dioxigenasa (NCED); el cierre de estomas por los genes ABF3 o AREB2/AREB4, RD22 y RD29B, CDPK10 y la proteína SnRK2; y regulación osmótica por los genes AtMYC2 y AtMYB2, que codifican las proteínas MYC y MYB, respectivamente (Fang & Xiong, 2015; Shinozaki et al., 2003). Bajo la segunda ruta, se encuentran los factores de transcripción activados por etileno (ERF, sigla de *ethylene response transcription factor*), los cuales pueden silenciar o activar genes; el factor de transcripción SHN, que activa la biosíntesis de cera para protección de las hojas en *Arabidopsis*; los genes de respuesta a la deshidratación, como el DREB2 y el CBF/DREB1, involucrados en la respuesta osmótica; y los genes de respuesta temprana a la deshidratación (ERD1), también activados en procesos de senescencia (Chaves et al., 2003; Fang & Xiong, 2015; Shinozaki et al., 2003).

Otras fitohormonas involucradas en la respuesta al déficit hídrico son el ácido salicílico (SA), las auxinas (IAA), el ácido giberélico y las citoquininas (CTK), las cuales regulan el crecimiento de la planta y su senescencia, principalmente a nivel radicular (Zia et al., 2021). Por otro lado, también hay cambios en la fluidez de los lípidos de membrana, que funcionan como sensores de estrés osmótico y cambian la disposición de los canales de iones y de agua, esto mediado por las fosfolipasas C y D y la fosfatidil-4,5-fosfato-5-kinasa (PIP5) (Chaves et al., 2003).

Por ejemplo, en *Avena sativa* sometida a estrés por déficit hídrico, se ha observado que, a nivel transcripcional, hay un aumento en la expresión de genes relacionados a la producción de osmolitos y de enzimas antioxidantes (Alyammahi & Gururani, 2020; Gong et al., 2022; Zhang & Unver, 2018). Gong et al. (2022) reportan que la expresión génica involucrada en la respuesta al estrés es mucho mayor en genotipos tolerantes, en comparación con genotipos susceptibles, como, por ejemplo, la expresión de factores de transcripción de las rutas de señalización MAPK, involucradas en la regulación de la actividad antioxidante; proteínas de la familia BURP, involucradas en el crecimiento y la respuesta a estrés; y genes como SnRK2 (proteína-quinasa relacionada con la no fermentación de la sacarosa 1), regulados por la acumulación de ABA y la activación de las rutas de señalización por las

fitohormonas auxinas (IAA), citoquininas y brasinoesteroides (BR). Resultados similares presentaron Ma et al. (2021) para genotipos de alfalfa resistentes al estrés hídrico.

En otros forrajes, como la alfalfa (*M. sativa*), se han encontrado genes clave en la respuesta a estrés por déficit hídrico, como los factores de transcripción de la familia WRKY, específicamente el gen *MsWRKY11*, involucrado en la acumulación de lignina en el tallo, en la reducción de la densidad estomática y en mejorar el WUE (Wen et al., 2021); y el gen *MsDIUP1* (*Medicago sativa* Drought-Induced Unknown Protein 1), el cual, al ser sobreexpresado en plántulas de alfalfa, reduce la acumulación de MDA y aumenta la concentración de prolina y azúcares totales (Luo et al., 2022).

De manera similar, en el pasto *Psammochloa villosa*, se reporta que bajo un estrés hídrico fuerte hay una mayor expresión diferencial de genes, representada por mayor expresión de señalizadores MAPK (PP2C, CTR1 y EBF1), factores de transcripción (de la superfamilia MYB y las familias AP2/ERF, NAC, C2C2 y WRKY) e interacciones entre proteínas involucradas en el metabolismo de la prolina, como el gen P5CS (Pirrolina-5-carboxilato sintasa) (Liu et al., 2022).

El conocimiento en este campo de la ciencia sigue abierto a investigaciones y desarrollos, muy importantes en el mejoramiento genético de especies de interés agronómico y en el manejo de cultivos frente a las nuevas condiciones generadas por el cambio climático.

Estrategias para la mitigación del estrés por déficit hídrico en forrajes

La mitigación del estrés por déficit hídrico en los cultivos ha abarcado múltiples métodos y tecnologías de manera interdisciplinaria, reuniendo aspectos de la hidrometeorología, en términos de monitoreo y predicción de sequías, para una mejor proyección del manejo agronómico (Sawada et al., 2020), y de la agronomía, por medio del manejo del suelo, de prácticas culturales, irrigación y selección de cultivos más apropiados, incluido el uso de tecnologías genéticas y moleculares para obtención de cultivos genéticamente tolerantes a la sequía (Lamaoui et al., 2018). En el presente apartado, se hablará de algunas de estas estrategias de mitigación del déficit hídrico, aplicadas a cultivos de especies forrajeras.

En primer lugar, se ha observado que la aplicación exógena de fertilizantes, compuestos osmoprotectantes —como la prolina— y compuestos

inorgánicos —como el silicato de sodio—, tiene efectos en las plantas que coinciden con una mejora de la respuesta frente al estrés por déficit hídrico en diferentes modelos vegetales. Por ejemplo, en avena (*Avena sativa*), la aplicación de fertilizantes foliares con sílice demostró una mejora en la tasa fotosintética, uso eficiente del agua, conductancia estomática y contenido de clorofila en plantas sometidas a estrés por sequía (Kutasy et al., 2022). En maíz (*Zea mays*), esta aplicación mostró efectos similares, además de disminuir la densidad estomática y aumentar el área de los vasos del nervio medio y el contenido de iones K^+ y Ca^+ de la hoja (Bijanazadeh et al., 2022). De igual manera, Ghafoor et al. (2019) reportaron que la aplicación foliar de prolina en plantas de avena sometidas a estrés hídrico causa un aumento en la prolina foliar, actividad antioxidante (SOD y POD) y crecimiento de la planta, además de aumentar el grosor de las raíces, lo que permite tolerar el estrés inducido.

La aplicación en el suelo de polímeros superabsorbentes (SAP, sigla de *super absorbent polymers*), sintéticos o naturales, ha sido también utilizada para la mitigación del estrés hídrico en los cultivos, pues estos polímeros tienen la capacidad de aumentar el agua disponible para la planta, reducir la densidad aparente del suelo y mejorar las condiciones para la absorción de nutrientes por parte de la planta (Ostrand et al., 2020). Por ejemplo, en avena, el uso de SAP aumentó la biomasa y redujo el estrés oxidativo (Islam et al., 2011). De igual manera, en plantas de maíz se observó que el uso de estos polímeros aumentó la biomasa seca y la altura (Abdallah et al., 2021). Resultados similares reportaron Yaseen et al. (2020), en maíz; Abrisham et al. (2018), en la planta forrajera *Seidlitzia rosmarinus*, utilizada para restauración de suelos áridos; y Keshavarz & Farahbakhsh (2012), en mijo (*Pennisetum americanum*). Lo anterior evidencia el potencial uso de los SPA para mitigar el efecto deletéreo del estrés por déficit hídrico en cultivos de forrajes.

Asimismo, la aplicación de bacterias promotoras de crecimiento vegetal (PGPB, sigla de *plant growth promoting bacteria*) ha sido utilizada para mejorar la respuesta de diferentes cultivos frente al estrés hídrico, por medio de mecanismos directos e indirectos, que involucran la facilitación de la toma de nutrientes, como el nitrógeno y el fósforo; de producción de sustancias estimuladoras, como el ácido abscísico o el ácido indolacético; de modulación de hormonas vegetales, por medio de la enzima 1-aminociclopropano-1-carboxilato (ACC) desaminasa; y de la producción de biopelículas sobre el tejido radicular de la planta (Oleńska et al., 2020; Pardo-Díaz et al., 2021).

Por ejemplo, Cortés-Patiño et al. (2021) evidenciaron un efecto positivo en la altura, la biomasa y el contenido hídrico relativo en plantas de Ryegrass sometidas a déficit hídrico tras la aplicación de consorcios bacterianos

endófitos de los géneros *Azospirillum*, *Herbaspirillum* y *Pseudomonas*. Este efecto positivo puede estar relacionado con la capacidad que poseen estas bacterias para producir compuestos indólicos y exopolisacáridos, que reducen las concentraciones de etileno en la planta e inducen tolerancia sistémica. Moreno-Galván et al. (2020) observaron que la aplicación de PGPB en pasto Guinea (*Megathyrsus maximus*) modula la respuesta antioxidante en la planta, por medio de la disminución del contenido de la enzima GR y de la prolina. Por el contrario, Mendoza-Labrador et al. (2021) evidenciaron el aumento de prolina y de la enzima APX como parte de la tolerancia inducida por la coinoculación de *Bacillus* sp. en microesferas de alginato en pasto Guinea, bajo déficit hídrico. Asimismo, en pasto Buffel (*Cenchrus ciliaris*), en variedades de *Brachiaria* y en sorgo, se ha observado el aumento de la tolerancia a la sequía con el uso de PGPB (Antunes et al., 2019; Domingues Barreiros et al., 2020; Santana et al., 2020).

Además de la aplicación de diferentes sustancias y bioproductos para mejorar la respuesta de la planta al estrés por déficit hídrico, se encuentran los procesos de mejoramiento genético de cultivos, en los que se han implementado múltiples técnicas novedosas que han permitido superar los largos tiempos que involucran los procesos tradicionales de selección fenotípica (Kumar et al., 2018; Lamaoui et al., 2018). Entre estos procesos está el uso de la tecnología del ADN recombinante, que permite la modulación génica de regiones de interés del genoma para aumentar la tolerancia al estrés. Por ejemplo, en alfalfa, la sobreexpresión del gen GDP-manosa 3,5-epimerasa induce un aumento en la producción de ascorbato, lo cual mejora su respuesta frente al estrés hídrico (Lei et al., 2017). Por otra parte, Uga et al. (2013) aumentaron la respuesta de evasión de la sequía en arroz, por medio de la modificación de la arquitectura del sistema radicular de esta especie, como resultado de la clonación del gen DR+O1 (Deeper Rooting 1), y la caracterización de su función de elongación celular en la punta de la raíz, encargada del crecimiento asimétrico y de la flexión hacia abajo de la raíz como respuesta al gravitropismo.

De igual forma, la manipulación del transcrito del ARN mensajero por medio del control de micro-ARN (miRs) es una herramienta que permite modificar la expresión génica de manera diferencial para la regulación de procesos metabólicos esenciales a nivel postranscripcional en las plantas, y de esta manera modular su respuesta a un estrés (Djami-Tchatchou et al., 2017). Wang et al. (2021) evidenciaron el incremento en la tolerancia de la alfalfa al estrés hídrico, por medio de la sobreexpresión de genes asociados al precursor MicroRNA156 (miR156). Resultados similares reportaron Arshad et al. (2017) en alfalfa, con la sobreexpresión de miR156, que regula negativamente los genes SPL, involucrados en el desarrollo de la raíz y en la modulación de la

acumulación de metabolitos secundarios, contribuyendo al aumento de la tolerancia de la planta. Por otra parte, Hamza et al. (2016) identificaron perfiles de expresión de micro-ARN en 11 genotipos de Sorgo (*Sorghum bicolor*), asociados a la respuesta de estrés por sequía, mientras que Zhu et al. (2021) identificaron la vía regulatoria de micro-RNAs asociada a la respuesta a sequía en plantas de arveja (*Vicia sativa*).

Referencias

- AbdAllah, A. M., Mashaheet, A. M., & Burkey, K. O. (2021). Super absorbent polymers mitigate drought stress in corn (*Zea mays* L.) grown under rainfed conditions. *Agricultural Water Management*, 254 (106946), 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106946>
- Abrisham, E. S., Jafari, M., Tavili, A., Rabii, A., Zare Chahoki, M. A., Zare, S., Egan, T., Yazdanshenas, H., Ghasemian, D., & Tahmoures, M. (2018). Effects of a super absorbent polymer on soil properties and plant growth for use in land reclamation. *Arid Land Research and Management*, 32(4), 407-420. <https://doi.org/10.1080/15324982.2018.1506526>
- Alyammahi, O., & Gururani, M. A. (2020). Chlorophyll-a fluorescence analysis reveals differential response of photosynthetic machinery in melatonin-treated oat plants exposed to osmotic stress. *Agronomy*, 10(10), 1520. <https://doi.org/10.3390/agronomy10101520>
- Antunes, G. D. R., Santana, S. R. A., Escobar, I. E. C., Brasil, M. D. S., Araújo, G. G. L. de, Voltolini, T. V., & Fernandes-Júnior, P. I. (2019). Associative diazotrophic bacteria from forage grasses in the Brazilian semi-arid region are effective plant growth promoters. *Crop and Pasture Science*, 70(10), 899-907. <https://doi.org/10.1071/CP19076>
- Arshad, M., Feyissa, B. A., Amyot, L., Aung, B., & Hannoufa, A. (2017). MicroRNA156 improves drought stress tolerance in alfalfa (*Medicago sativa*) by silencing SPL13. *Plant Science*, 258, 122-136. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2017.01.018>
- Arteaga Álvarez, S. R. (2009). *Elaboración de un bloque multinutricional a partir de los subproductos generados por la industria panelera, destinado para la alimentación de ganado bovino productor de carne, en el municipio de Sandona - Nariño*. Universidad de Nariño.
- Avashthi, H., Pathak, R. K., Pandey, N., Arora, S., Mishra, A. K., Gupta, V. K., Ramteke, P. W., & Kumar, A. (2018). Transcriptome-wide identification of genes involved in ascorbate-glutathione cycle (Halliwell-Asada pathway) and related pathway for elucidating its role in antioxidative potential in finger millet (*Eleusine coracana* (L.)). *3 Biotech*, 8(12), 1-18. <https://doi.org/10.1007/s13205-018-1511-9>
- Ayub, M., Ashraf, M. Y., Kausar, A., Saleem, S., Anwar, S., Altay, V., & Ozturk, M. (2021). Growth and physio-biochemical responses of maize (*Zea mays* L.) to drought and heat stresses. *Plant Biosystems*, 155(3), 535-542. <https://doi.org/10.1080/11263504.2020.1762785>
- Baruch Z, Fisher M (1991) Factores climáticos y de competencia que afectan el desarrollo de la planta en el establecimiento de una pastura. En C. Lascano, & J. Spain (Eds.), *Establecimiento y renovación de pasturas* (pp. 103-142). CIAT.

- Betancourt, J. E., Cuastumal, H. B., Rodríguez, S. P., Navia, J. F., & Insuasty, E. G. (2012). Alimentación de vacas Holstein con suplemento de papa de desperdicio (*Solanum tuberosum*) y acacia negra (*Acacia decurrens*), y su efecto en la calidad de leche. *Revista Investigación Pecuaria*, 1(2), 41-51.
- Bijanzadeh, E., Barati, V., & Egan, T. P. (2022). Foliar application of sodium silicate mitigates drought stressed leaf structure in corn (*Zea mays* L.). *South African Journal of Botany*, 147, 8-17. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2021.12.032>
- Borjas-Ventura, R., Ferraudo, A. S., Martínez, C. A., & Gratão, P. L. (2020). Global warming: antioxidant responses to deal with drought and elevated temperature in *Stylosanthes capitata*, a forage legume. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 206(1), 13-27. <https://doi.org/10.1111/jac.12367>
- Canales, F. J., Risipail, N., García-Tejera, O., Arbona, V., Pérez-de-Luque, A., & Prats, E. (2021). Drought resistance in oat involves ABA-mediated modulation of transpiration and root hydraulic conductivity. *Environmental and Experimental Botany*, 182(1), 102233. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2020.104333>
- Chaves, M. M., Maroco, J. P., & Pereira, J. S. (2003). Understanding plant responses to drought - from genes to the whole plant. *Functional Plant Biology*, 30(3), 239-264. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32689007/>
- Cortés-Patiño, S., Vargas, C., Álvarez-Flórez, F., Bonilla, R., & Estrada-Bonilla, G. (2021). Potential of *Herbaspirillum* and *Azospirillum* consortium to promote growth of perennial ryegrass under water deficit. *Microorganisms*, 9(1), 1-16. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9010091>
- Cousins, A. B., Mullendore, D. L., & Sonawane, B. V. (2020). Recent developments in mesophyll conductance in C3, C4, and crassulacean acid metabolism plants. *Plant Journal*, 101(4), 816-830. <https://doi.org/10.1111/tpj.14664>
- Djami-Tchatchou, A. T., Sanan-Mishra, N., Ntushelo, K., & Dubery, I. A. (2017). Functional roles of microRNAs in agronomically important plants-potential as targets for crop improvement and protection. *Frontiers in Plant Science*, 8(378). <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00378>
- Domingues Barreiros, A. R., Cecato, U., Domingues Duarte, C. F., Hungria, M., Biserra, T. T., Rodrigues da Silva, D., Mamédio, D., Sanches, R., & Fernandes, H. J. (2020). Forage mass, tillering, nutritive value and root system of ruzigrass inoculated with plant growth promoting bacteria associated with doses of N-fertilizer. *International Journal for Innovation Education and Research*, 8(10), 41-55. <https://doi.org/10.31686/ijer.vol8.iss10.2634>
- Fang, Y., & Xiong, L. (2015a). General mechanisms of drought response and their application in drought resistance improvement in plants. *Cellular and Molecular Life Sciences*, 72(4), 673-689. <https://doi.org/10.1007/s00018-014-1767-0>
- Fariaszewska, A., Aper, J., Van Huylenbroeck, J., De Swaef, T., Baert, J., & Pecio. (2020). Physiological and biochemical responses of forage grass varieties to mild drought stress under field conditions. *International Journal of Plant Production*, 14(2), 335-353. <https://doi.org/10.1007/s42106-020-00088-3>
- Fisher M. J., Ludlow, M. M. (1984). Adaptation to water deficits in *Stylosanthes*. En H. M. Stace, & L. A. Edey (Eds.), *The biology and agronomy of Stylosanthes* (pp. 163-179). Academic Press.

- Flórez-Delgado, D. F., & Gómez-Parada, B. J. (2016). Estimation of costs of production of terneras in breeding phase in hacienda Aposentos, municipality of Chinacota, North of Santander. *Revista Facultad Ciencias Agropecuarias*, 8(2), 88-90. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8628203>
- Ghafar, M. A., Akram, N. A., Saleem, M. H., Wang, J., Wijaya, L., & Alyemeni, M. N. (2021). Ecotypic morphological and physio-biochemical responses of two differentially adapted forage grasses, *Cenchrus ciliaris* L. and *Cyperus arenarius* Retz. to drought stress. *Sustainability*, 13(14), 8069. <https://doi.org/10.3390/su13148069>
- Ghafoor, R., Akram, N. A., Rashid, M., Ashraf, M., Iqbal, M., & Lixin, Z. (2019). Exogenously applied proline induced changes in key anatomical features and physio-biochemical attributes in water stressed oat (*Avena sativa* L.) plants. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 25(5), 1121-1135. <https://doi.org/10.1007/s12298-019-00683-3>
- Gong, W., Ju, Z., Chai, J., Zhou, X., Lin, D., Su, W., & Zhao, G. (2022). Physiological and transcription analyses reveal the regulatory mechanism in oat (*Avena sativa*) seedlings with different drought resistance under peg-induced drought stress. *Agronomy*, 12(5), 1005. <https://doi.org/10.3390/agronomy12051005>
- González Moreno, S., Perales, H., & Salcedo, M. (2008). La fluorescencia de la clorofila como herramienta en la investigación de efectos tóxicos en el aparato fotosintético de plantas y algas. *Revista de Educación Bioquímica*, 27(4), 119-129.
- Guenni, O., Baruch, Z., & Marín, D. (2004). Responses to drought of five *Brachiaria* species. II. Water relations and leaf gas exchange. *Plant and Soil*, 258(1), 249-260.
- Guenni, O., Gil, J. L., Baruch, Z., Márquez, L., & Núñez, C. (2006). Respuestas al déficit hídrico en especies forrajeras de *Brachiaria* (Trin.) Griseb. (Poaceae). *Interciencia*, 31(7), 505-511.
- Guenni, O., Gil, J., Baruch, Z., Rodríguez, I., & Tam, J. (2007). Relaciones hídricas e intercambio gaseoso en una colección de leguminosas forrajeras cultivadas en las sabanas orientales de Venezuela. *Revista de la Facultad de Agronomía y Veterinaria*, 24(1), 348-354.
- Guerrero, A., & Londoño Martínez, M. A. (2014). *Análisis del cambio climático y el ambiente en las cuencas lecheras del valle de Ubaté-Chiquinquirá y del Caquetá cómo herramienta para el fortalecimiento de la política pública del sector lechero colombiano*. Asistencia Técnica - Programa de Apoyo Presupuestario al Sector Lácteo en Colombia en desarrollo del programa DCI-ALA/2011/22872.
- Habermann, E., Dias de Oliveira, E. A., Contin, D. R., Delvecchio, G., Viciado, D. O., De Moraes, M. A., De Mello Prado, R., De Pinho Costa, K. A., Braga, M. R., & Martínez, C. A. (2019). Warming and water deficit impact leaf photosynthesis and decrease forage quality and digestibility of a C4 tropical grass. *Physiologia Plantarum*, 165(2), 383-402. <https://doi.org/10.1111/ppl.12891>
- Haddoudi, L., Hdira, S., Hanana, M., Romero, I., Haddoudi, I., Mahjoub, A., Jouira, H. ben, Djébali, N., Ludidi, N., Sanchez-Ballesta, M. T., Abdelly, C., & Badri, M. (2021). Evaluation of the morpho-physiological, biochemical and molecular responses of contrasting *Medicago truncatula* lines under water deficit stress. *Plants*, 10(10), 2114. <https://doi.org/10.3390/plants10102114>

- Hamza, N. B., Sharma, N., Tripathi, A., & Sanan-Mishra, N. (2016). MicroRNA expression profiles in response to drought stress in *Sorghum bicolor*. *Gene Expression Patterns*, 20(2), 88-98. <https://doi.org/10.1016/j.gep.2016.01.001>
- Hsiao, T. C. (1973). *Plant responses to water stress*. *Annual Review of Plant Physiology*, 24(1), 519-570. <https://doi.org/10.1146/annurev.pp.24.060173.002511>
- Hussain, S., Rao, M. J., Anjum, M. A., Ejaz, S., Zakir, I., Ali, M. A., Ahmad, N., & Ahmad, S. (2019). Oxidative stress and antioxidant defense in plants under drought conditions. En M. Hasanuzzaman, K. Hakeem, K. Nahar, & H. F. Alharby (Eds.), *Plant abiotic stress tolerance: agronomic, molecular and biotechnological approaches* (pp. 207-219). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-06118-0_9
- Ilyas, M., Nisar, M., Khan, N., Hazrat, A., Khan, A. H., Hayat, K., Fahad, S., Khan, A., & Ullah, A. (2021). Drought tolerance strategies in plants: a mechanistic approach. *Journal of Plant Growth Regulation*, 40(3), 926-944. <https://doi.org/10.1007/s00344-020-10174-5>
- Islam, M. R., Eneji, A. E., Ren, C., Li, J., & Hu, Y. (2011). Impact of water-saving superabsorbent polymer on oat (*Avena* spp.) yield and quality in an arid sandy soil. *Scientific Research and Essays*, 6(4), 720-728.
- Jaleel, C. A., Manivannan, P., Wahid, A., Farooq, M., Somasundaram, R., & Panneerselvam, R. (2009). Drought stress in plants: a review on morphological characteristics and pigments composition. *International Journal of Agriculture & Biology*, 11(1), 100-105.
- Kacienė, G., Miškelytė, D., Dikšaitytė, A., Januškaitienė, I., Sujetovienė, G., Žaltauskaitė, J., Praspaliauskas, M., & Juknys, R. (2021). A manifold response of forage rape to combined heat wave and drought under current and elevated CO₂. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 207(5), 873-883. <https://doi.org/10.1111/jac.12535>
- Keshavarz, L., & Farahbakhsh, H. (2012). Effect of superabsorbent on physio-morphological traits and forage yield of millet (*Pennisetum americanum* L.) under different irrigation treatments. *International Journal of Plan, Animal and Environmental Sciences*, 2(3), 149-156.
- Kirigwi, F. M., Saha, M. C., & Wang, Z. (2022). Screening of tall fescue genotypes for relative water content and osmotic potential under drought stress. *Grassland Research*, 1(2), 84-93. <https://doi.org/10.1002/blr2.12021>
- Komainda, M., Küchenmeister, K., Küchenmeister, F., Breitsameter, L., Wrage-Mönnig, N., Kayser, M., & Isselstein, J. (2019). Forage legumes for future dry climates: lower relative biomass losses of minor forage legumes compared to *Trifolium repens* under conditions of periodic drought stress. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 205(5), 460-469. <https://doi.org/10.1111/jac.12337>
- Kosová, K., Vítámvás, P., Urban, M. O., Prášil, I. T., & Renaut, J. (2018). Plant abiotic stress proteomics: the major factors determining alterations in cellular proteome. *Frontiers in Plant Science*, 9, 122. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00122>
- Kumar, S., Sachdeva, S., Bhat, K. v., & Vats, S. (2018). Plant responses to drought stress: physiological, biochemical and molecular basis. En S. Vats (Ed.), *Biotic and abiotic stress tolerance in plants* (pp. 1-25). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-9029-5_1

- Kutasy, E., Buday-Bódi, E., Virág, I. C., Forgács, F., Melash, A. A., Zsombik, L., Nagy, A., & Csajbók, J. (2022). Mitigating the negative effect of drought stress in oat (*Avena sativa* L.) with silicon and sulphur foliar fertilization. *Plants*, *11*(1). <https://doi.org/10.3390/plants11010030>
- Lamaoui, M., Jemo, M., Datla, R., & Bekkaoui, F. (2018). Heat and drought stresses in crops and approaches for their mitigation. *Frontiers in Chemistry*, *6*, 26. <https://doi.org/10.3389/fchem.2018.00026>
- Lei, Y., Hannoufa, A., & Yu, P. (2017). The use of gene modification and advanced molecular structure analyses towards improving alfalfa forage. *International Journal of Molecular Sciences*, *18*(2), 298. <https://doi.org/10.3390/ijms18020298>
- Leitão, S. T., Alves, M. L., Pereira, P., Zerrouk, A., Godinho, B., Barradas, A., & Patto, M. C. V. (2021). Towards a trait-based approach to potentiate yield under drought in legume-rich annual forage mixtures. *Plants*, *10*, 1763. <https://doi.org/10.3390/plants10091763>
- Levitt J. (1980). *Responses of plants to environmental stress: Water, radiation, salt and other stress*. Academic Press.
- Liu, T., Liu, Y., Fu, G., Chen, J., Lv, T., Su, D., Wang, Y., Hu, X., Su, X., & Harris, A. J. (2022). Identification of genes involved in drought tolerance in seedlings of the desert grass, *Psammochloa villosa* (Poaceae), based on full-length isoform sequencing and de novo assembly from short reads. *Journal of Plant Physiology*, *271*, 153630. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2022.153630>
- Luo, D., Zhang, X., Liu, J., Wu, Y., Zhou, Q., Fang, L., & Liu, Z. (2022). Drought-induced unknown protein 1 positively modulates drought tolerance in cultivated alfalfa (*Medicago sativa* L.). *The Crop Journal*. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2022.05.013>
- Ma, Q., Xu, X., Wang, W., Zhao, L., Ma, D., & Xie, Y. (2021). Comparative analysis of alfalfa (*Medicago sativa* L.) seedling transcriptomes reveals genotype-specific drought tolerance mechanisms. *Plant Physiology and Biochemistry*, *166*, 203-214. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.05.008>
- Marín, A., Baldissera, T., Pinto, C., Garagorry, F., Zubieta, A., Giraldo, L., Chirinda, N., Arango, J., & Carvalho, P. (2017). *Una innovación en el manejo del pastoreo como estrategia para mejorar la producción animal y reducir las emisiones de GEI*. [Info note, CGIAR]. Research Program on Climate Change Agriculture and Food Security. <https://cgspace.cgiar.org/handle/10568/89804?show=full>
- Maxwell, K., & Johnson, G. N. (2000). Chlorophyll fluorescence-a practical guide. *Journal of Experimental Botany*, *51*(345), 659-668.
- Mccarthy, B., Pierce, K. M., Delaby, L., Brennan, A., Fleming, C., & Horan, B. (2013). The effect of stocking rate and calving date on grass production, utilization and nutritive value of the sward during the grazing season. *Grass and Forage Science*, *68*(3), 364-377. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2494.2012.00904.x>
- Mendoza-Labrador, J., Romero-Perdomo, F., Abril, J., Hernández, J. P., Uribe-Vélez, D., & Buitrago, R. B. (2021). Bacillus strains immobilized in alginate macrobeads enhance drought stress adaptation of Guinea grass. *Rhizosphere*, *19*, 100385. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2021.100385>
- Mojica, J. E., Castro, E., León, J., Cárdenas, E. A., Pabón, M. L., & Carulla, J. E. (2009). Efecto de la oferta de pasto Kikuyo (*Pennisetum clandestinum*) sobre la producción y calidad composicional

de la leche bovina. *Livestock Research for Rural Development*, 21(1), 1-12. <http://www.lrrd.org/lrrd21/1/moj21001.htm>

Moreno, L., Crespo, S. C., Pérez, W., & Melgarejo, L. M. (2010). Pruebas bioquímicas como herramientas para estudios en fisiología. En L. M. Melgarejo (Ed.), *Experimentos en fisiología vegetal* (pp. 187-248). Universidad Nacional de Colombia.

Moreno-Galván, A. E., Cortés-Patiño, S., Romero-Perdomo, F., Uribe-Vélez, D., Bashan, Y., & Bonilla, R. R. (2020). Proline accumulation and glutathione reductase activity induced by drought-tolerant rhizobacteria as potential mechanisms to alleviate drought stress in Guinea grass. *Applied Soil Ecology*, 147, 103367. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.103367>

Moura, L. M. de F., Costa, A. C., Müller, C., Filho, R. de O. S., Almeida, G. M., Vital, R. G., de Castro, J. N., & Teixeira, M. B. (2018). Drought tolerance in potential oilseed plants for biofuel production. *Australian Journal of Crop Science*, 12(2), 289-298. <https://doi.org/10.21475/ajcs.18.12.02.pne836>

Mouradi, M., Farissi, M., Lahrizi, Y., Oukaltouma, K., Saaidi, A., Khadraji, A., Bouzigaren, A., & Ghoulam, C. (2022). Water deficit effects on canopy light interception, chlorophyll fluorescence, and stomatal conductance in Moroccan alfalfa genotypes. *Plant Physiology Reports*, 27(3), 420-480. <https://doi.org/10.1007/s40502-022-00668-7>

Nieto-Sierra, D. F., Lagos-Burbano, E., Avellaneda-Avellaneda, Y., & Castro-Rincón, E. (2020). Productivity of dairy cows supplemented with silage of fava bean or fodder beet. *Agronomy Mesosamerican*, 31(2), 341-351. <https://doi.org/10.15517/am.v31i2.37806>

Norton, M. R., & Morgan, J. M. (2020). Intraspecific variation for osmotic adjustment in white clover (*Trifolium repens*). *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 65(4-5), 302-308. <https://doi.org/10.1080/00288233.2020.1791913>

Oleńska, E., Matek, W., Wójcik, M., Swiecicka, I., Thijs, S., & Vangronsveld, J. (2020). Beneficial features of plant growth-promoting rhizobacteria for improving plant growth and health in challenging conditions: a methodical review. *Science of the Total Environment*, 743, 140682. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140682>

Ostrand, M. S., DeSutter, T. M., Daigh, A. L. M., Limb, R. F., & Steele, D. D. (2020). Superabsorbent polymer characteristics, properties, and applications. *Agrosystems, Geosciences and Environment*, 3(1), 1-14. <https://doi.org/10.1002/agg2.20074>

Pardo-Díaz, S., Romero-Perdomo, F., Mendoza-Labrador, J., Delgadillo-Duran, D., Castro-Rincón, E., Silva, A. M. M., Rojas-Tapias, D. F., Cardoso, E. J. B. N., & Estrada-Bonilla, G. A. (2021). Endophytic PCPB improves plant growth and quality, and modulates the bacterial community of an intercropping system. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 1-10. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.715270>

Perera, R. S., Cullen, B. R., & Eckard, R. J. (2019). Growth and physiological responses of temperate pasture species to consecutive heat and drought stresses. *Plants*, 8(7), 1-23. <https://doi.org/10.3390/plants8070227>

Pouris, J., Levizou, E., Karatassiou, M., Meletiou-Christou, M. S., & Rhizopoulou, S. (2022). The influence of the partitioning of sugars, starch, and free proline in various organs of *Cyclamen graecum* on the biology of the species and its resistance to abiotic stressors. *Plants*, 11(9), 1254. <https://doi.org/10.3390/plants11091254>

- Restrepo Arias, C. (2016). *Evaluación de diversas estrategias nutricionales para mitigar las emisiones de metano en ganadería de leche especializada* [Tesis de maestría, Universidad de Antioquia].
- Rocha, J. R., De Mello Prado, R., Teixeira, G. C. M., & De Oliveira Filho, A. S. B. (2021). Si fertigation attenuates water stress in forages by modifying carbon stoichiometry, favouring physiological aspects. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 207(4), 631-643. <https://doi.org/10.1111/jac.12479>
- Sadras, V. O., & Calderini, D. F. (Eds.). (2021). *Crop physiology case histories for major crops*. Elsevier.
- Sadras, V. O., Mahadevan, M., & Zwer, P. K. (2017). Oat phenotypes for drought adaptation and yield potential. *Field Crops Research*, 212(1), 135-144. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.07.014>
- Sánchez-Martín, J., Heald, J., Kingston-Smith, A., Winters, A., Rubiales, D., Sanz, M., Mur, L. A. J., & Prats, E. (2015). A metabolomic study in oats (*Avena sativa*) highlights a drought tolerance mechanism based upon salicylate signalling pathways and the modulation of carbon, antioxidant and photo-oxidative metabolism. *Plant Cell and Environment*, 38(7), 1434-1452. <https://doi.org/10.1111/pce.12501>
- Santana, S. R. A., Voltolini, T. V., Antunes, G. dos R., Da Silva, V. M., Simões, W. L., Morgante, C. V., De Freitas, A. D. S., Chaves, A. R. de M., Aidar, S. de T., & Fernandes-Júnior, P. I. (2020). Inoculation of plant growth-promoting bacteria attenuates the negative effects of drought on sorghum. *Archives of Microbiology*, 202(5), 1015-1024. <https://doi.org/10.1007/s00203-020-01810-5>
- Sarshad, A., Talei, D., Torabi, M., Rafiei, F., & Nejatkhah, P. (2021). Morphological and biochemical responses of *Sorghum bicolor* (L.) Moench under drought stress. *SN Applied Sciences*, 3(1), 81. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03977-4>
- Sawada, Y., Koike, T., Ikoma, E., & Kitsuregawa, M. (2020). Monitoring and predicting agricultural droughts for a water-limited subcontinental region by integrating a land surface model and microwave remote sensing. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 58(1), 14-33. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2019.2927342>
- Seki, M., Umezawa, T., Urano, K., & Shinozaki, K. (2007). Regulatory metabolic networks in drought stress responses. *Current Opinion in Plant Biology*, 10(3), 296-302. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2007.04.014>
- Seleiman, M. F., Al-Suhaibani, N., Ali, N., Akmal, M., Alotaibi, M., Refay, Y., Dindaroglu, T., Haleem Abdul-Wajid, H., & Leonardo Battaglia, M. (2021). Drought stress impacts on plants and different approaches to alleviate its adverse effects. *Plants*, 10(2), 259. <https://doi.org/10.3390/plants>
- Sharma, A., Shahzad, B., Kumar, V., Kohli, S. K., Sidhu, G. P. S., Bali, A. S., Handa, N., Kapoor, D., Bhardwaj, R., & Zheng, B. (2019). Phytohormones regulate accumulation of osmolytes under abiotic stress. *Biomolecules*, 9(7), 285. <https://doi.org/10.3390/biom9070285>
- Shehab, A. A., Yao, L., Wei, L., Wang, D., Li, Y., Zhang, X., & Guo, Y. (2020). The increased hydrocyanic acid in drought-stressed sorghums could be alleviated by plant growth regulators. *Crop and Pasture Science*, 71(5), 459-468. <https://doi.org/10.1071/CP20057>
- Shinozaki, K., Yamaguchi-Shinozaki, K., & Seki, M. (2003). Regulatory network of gene expression in the drought and cold stress responses. *Current Opinion in Plant Biology*, 6(5), 410-417. [https://doi.org/10.1016/S1369-5266\(03\)00092-X](https://doi.org/10.1016/S1369-5266(03)00092-X)

- Solarte, M. E., Moreno, L., & Melgarejo, L. M. (2010). Fotosíntesis y pigmentos vegetales. En L. M. Melgarejo (Ed.), *Experimentos en fisiología vegetal* (Vol. 1) (pp. 107-122). Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/11144/Experimentos%20en%20Fisiología%20Vegetal%209789587196689.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Stirbet, A., & Govindjee. (2011). On the relation between the Kautsky effect (chlorophyll a fluorescence induction) and photosystem. II: Basics and applications of the OJIP fluorescence transient. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 104(1-2), 236-257. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2010.12.010>
- Strasser, R. J., Srivastava, A., & Tsimilli-Michael, M. (2000). The fluorescence transient as a tool to characterize and screen photosynthetic samples. En M. Yunus, U. Pathre, & P. Mohanty (Eds.), *Probing photosynthesis: Mechanism, regulation & adaptation* (pp. 443-480). Routledge.
- Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. (2015a). Photosynthesis: carbon reactions. En L. Taiz, E. Zeiger, I. M. Møller, & A. Murphy (Eds.), *Plant physiology and development* (6a ed.) (pp. 145-170). Sinauer Associates Incorporated.
- Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. (2015b). Photosynthesis: the light reactions. En L. Taiz, E. Zeiger, I. M. Møller, & A. Murphy (Eds.), *Plant physiology and development* (Vol. 1) (6a ed.) (pp. 111-143). Sinauer Associates Incorporated.
- Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. (2015c). Secondary metabolites and plant defense. En L. Taiz, E. Zeiger, I. M. Møller, & A. Murphy (Eds.), *Plant physiology and development* (6a ed.) (Vol. 6) (pp. 283-308). Sinauer Associates Incorporated.
- Tapasco, J., Martínez, J., Calderón, S., Romero, G., Ordóñez, D. A., Álvarez, A., Sánchez-Aragón, L., & Ludeña, C. E. (2015). *Impactos económicos del cambio climático en Colombia: sector ganadero*. Cepal; DNP.
- Trejo-Calzada, R., & O'Connell, M. A. (2005). Genetic diversity of drought-responsive genes in populations of the desert forage *Dactylis glomerata*. *Plant Science*, 168(5), 1327-1335. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2005.01.010>
- Uga, Y., Sugimoto, K., Ogawa, S., Rane, J., Ishitani, M., Hara, N., Kitomi, Y., Inukai, Y., Ono, K., Kanno, N., Inoue, H., Takehisa, H., Motoyama, R., Nagamura, Y., Wu, J., Matsumoto, T., Takai, T., Okuno, K., & Yano, M. (2013). Control of root system architecture by deeper rooting 1 increases rice yield under drought conditions. *Nature Genetics*, 45(9), 1097-1102. <https://doi.org/10.1038/ng.2725>
- Vanegas Moreno, L. A. (2015). *Dinámica de crecimiento y criterios de pastoreo para optimizar el uso de praderas 'Brachiaria brizantha' cv. toledo*. Universidad de La Salle.
- Vitra, A., Deleglise, C., Meisser, M., Risch, A. C., Signarbieux, C., Lamacque, L., Delson, S., Buttler, A., & Mariotte, P. (2019). Responses of plant leaf economic and hydraulic traits mediate the effects of early- and late-season drought on grassland productivity. *AoB Plants*, 11(3), 1-15. <https://doi.org/10.1093/aobpla/plz023>
- Wang, A., Lam, S. K., Hao, X., Li, F. Y., Zong, Y., Wang, H., & Li, P. (2018). Elevated CO₂ reduces the adverse effects of drought stress on a high-yielding soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) cultivar by increasing water use efficiency. *Plant Physiology and Biochemistry*, 132, 660-665. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.10.016>

- Wang, K., Liu, Y., Teng, F., Cen, H., Yan, J., Lin, S., Li, D., & Zhang, W. (2021). Heterogeneous expression of Osa-MIR156bc increases abiotic stress resistance and forage quality of alfalfa. *Crop Journal*, 9(5), 1135-1144. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2020.11.009>
- Wen, W., Wang, R., Su, L., Lv, A., Zhou, P., & An, Y. (2021). MsWRKY11, activated by MsWRKY22, functions in drought tolerance and modulates lignin biosynthesis in alfalfa (*Medicago sativa* L.). *Environmental and Experimental Botany*, 184, 104373. <https://doi.org/10.1016/j.envepbot.2021.104373>
- Yadav, B., Jogawat, A., Rahman, M. S., & Narayan, O. P. (2021). Secondary metabolites in the drought stress tolerance of crop plants: a review. *Gene Reports*, 23, 101040. <https://doi.org/10.1016/j.genrep.2021.101040>
- Yang, M. H., Jahufer, M. Z. Z., He, J., Dong, R., Hofmann, R., Siddique, K. H. M., & Li, F. M. (2020). Effect of traditional soybean breeding on water use strategy in arid and semi-arid areas. *European Journal of Agronomy*, 120, 126128. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126128>
- Yang, X., Lu, M., Wang, Y., Wang, Y., Liu, Z., & Chen, S. (2021). Response mechanism of plants to drought stress. *Horticulturae*, 7(3). <https://doi.org/10.3390/horticulturae7030050>
- Yaseen, R., Hegab, R., Kenaway, M., & Eissa, D. (2020). Effect of super absorbent polymer and bio fertilization on Maize productivity and soil fertility under drought stress conditions. *Egyptian Journal of Soil Science*, 0(0), 0-0. <https://doi.org/10.21608/ejss.2020.35386.1372>
- Zhang, B., & Unver, T. (2018). A critical and speculative review on microRNA technology in crop improvement: current challenges and future directions. *Plant Science*, 274(1), 193-200. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2018.05.031>
- Zhao, B., Ma, B. L., Hu, Y., & Liu, J. (2021). Source-sink adjustment: a mechanistic understanding of the timing and severity of drought stress on photosynthesis and grain yields of two contrasting oat (*Avena sativa* L.) genotypes. *Journal of Plant Growth Regulation*, 40(1), 263-276. <https://doi.org/10.1007/s00344-020-10093-5>
- Zhu, Y., Liu, Q., Xu, W., Yao, L., Wang, X., Wang, H., Xu, Y., Li, L., Duan, C., Yi, Z., & Lin, C. (2021). Identification of novel drought-responsive miRNA regulatory network of drought stress response in common vetch (*Vicia sativa*). *Open Life Sciences*, 16(1), 1111-1121. <https://doi.org/10.1515/biol-2021-0109>
- Zia, R., Nawaz, M. S., Siddique, M. J., Hakim, S., & Imran, A. (2021). Plant survival under drought stress: implications, adaptive responses, and integrated rhizosphere management strategy for stress mitigation. *Microbiological Research*, 242, 126626. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2020.126626>



Capítulo XI

212

Bacterias endófitas de plantas: establecimiento de la interacción

Valerin A. Aguirre-Franco
Juan S. Garcerá-Riaño
Jonathan A. Mendoza-Labrador
Paola J. Criollo-Campos
Sergio Pardo-Díaz
Daniel F. Rojas-Tapias

Introducción

Las bacterias endófitas de plantas son un grupo funcional bacteriano con la capacidad de invadir y residir en el tejido vegetal sin causar enfermedad aparente. Estas bacterias pueden tener efectos positivos sobre el crecimiento y desarrollo de las plantas. Adicionalmente, pueden reducir el efecto negativo de diversas condiciones ambientales, como la sequía o la salinidad. Las bacterias endófitas pueden modular el crecimiento de la planta mediante una mejora en su nutrición o mediante la regulación de fitohormonas asociadas a crecimiento o estrés. Asimismo, pueden proteger la planta de diversos estreses bióticos, mediante competencia directa con patógenos por nutrientes o por su inhibición mediante amensalismo.

La colonización bacteriana de las plantas involucra diversos procesos. Inicialmente, las bacterias que residen en el suelo deben ser capaces de detectar la presencia de la planta y migrar hacia ella. Para esto emplean sistemas acoplados de quimioatracción y motilidad, que les permiten percibir gradientes físicos o químicos, y acercarse físicamente a la raíz de la planta. Las plantas facilitan este proceso mediante la liberación de exudados radicales que actúan como nutrientes o de señales específicas que guían a las bacterias y, por tanto, median en la interacción. Una vez la cercanía es estrecha, las bacterias emplean mecanismos específicos o inespecíficos de adhesión que garantizan el establecimiento de comunidades microbianas sobre la superficie de las plantas y que, así, facilitan el proceso de invasión. La invasión se puede dar de manera activa, mediante el uso de enzimas de degradación de la pared celular de las plantas, como pectinasas y celulasas, o pasiva, mediante la penetración de lesiones, de aberturas asociadas al proceso de crecimiento, o de estructuras como las estomas. La interacción entre plantas y bacterias, no obstante, no será exitosa si las bacterias no logran evadir la respuesta inmune de la planta. Esta respuesta inmune puede ser activada por la presencia de patrones moleculares bacterianos, como el flagelo o el peptidoglicano, o por efectores secretados mediante estructuras macromoleculares tipo sistemas bacterianos de secreción. Las bacterias endófitas parecen evadir esos sistemas de defensa mediante la modificación química de estos patrones, la secreción de bajos niveles de enzimas hidrolíticas, y el mantenimiento de bajas densidades celulares.

La interacción entre rizobios y plantas leguminosas representa un arquetipo de esta relación, en la cual una serie orquestada de eventos entre la bacteria y la planta permite la formación de una estructura de simbiosis especializada, denominada nódulo. El endofitismo, no obstante, también es visto en otros grupos de microorganismos y especies vegetales. Algunas de estas interacciones

pueden ser negativas para la salud vegetal, como es el caso del patógeno *Ralstonia solanacearum*, que invade la planta y causa marchitez, debido al taponamiento de los haces vasculares (Low-Power et al., 2018). Mientras que en otros casos el efecto es positivo, como el de bacterias *Azospirillum brasilense*, las cuales ejercen un efecto positivo sobre el crecimiento de diferentes gramíneas, incluyendo trigo, maíz y cebada (Steenhoudt & Vanderleyden, 2000). En este capítulo, se hará una descripción de los pasos asociados al proceso de colonización microbiana de la raíz vegetal.

Motilidad bacteriana: desplazamiento espacial hacia la raíz

Las bacterias han desarrollado la habilidad para colonizar diversos hábitats, por ejemplo, las profundidades del mar, el intestino de los animales y las raíces de las plantas. La colonización de estos entornos y la interacción con otros organismos vivos han sido moldeadas en el transcurso de la evolución. En estos ambientes, las bacterias presentan ventajas competitivas que les permiten residir y proliferar. Diversos mecanismos asociados a la motilidad y a la percepción de gradientes químicos o físicos han facilitado la evolución de estos procesos (Dick, 2019). La habilidad para moverse y orientarse resulta ventajosa cuando los nutrientes son escasos, ya que les permite a las bacterias desplazarse hacia ambientes más copiotrofos. No obstante, los nutrientes no son la única señal que las bacterias pueden percibir, y otros tipos de señales químicas también pueden indicar la presencia de ambientes adecuados para la proliferación celular (Wadhams & Armitage, 2004). La capacidad de estos microbios de desplazarse de un lugar a otro se conoce como motilidad, y la capacidad para sensor y reconocer diversos ambientes es conocida como quimiotaxis. El acoplamiento de ambas funciones les permite a las bacterias dirigirse hacia zonas más ventajosas, explotar los recursos y aprovechar entornos disponibles.

Dado que los movimientos de las células pueden ser aleatorios, estos deben estar acoplados con la función de quimiotaxis, para garantizar que el desplazamiento se haga hacia ambientes ricos en nutrientes o lejos de ambientes hostiles. La alternancia de los movimientos rotacionales del flagelo depende de proteínas de quimiotaxis que se unen directamente a la máquina flagelar y reorientan su movimiento, un proceso que depende de la actividad de los quimiorreceptores celulares (Porter et al., 2011). La coordinación del movimiento flagelar por proteínas del sistema de quimiotaxis pone en evidencia la íntima relación entre ambas funciones. A medida que el gradiente se detecta, estos movimientos alternados y, de algún modo, aleatorios se hacen más cortos y

definidos (Raina et al., 2021). Los parámetros clave que definen el movimiento celular son la velocidad de desplazamiento, la consistencia de la velocidad, el ángulo de giro, la longitud del gradiente, el tamaño celular y la sensibilidad del receptor (Wadhwa & Berg, 2022). Estos parámetros, no obstante, son influenciados por las condiciones ambientales. Las raíces de las plantas, las cuales liberan diversas sustancias químicas, proporcionan uno de los ambientes que favorecen el movimiento y orientación de las bacterias, puesto que representan un ambiente rico en nutrientes y en señales específicas, que son activas en diversos grupos microbianos.

Las plantas forman gradientes de nutrientes y señales químicas que son mediados por la liberación de exudados de raíces y rizodepósitos. Estos compuestos pueden incluir azúcares, polisacáridos, aminoácidos, ácidos aromáticos, ácidos alifáticos, ácidos grasos, esteroides, fenoles, enzimas, proteínas, reguladores del crecimiento vegetal y metabolitos secundarios (Badri et al., 2009), y tienen el potencial de atraer quimiotácticamente diversas bacterias móviles. Un arquetipo de esta interacción está representado por leguminosas y rizobios, en los que la liberación de flavonoides vegetales y otros compuestos atrae el rizobio a la rizosfera y permite la formación del nódulo y el establecimiento de la simbiosis (Faure et al., 2009). Los exudados, por lo tanto, juegan un papel importante en la atracción de microorganismos del suelo hacia la planta, y en el establecimiento de diferentes relaciones ecológicas (Scharf et al., 2016). La quimioatracción, la motilidad bacteriana y la liberación de exudados radicales son, por lo tanto, piezas fundamentales que determinan la interacción entre la planta y su microbioma.

Tipos de motilidad

Las bacterias poseen diversas estrategias de motilidad, las cuales están influenciadas por el medio físico en el cual se da el movimiento: líquido o sólido (Henrichsen, 1972). *Swimming* es la estrategia de motilidad más conocida y estudiada. Se da en medio líquido, se asocia a células individuales, y tiene lugar gracias al movimiento rotatorio de los filamentos flagelares (Wadhwa & Berg, 2022). Este tipo de estrategia se presenta en varias bacterias gramnegativas, como *Azospirillum brasilense*, *Herbaspirillum seropedicae* y *Rhizobium leguminosarum*, y en bacterias grampositivas, como *Bacillus subtilis*. *Swarming* también depende del movimiento del flagelo, pero a diferencia de *swimming*, este se asocia al movimiento colectivo sobre una superficie. *Swarming* representa un modo de translocación sobre superficies que desempeña un papel importante en la colonización de ambientes naturales. Este tipo de movimiento se describió inicialmente en especies de *Proteus* (Méhes & Vicsek, 2014; Williams & Schwarzhoff, 1978). El crecimiento de las

bacterias sobre una superficie que estimula el proceso de *swarming* causa la diferenciación de las células. A diferencia de las células en medio líquido (*planktonic cells*), las células *swarmer* exhiben hiperflagelación y una mayor longitud (Darnton et al., 2010; Partridge & Harshey, 2013). Una célula *swarmer* generalmente no se mueve, a menos que la concentración de agar sea baja en el medio de cultivo o que este contenga surfactantes. En experimentos de laboratorio, se ha evidenciado que concentraciones bajas de agar favorecen que el fluido se mueva rápidamente a través de los poros. Los surfactantes, a su vez, reducen la tensión superficial, muchas bacterias lo producen y se les denomina biosurfactantes, lo cual permite la difusión de la película fluida delante de las células *swarmer* y facilita su movimiento (Yang et al., 2017). Notablemente, la asociación entre células facilita el proceso de motilidad, y de ahí que se refiera al *swarming* como un movimiento colectivo. Ese fenómeno se debe principalmente al efecto de la población sobre la retención de fluidos. El movimiento de *swarming* solo se da hacia adelante o hacia atrás (Turner et al., 2010).

A diferencia del *swimming* y el *swarming*, los otros tipos de motilidad en bacterias no dependen de la presencia de un flagelo (Wadhwa & Berg, 2022). *Twitching*, otro tipo de motilidad sobre superficies, está mediado por filamentos delgados de tipo pili tipo IV. El proceso se basa en la extensión activa y la retracción del pili, que genera movimiento (Maier & Wong, 2015). *Pseudomonas aeruginosa* y *Neisseria gonorrhoeae*, por ejemplo, poseen este tipo de movimiento colectivo. No obstante, estas especies difieren en la localización y distribución del pili: en *P. aeruginosa* se encuentra ubicado en los polos, mientras que en *N. gonorrhoeae* está distribuido de forma uniforme por toda la célula (Marathe et al., 2014). En bacterias del suelo, este tipo de fenómenos es vital para la interacción entre el suelo, la planta y los microorganismos. *Azoarcus* sp. BH72, una bacteria endófito de plantas, utiliza el pili tipo IV como el primer paso para la adhesión exitosa a las raíces de la planta huésped (Santoyo et al., 2021). Finalmente, otra estrategia de motilidad colectiva es el *gliding*, el cual se define como un movimiento celular suave, a través del eje ubicado a lo largo de la célula. Este movimiento se da sin la ayuda de pilis o flagelos (McBride, 2001). Este tipo de motilidad es posible debido a la presencia de adhesinas, las cuales se unen al sustrato y se mueven a lo largo de las células. Esta motilidad es típica de bacterias en el grupo de las mixobacterias, las cianobacterias y las flavobacterias.

El motor flagelar

En algunas bacterias gramnegativas, como *Escherichia coli* o *Salmonella enterica*, y en bacterias grampositivas, como *B. subtilis*, los filamentos flagelares están ubicados a lo largo de la célula (Turner & Berg, 2018). Este tipo de distribución de los flagelos se conoce como distribución peritrica. En otras bacterias, los flagelos se ubican en los extremos de la célula. Esta distribución de los flagelos se llama distribución polar. En el suelo, bacterias como *Sinorhizobium meliloti* poseen filamentos flagelares que les permiten cambiar de dirección y modular la velocidad de rotación para acercarse a las raíces de las plantas e iniciar el proceso de infección (Eggenhofer et al., 2006). *A. brasilense* posee dos conjuntos de sistemas flagelares: un flagelo polar y otros laterales, los cuales alterna dependiendo de la viscosidad del medio (Kanbe et al., 2007). Dentro del accionar del flagelo se encuentra el motor rotativo, el cual es un complejo de proteínas que se ensamblan en la pared celular, y esto le confiere una gran capacidad de regenerarse dinámicamente en respuesta a cambios en el ambiente.

El movimiento bacteriano se puede dar de manera enteramente aleatoria y solo depende del movimiento rotacional del flagelo. El flagelo es una máquina molecular de 50 nm de diámetro que está constituida por aproximadamente 20 diferentes subunidades (Chevance & Hughes, 2008). El movimiento rotacional es bidireccional y se da de manera alternada entre movimientos veloces y movimientos de reorientación. El movimiento rápido de una célula está determinado por movimientos en sentido antihorario del flagelo, y la reorientación, por movimiento de uno o varios flagelos en sentido horario (Wadhwa et al., 2019). La maquinaria flagelar está embebida en las membranas y en la pared celular, y protruye hacia el espacio extracelular; el flagelo también posee subunidades citoplasmáticas. La energía para el movimiento del flagelo es derivada de la fuerza protón motriz (Sowa & Berry, 2008; Wadhwa & Berg, 2022).

Quimiotaxis: respuesta a gradientes químicos

La quimiotaxis bacteriana se define como el movimiento direccionado hacia ambientes que contienen altas concentraciones de compuestos benéficos o hacia bajas concentraciones de compuestos tóxicos (Keegstra et al., 2022). Esta función tiene como propósito permitir la adaptación de las bacterias al ambiente natural, mediante el reconocimiento de diversas señales y una respuesta coordinada a estos cambios. Las bacterias son capaces de reconocer gradientes físicos y químicos, como, por ejemplo, concentraciones de nutrientes, toxinas, pH u oxígeno (Gurung et al., 2020). Aunque esta estrategia ha sido interpretada para la toma de nutrientes o energía, las bacterias también pueden ser atraídas hacia compuestos de bajo valor nutricional. Tal es el caso de *E. coli*, que se siente quimioatraída por aminoácidos de bajo valor nutricional, o de *B. subtilis*, que busca concentraciones altas de etanol, para encontrar microorganismos productores de etanol que usa como presa (Krell et al., 2011; Keegstra et al., 2022). Una explicación para este fenómeno es que el quimioatrayente actúa como una señal para colonizar territorios (Cremer et al., 2019), ubicar simbioses (Raina et al., 2019) o ubicar huéspedes (Matilla & Krell, 2018).

La transducción de las señales ambientales a la célula está mediada principalmente por sistemas de transducción de dos componentes. Este sistema binario está conformado por una proteína sensora o histidina-quinasa, la cual modula mediante fosforilación, y por la actividad de una proteína reguladora (Krell et al., 2011; Quax et al., 2018). Esta proteína reguladora, principalmente de unión a ADN, puede activar o reprimir la expresión génica. No obstante, en algunas ocasiones, la proteína reguladora también puede modular la función de otras proteínas o mediar alguna reacción química. Notablemente, en quimiotaxis las señales son primariamente detectadas por un grupo de proteínas sensoras, conocidas como proteínas de quimiotaxisceptoras de metilos, las cuales se acoplan con sistemas de dos componentes para modular la actividad del flagelo.

Relación entre quimiotaxis y motilidad

Los sistemas de quimiotaxis son generalmente sensibles y reconocen la presencia de concentraciones bajas de un compuesto químico. Adicionalmente, son sistemas robustos que pueden adaptar su respuesta a concentraciones que varían en diversos órdenes de magnitud. Las señales quimiotácticas son detectadas por quimiorreceptores transmembranales de tipo proteínas de quimiotaxisceptoras de metilos. En *E. coli*, la proteína aceptora de metilos percibe

la señal y la transduce a la histidina-quinasa CheA, mediante la actividad de CheW. La activación de CheA resulta en la activación, mediante fosforilación, de dos reguladores de la respuesta: CheY y CheB. CheY es una proteína de unión al motor flagelar, la cual, en su estado fosforilado (CheY-P), puede mediar la reversión en la dirección del flagelo; la actividad de CheY-P es, a su vez, regulada por la fosfatasa CheZ. CheB es una metilesterasa que controla la adaptación de las proteínasceptoras de metilos. El aumento en la concentración de atrayentes inhibe la autofosforilación de CheA, lo que reduce la concentración de CheY-P y, por lo tanto, reduce el cambio de dirección en la rotación del flagelo. Esto ocasiona un movimiento más direccional del microorganismo hacia la fuente del quimioatrayente (Wadhams y Armitage, 2004).

Importancia de la quimiotaxis en los ambientes naturales

La quimiotaxis permite guiar a las bacterias hacia diversos ambientes y, en consecuencia, desempeña un importante papel ecológico (Keestra et al., 2022). Uno de los ejemplos mejor descritos es la asociación simbiótica entre rizobios y leguminosas (Compton & Scharf, 2021). En el suelo, los exudados de las plantas, los cuales contienen una alta concentración de nutrientes, guían a los rizobios del suelo hacia la rizosfera para garantizar un contacto estrecho y el establecimiento de la simbiosis. *Sinorhizobium meliloti* RU11/001, por ejemplo, es fuertemente atraída hacia diversos aminoácidos, especialmente aspartato y leucina, mientras que *Bradyrhizobium japonicum* lo es hacia el glutamato, el malonato y el succinato (Compton & Scharf, 2021). En *Rhizobium leguminosarum* existe una fuerte atracción hacia varios compuestos fenólicos, en particular hacia la acetosiringona, la cual también es quimioatrayente en *Agrobacterium*.

Esta quimioatracción también facilita el proceso de patogénesis en otras especies bacterianas. En *Agrobacterium*, por ejemplo, la presencia de acetosiringona asegura su acercamiento a heridas en las plantas y activa los genes de virulencia, lo que potencialmente resulta en la formación de tumores (Xi et al., 2018). La acetosiringona es un compuesto fenólico producido como respuesta a lesiones en plantas (Xi et al., 2018; Stachel et al., 1985). Notablemente, la transferencia de T-DNA (DNA oncogénico) a las células vegetales resulta en la formación de tumores y en la producción de aminoácidos o derivados del azúcar, que sirven como fuente de nutrientes para las bacterias colonizadoras (Hasegawa et al., 2018). En *R. solanacearum*, una bacteria patógena de varios cultivos de interés agrícola, la quimioatracción se da hacia una amplia gama de aminoácidos, ácidos orgánicos y, especialmente, hacia exudados

radiculares secretados por las raíces de plantas de tomate (Hasegawa et al., 2018). Unos de los quimioatrayentes más importantes para *R. solanacearum* son el ácido 4-hidroxibenzoico y el ácido p-cumárico (Hasegawa et al., 2019).

Adherencia: formación de un contacto estrecho entre la bacteria y la planta

Durante la interacción entre plantas y bacterias, una vez las bacterias se acercan a la raíz atraídas por señales quimiotácticas, estas deben adherirse para facilitar el proceso de colonización. Dicha unión o anclaje se desarrolla sobre superficies bióticas y abióticas, y representa uno de los pilares de las interacciones biológicas (Moreira et al., 2004). En la rizosfera, la adherencia de las bacterias a las plantas desempeña un papel crucial para el establecimiento de diversas relaciones ecológicas, incluyendo relaciones simbióticas, como las de los rizobios y leguminosas, o antagónicas, como las que ocurren entre microorganismos fitopatógenos y diversas especies de plantas (Barea et al., 2005; Passari et al., 2015). La capacidad de las bacterias de adherirse a las raíces de las plantas permite desarrollar eventualmente comunidades, las cuales pueden producir metabolitos que afectan el crecimiento y el desarrollo de la planta. Esto significa que la interacción planta-bacterias, más que un diálogo unilateral, es un sistema de retroalimentación. Este sistema tiene el potencial de promover el crecimiento o activar mecanismos de defensa frente a patógenos o estreses ambientales.

La adhesión es la habilidad que permite a las bacterias crecer sobre una superficie; es la función que proporciona unión o anclaje a superficies abióticas y bióticas (Moreira et al., 2004). En tejidos de células vegetales o bacterianas, esta acción representa uno de los pilares de las interacciones biológicas, puesto que permite una relación entre las partes (Kandel et al., 2017). La formación de biopelículas, así como la presencia de lipopolisacáridos (LPS) y la producción de surfactinas, iturinas, fengicinas y lectinas, se consideran componentes cruciales de adhesión. Por ejemplo, la capacidad de formar biopelículas en *B. subtilis* y *Bacillus amyloliquefaciens* es crítica para la colonización de raíces de lechuga, remolacha azucarera y tomate (Aleti et al., 2016). Igualmente, la presencia de LPS es fundamental para la adhesión de *Pseudomonas aeruginosa* PAO1 a superficies hidrofílicas (Makin & Beveridge, 1996). *H. seropedicae* también necesita LPS para adherirse a la raíz del maíz (Hori & Matsumoto, 2010; Nevola et al., 1985).

Biopelículas

Las biopelículas son agregados de bacterias multicelulares revestidas por una matriz extracelular, arquitectónicamente compleja, producida por las mismas bacterias y formada por exopolisacáridos, proteínas y, ocasionalmente, ADN (Branda et al., 2005; Hall-Stoodley & Stoodley, 2009; Merritt et al., 2007). Las bacterias son capaces de unirse sobre cualquier superficie y allí formar una biopelícula, lo que incluye la raíz de las plantas. La formación de biopelícula en la raíz representa uno de los primeros y más importantes pasos de la interacción planta-bacteria. Un atributo general de las biopelículas es la presencia de una matriz que mantiene las células juntas. Esta matriz está típicamente formada por exopolisacáridos. En *B. subtilis*, por ejemplo, está formada por los polímeros EPS, poli-gama-glutamato (PGA) y por la proteína TasA (López et al., 2010), mientras que en *Gluconacetobacter xylinus* está formada por celulosa (Ross et al., 1991).

En la naturaleza, virtualmente todas las biopelículas están formadas por comunidades bacterianas complejas, y su estructura y su composición varían en consecuencia. Estudios de microscopía confocal de biopelículas en cámaras de flujo han revelado también la formación de estructuras tipo champiñón, separadas por canales llenos de agua. Las diferentes condiciones ambientales a las cuales las diferentes células dentro de una matriz son expuestas también ocasionan diferentes perfiles de expresión génica y, en consecuencia, diferentes funciones dentro de la comunidad. En este contexto, las bacterias se comportan más como entes multicelulares, con actividades diferenciadas, que como seres unicelulares que crecen en sincronía en condiciones de laboratorio (Branda et al., 2005; López et al., 2010).

La formación de biopelículas es determinante para la interacción con plantas, puesto que permite la adhesión de las bacterias a sus superficies. En *Gluconacetobacter diazotrophicus*, la producción de exopolisacáridos es requerida para la formación de biopelículas y para la colonización del tejido radicular del arroz. Asimismo, la producción de EPS es requerida por *Rhizobium leguminosarum* bv. *trifolii* para promover la colonización de raíces de trébol (Janczarek et al., 2015). *Pseudomonas putida* KT2440 secreta las proteínas de matriz LapA, que son esenciales en la adhesión irreversible a superficies bióticas y abióticas, y LapF, involucradas en las interacciones célula-célula, lo que las hace clave para la formación de microcolonias en una biopelícula madura (Gjermansen et al., 2010; Hinsa et al., 2003; Martínez-Gil et al., 2013).

Proteínas de adherencia

La mayoría de las bacterias comensales y patógenas interactúa con células del huésped (plantas, animales, etc.), mediante la acción de moléculas de adherencia. Estas moléculas se encuentran sobre las superficies de las células y promueven la interacción con receptores de la célula hospedera o con algunas macromoléculas. La adhesión microbiana a distintas superficies es primariamente mediada por los pilis, fimbrias y proteínas adhesivas monoméricas. No obstante, su función no es únicamente la adhesión, sino que también desempeñan un papel importante en diversas cascadas de señalización.

El pili es una macroestructura heteropolimérica compuesta de una subunidad mayor, la cual conforma el tallo del pili, y otras varias subunidades, que decoran la punta de este. En el extremo distal del pili se puede encontrar una proteína adhesina, la cual tiene un dominio asociado a su ensamblaje y el otro es de adhesión. En *E. coli* uropatogénica, por ejemplo, la presencia de las adhesinas FimH y PapG se asocia con patogenicidad, ya que le permiten unirse a la manosa y a la digalactosa en células del hospedero. Otras bacterias son capaces de expresar amiloides adhesivos o fimbrias agregativas delgadas. Estas fimbrias son particularmente pegajosas y no exhiben especificidad de unión. Otro tipo de moléculas de adhesión son las de la familia de adhesinas autotransportadoras triméricas, las cuales se caracterizan por la habilidad para formar trímeros sobre la superficie bacteriana, que median la adhesión a diversas superficies, incluyendo las células hospederas o las proteínas de la matriz extracelular. En *Rhizobium leguminosarum*, la proteína RapA1 modula la adherencia a la superficie de raíces de trébol rojo. Esta proteína pertenece al grupo de adhesinas RAP (*rhizobial adhesion proteins*), las cuales contienen un dominio RAP que se une a iones de Ca^{2+} y Mg^{2+} , para reconocer un polisacárido de la superficie bacteriana, lo que promueve la autoagregación (Mongiardini et al., 2008). Las proteínas similares al colágeno (CLP, por su sigla en inglés) también permiten la adhesión a diversas superficies, así como la formación de biopelículas. Las CLP se localizan en la membrana externa y contienen una secuencia única de aminoácidos que les confiere la capacidad de unirse a la galactosa. En *Bacillus amyloliquefaciens* FZB42, las CLP desempeñan un papel importante en la agregación y adhesión a superficies de materiales abióticos y a las raíces de *Arabidopsis thaliana* (Zhao et al., 2015).

Invasión de la endosfera: colonización del tejido vegetal

Las bacterias endófitas suelen utilizar las discontinuidades de la planta (p. ej., lenticelas, estomas, pelos radiculares) como sitio de entrada para la colonización. Si estas no son suficientes para un ingreso eficiente, algunas bacterias pueden alterar la pared celular de la planta al secretar enzimas hidrolíticas que promueven el ingreso y establecimiento dentro de los tejidos vegetales (Elbeltagy et al., 2000). Por ejemplo, *Pseudomonas syringae*, una bacteria gramnegativa, logra ingresar a la planta a través de las discontinuidades naturales o las lesiones causadas por la bacteria al producir proteínas activas de nucleación de hielo (Araujo et al., 2019). Estas proteínas dañan las células vegetales, lo que facilita el acceso al interior vegetal. En leguminosas, tales como alfalfa, soya y frijol, el mecanismo de invasión más frecuente y estudiado es el desarrollo de pelos radiculares e hilos de infección por rizobios (Sprent & James, 2007). No obstante, este mecanismo también depende de la degradación de la pared celular de la planta en la región de infección (Xie et al., 2012).

La pared celular vegetal está compuesta por polisacáridos como la celulosa y la hemicelulosa, y por las proteínas. Estos dos polímeros, en consecuencia, resultan ser los principales objetivos de las enzimas de degradación de la pared celular sintetizadas por bacterias (CWDE, sigla de *cell wall-degrading enzymes*; p. ej., endoglucanasas, exoglucanasas y enzimas auxiliares). La hidrólisis de la capa externa vegetal facilita el proceso de infección (Yang et al., 2021). En la interacción entre los rizobios y las leguminosas, la enzima pectato liasa, involucrada en la degradación de pectina, es esencial para la formación de nódulos en la raíz, ya que facilita la degradación de la pared celular (Xie et al., 2012). Los rizobios capturados ingresan por la hidrólisis de la pared celular posterior a la infección bacteriana en la epidermis, lo que induce el rizado de la punta de los pelos radiculares (Gage, 2004). En *Azoarcus* sp., *Bacillus* sp., y *Streptomyces* sp., por ejemplo, las enzimas líticas desempeñan un papel fundamental para el ingreso y la propagación bacteriana (Reinhold-Hurek et al., 2006; Ochiai et al., 2007; Yi et al., 2017; Suzuki et al., 2005). En *Azoarcus* sp. BH72, el grado de colonización de la raíz depende de su actividad endoglucanasa, que son mutantes que carecen de la proteína precursora de la endoglucanasa EglA y que exhiben bajos niveles de colonización de las raíces (Reinhold-Hurek et al., 2006). En *B. subtilis*, la degradación del ramnogalacturonano, componente de la pectina de la pared vegetal, a través de la acción de glucosidasas y liasas, es crítica para la colonización (Ochiai et al., 2007).

Las enzimas que degradan la pared celular vegetal se ven alteradas por los compuestos secretados por las raíces de las plantas. Algunos de estos metabolitos alteran positiva o negativamente la expresión génica de la microbiota asociada, actuando como moléculas señalizadoras (Yi et al., 2017). Los exudados vegetales comprenden una mezcla de polisacáridos, aminoácidos, ácidos orgánicos, ácidos aromáticos, ácidos alifáticos, fenoles, esteroides, flavonoides, terpenoides, proteínas y enzimas (Gargallo-Garriga et al., 2018). En *Bacillus mycooides* EC18, la presencia de exudados de raíces incrementa la expresión de enzimas hidrolíticas y, así, mejora la capacidad de penetración y colonización en las plantas (Yi et al., 2017). De igual manera, los exudados de raíz intervienen en la capacidad de nodulación y en los procesos de invasión en la interacción leguminosa-rizobio. Los genes de nodulación de rizobios compatibles se inducen en presencia de exudados, como los flavonoides (Oldroyd, 2001). No obstante, existen bacterias que no necesitan de las *cwde* para lograr un ingreso significativo. Este es el caso de *H. seropedicae*, bacteria endófitra promotora del crecimiento vegetal, que se ha identificado colonizando cultivos importantes sin afectar negativamente la planta huésped (Pedrosa et al., 2011). El genoma de *H. seropedicae* no alberga genes asociados con enzimas que degradan la pared celular vegetal, y, aun así, se ha encontrado colonizando un extenso tejido radicular.

Evasión de la respuesta inmune: consolidación de la interacción

Los sistemas de defensa de las plantas se activan por diversas señales, entre ellas, los patrones moleculares asociados a microbios (*PMAM*) y los patrones moleculares asociados al daño (*PDAM*). Los *PMAM* están presentes en microbios patógenos, beneficiosos y comensales, e incluyen el flagelo, el peptidoglicano y el lipopolisacárido de la pared celular. Estos *PMAM* son reconocidos por los receptores de reconocimiento de patógenos (*RRP*) de las plantas. Los *PDAM* pueden ser fragmentos resultantes de la degradación enzimática de la pared vegetal, que se componen de polisacáridos complejos, como la celulosa, la hemicelulosa y la pectina, y que desencadenan las respuestas inmunitarias (Claverie et al., 2018).

En comparación con los patógenos, se cree que las bacterias endófitas no activan el sistema inmune de la planta, ya que realmente no causan daño en el huésped, al producir cantidades mínimas de enzimas líticas. Los glicoconjugados bacterianos, que hacen parte de los *PMAM*, inducen las respuestas primarias del sistema inmune innato, siendo reconocidos por los *RRP* de este sistema (Erbs & Newman, 2012; Ipcho et al., 2016). Para eludir las respuestas

inmunológicas de la planta, los microorganismos no desarrollan PMAM o desarrollan PMAM imperceptibles. Estos últimos incluyen modificaciones postraduccionales que impiden el reconocimiento mediado por los RRP (Abramovitch et al., 2006). La flagelina, principal proteína para el ensamblaje de los flagelos, es uno de los PMAM reconocidos por el sistema inmune de la planta. Para percibir esta proteína, la planta suele contar con receptores transmembranales que permiten inducir las respuestas de defensa (Sun et al., 2006). En *Arabidopsis thaliana*, FLS1 y FLS2, son los receptores transmembranales implicados en la recepción de flagelina; sin embargo, aunque las plantas han evolucionado para reconocer los dominios de flagelina conservados, algunas especies bacterianas generan una flagelina indeterminada por los sistemas inmunológicos de la planta huésped (Sun et al., 2006). De igual manera, se ha demostrado que, debido a variaciones en la región flg22 de las bacterias, se minimiza la capacidad de provocar respuestas por el gen FLS2. La variación de un solo aminoácido de esta región bacteriana evita su identificación por parte de los RRP del huésped (Sun et al., 2006). Este es el caso de 12 cepas de *Xanthomonas campestris* pv. *campestris*, entre las cuales las proteínas de flagelina varían en la actividad de provocación de respuestas de defensa mediadas por FLS2 en *A. thaliana*. En las plántulas del ecotipo fls2-101, se descubrió que las flagelinas Xcc B94 y B305 no fueron percibidas (Sun et al., 2006).

Los microorganismos secretan efectores como estrategia de camuflaje, y al imitar a las proteínas vegetales, logran acceder fácilmente al interior del tejido vegetal y así evitar el reconocimiento de los PMAM. Como respuesta inmunológica secundaria, las plantas cuentan con la capacidad de reconocer los efectores, a través de proteínas de resistencia (RP), lo que detiene el crecimiento microbiano. Pero, debido a que las bacterias endófitas liberan efectores en cantidades bajas, se detienen o minimizan las respuestas inmunes de la planta. Los microbios pueden secretar efectores del sistema de secreción tipo III (SST3), para promover su colonización y suprimir la percepción de PMAM, no obstante, la coevolución huésped-microbio permite que el huésped adquiera receptores inmunes afines y que los efectores pierdan su utilidad (Sun et al., 2006). Estos receptores parecen estar asociados con patógenos, ya que los microbios no patógenos, como bacterias beneficiosas y comensales, pueden no contar con un SST3 o poseer mínimas proteínas SST3 detectables (Sun et al., 2006; Wagner et al., 2018), por lo cual estos microorganismos pueden establecerse exitosamente en las raíces, lo que evita el daño y las respuestas inmunitarias. En *A. thaliana*, se identificaron efectores, entre los cuales destaca AvrPto, que suprimen la expresión del gen NHO1 inducido por flagelina. Asimismo, AvrRpt2 y AvrRpm1, dos efectores de tipo III, inhiben las defensas inducidas por flg22 en *Arabidopsis* (Sun et al., 2006). De igual manera, estos

dos efectores promueven la virulencia de *Pseudomonas* en plantas que carecen de RIN4 (Sun et al., 2006).

La colonización endofítica, en sus etapas tempranas, se ve facilitada por la desintoxicación de especies reactivas de oxígeno (ROS) producto de la planta huésped. Estas representan una de las respuestas inmediatas en la interacción planta-microbio. En *Gluconacetobacter diazotrophicus*, bacteria diazotrófica endofítica, se ha registrado que la supresión de la producción de ROS es importante para la colonización inicial. Esto luego de confirmar que los mutantes de los genes encargados de la desactivación ROS, tales como *SOD* y *GR*, no pudieron colonizar las raíces de la planta experimental (Alquères et al., 2013). Los sistemas de reconocimiento inmunológicos estimulan la producción de auxinas por parte de la bacteria al producir ROS. En entornos con niveles elevados de ROS, la auxina es fundamental para la supervivencia bacteriana, ya que, además de inhibir las respuestas inmunológicas de la planta al antagonizar la producción del ácido salicílico (AS), ejerce control en la eficiente colonización de las raíces y mejora la salud de las plantas, al combatir los hongos patógenos (Tzipilevich et al., 2021). En *A. thaliana*, la señalización de auxina y, a su vez, la inhibición de AS se encuentran mediadas por el activador transcripcional *auxin response factor 7* (ARF7), siendo uno de los módulos reguladores más importantes en la colonización, ya que el ácido salicílico, hormona de defensa vegetal, se encarga de la represión de las raíces laterales, que son un sitio de entrada para la colonización de patógenos (Kong et al., 2020). Tanto bacterias benéficas, tales como *Bacillus velezensis* y *A. brasilense*, como bacterias patógenas, como *Pseudomonas syringae*, han demostrado el control que ejercen en la planta por su producción de auxina (Tzipilevich et al., 2021). No obstante, a pesar de que se ha confirmado el papel que tiene la auxina para proteger a las bacterias de las ROS, se señala que su efecto en la fisiología de la planta solo se presenta en concentraciones elevadas (Tzipilevich et al., 2021), por lo cual la producción de auxina no es suficiente para evadir el sistema inmune y lograr su establecimiento. Esta auxina necesita venir acompañada de otros factores, como el desarrollo de PMAM indeterminados y bajos niveles de producción de enzimas líticas y de efectores.

Referencias

- Abramovitch, R. B., Anderson, J. C., & Martin, G. B. (2006). Bacterial elicitation and evasion of plant innate immunity. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, 7(8), 601-611. <https://doi.org/10.1038/nrm1984>
- Aleti, G., Lehner, S., Bacher, M., Compant, S., Nikolic, B., Plesko, M., & Brader, G. (2016). Surfactin variants mediate species-specific biofilm formation and root colonization in *Bacillus*. *Environmental Microbiology*, 18(8), 2634-2645. <https://doi.org/10.1111/1462-2920.13405>
- Alquéres, S., Meneses, C., Rouws, L., Rothballer, M., Baldani, I., Schmid, M., & Hartmann, A. (2013). The bacterial superoxide dismutase and glutathione reductase are crucial for endophytic colonization of rice roots by *Gluconacetobacter diazotrophicus* PAL5. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 26(8), 937-945. <https://doi.org/10.1094/MPMI-12-12-0286-R>
- Araujo, G. G., Rodrigues, F., Gonçalves, F. L. T., & Galante, D. (2019). Survival and ice nucleation activity of *Pseudomonas syringae* strains exposed to simulated high-altitude atmospheric conditions. *Scientific Reports*, 9(1), 1-11. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-44283-3>
- Badri, D. V., & Vivanco, J. M. (2009). Regulation and function of root exudates. *Plant, Cell y Environment*, 32(6), 666-681. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2009.01926.x>
- Barea, J.-M., Pozo, M. J., Azcón, R., & Azcón-Aguilar, C. (2005). Microbial co-operation in the rhizosphere. *Journal of Experimental Botany*, 56(417), 1761-1778. <https://doi.org/10.1093/jxb/eri197>
- Beauregard, P. B., Chai, Y., Vlamakis, H., Losick, R., & Kolter, R. (2013). *Bacillus subtilis* biofilm induction by plant polysaccharides. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(17), 1621-1630. <https://doi.org/10.1073/pnas.1218984110>
- Blair, K. M., Turner, L., Winkelman, J. T., Berg, H. C., y Kearns, D. B. (2008). A molecular clutch disables flagella in the *Bacillus subtilis* biofilm. *Science*, 320(5883), 1636-1638. <https://doi.org/10.1126/science.1157877>
- Branda, S. S., Vik, S., Friedman, L., & Kolter R. (2005). Biofilms: the matrix revisited. *Trends Microbiology*, 13(1), 20-26. <https://doi.org/10.1016/j.tim.2004.11.006>
- Chevance, F. F. V., & Hughes, K. T. (2008). Coordinating assembly of a bacterial macromolecular machine. *Nature Reviews Microbiology*, 6(6), 455-465. <https://doi.org/10.1038/nrmicro1887>
- Claverie, J., Balacey, S., Lemaître-Guillier, C., Brulé, D., Chiltz, A., Granet, L., Noirot, E., Dairet, X., Darblade, B., Héloir, M. C., & Poinssot, B. (2018). The cell wall-derived xyloglucan is a new DAMP triggering plant immunity in *Vitis vinifera* and *Arabidopsis thaliana*. *Frontiers in Plant Science*, 9(1725), 1-14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01725>
- Compton, K. K., & Scharf, B. E. (2021). Rhizobial chemoattractants, the taste and preferences of legume symbionts. *Frontiers in Plant Science*, 12(686465), 1-8. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.686465>
- Darnton, N. C., Turner, L., Rojevsky, S., & Berg, H.C. (2010). Dynamics of bacterial swarming. *Biophysical Journal*, 98(10), 2082-2090. <https://doi.org/10.1016/j.bpj.2010.01.053>

- Dick, G. J. (2019). The microbiomes of deep-sea hydrothermal vents: distributed globally, shaped locally. *Nature Reviews Microbiology*, 17(5), 271-283. <https://doi.org/10.1038/s41579-019-0160-2>
- Du, C., Chai, L., Liu, C. et al. (2022). Improved *Agrobacterium tumefaciens*-mediated transformation using antibiotics and acetosyringone selection in cucumber. *Plant Biotechnology Reports*, 16(1), 17-27. <https://doi.org/10.1007/s11816-021-00734-w>
- Eggenhofer, E., Rachel, R., Haslbeck, M., y Scharf, B. (2006). MotD of *Sinorhizobium meliloti* and related-proteobacteria is the flagellar-hook-length regulator and therefore reassigned as flik. *Journal of Bacteriology*, 188(6), 2144-2153. <https://doi.org/10.1128/jb.188.6.2144-2153.2006>
- Elbeltagy, A., Nishioka, K., Suzuki, H., Sato, T., Sato, Y. I., Morisaki, H., Mitsui, H., & Minamisawa, K. (2000). Isolation and characterization of endophytic bacteria from wild and traditionally cultivated rice varieties. *Soil Science and Plant Nutrition*, 46(3), 617-629. <https://doi.org/10.1080/00380768.2000.10409127>
- Erbs, G., & Newman, M. (2012). The role of lipopolysaccharide and peptidoglycan, two glycosylated bacterial microbe-associated molecular patterns (MAMPS), in plant innate immunity. *Molecular Plant Pathology*, 13(1), 95-104. <https://doi.org/10.1111/j.1364-3703.2011.00730.x>
- Espinosa-Urgel, M., Salido, A., & Ramos, J. L. (2000). Genetic analysis of functions involved in adhesion of *Pseudomonas putida* to seeds. *Journal of Bacteriology*, 182(9), 2363-2369. <https://doi.org/10.1128/jb.182.9.2363-2369.2000>
- Faure, D., Vereecke, D., & Leveau, J. H. J. (2009). Molecular communication in the rhizosphere. *Plant and Soil*, 321(1-2), 279-303. <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9839-2>
- Gage, D. J. (2004). Infection and invasion of roots by symbiotic, nitrogen-fixing rhizobia during nodulation of temperate legumes. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 68(2), 280-300. <https://doi.org/10.1128/mmmbr.68.2.280-300.2004>
- Gargallo-Garriga, A., Preece, C., Sardans, J., Oravec, M., Urban, O., & Peñuelas, J. (2018). Root exudate metabolomes change under drought and show limited capacity for recovery. *Scientific Reports*, 8(1), 1-15. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-30150-0>
- Gjermansen, M., Nilsson, M., Yang, L., & Tolker-Nielsen, T. (2010). Characterization of starvation-induced dispersion in *Pseudomonas putida* biofilms: genetic elements and molecular mechanisms. *Molecular Microbiology*, 75(4), 815-826. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2958.2009.06793.x>
- Griffin, A. M., Morris, V. J., & Gasson, M. J. (1996). Identification, cloning and sequencing the aceA gene involved in acetan biosynthesis in *Acetobacter xylinum*. *FEMS Microbiology Letters*, 137(1), 115-121. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.1996.tb08092.x>
- Gurung, J. P., Gel, M., & Baker, M.A.B. (2020). Microfluidic techniques for separation of bacterial cells via taxis. *Microbial Cell*, 7(3), 66-79. <https://doi.org/10.15698/mic2020.03.710>
- Hall-Stoodley, L., & Stoodley, P. (2009). Evolving concepts in biofilm infections. *Cell Microbiology*, 11(7), 1034-1043. <https://doi.org/10.1111/j.1462-5822.2009.01323.x>
- Hasegawa, T., Kato, Y., Okabe, A., Itoi, C., Ooshiro, A., Kawaide, H., & Natsume, M. (2019). Effect of secondary metabolites of tomato (*Solanum lycopersicum*) on chemotaxis of *Ralstonia*

- solanacearum*, pathogen of bacterial wilt disease. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 67(7), 1807-1813. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b06245>
- Hasegawa, T., Okabe, A., Kato, Y., Ooshiro, A., Kawaide, H., & Natsume, M. (2018). Bioassay-guided isolation of a novel chemoattractant for *Ralstonia solanacearum* in tomato root exudates. *Journal of General Plant Pathology*, 84(1), 20-26. <https://doi.org/10.1007/s10327-017-0752-5>
- Henrichsen, J. (1972). Bacterial surface translocation: a survey and a classification. *Bacteriological Reviews*, 36(4), 478-503. <https://doi.org/10.1128/br.36.4.478-503.1972>
- Hinsa S. M., Espinosa-Urgel, M., Ramos, J. L., & O'Toole, G. A. (2003). Transition from reversible to irreversible attachment during biofilm formation by *Pseudomonas fluorescens* WCS365 requires an ABC transporter and a large secreted protein. *Molecular Microbiology*, 49(4), 905-918. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2958.2003.03615.x>
- Hori, K., & Matsumoto, S. (2010). Bacterial adhesion: from mechanism to control. *Biochemical Engineering Journal*, 48(3), 424-434. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2009.11.014>
- Huang, R., Feng, H., Xu, Z., Zhang, N., Liu, Y., Shao, J., ..., & Zhang, R. (2022). Identification of adhesins in plant beneficial rhizobacteria *Bacillus velezensis* SQR9 and their effect on root colonization. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 35(1), 64-72. <https://doi.org/10.1094/MPMI-09-21-0234-R>
- Ipcho, S., Sundelin, T., Erbs, G., & Kistler, H. C., Newman, M. A., & Olsson, S. (2016). Fungal innate immunity induced by bacterial microbe-associated molecular patterns (MAMPs). *G3: Genes, Genomes, Genetics*, 6(6), 1585-1595. <https://doi.org/10.1534/g3.116.027987>
- Janczarek, M., Rachwał, K., Cieśla, J., Ginalska, G., & Bieganski A. (2015). Production of exopolysaccharide by *Rhizobium leguminosarum* bv. *trifolii* and its role in bacterial attachment and surface properties. *Plant Soil*, 388 (1-2), 211-227. <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2320-5>
- Kanbe, M., Yagasaki, J., Zehner, S., Gottfert, M., & Aizawa, S.-I. (2006). Characterization of two sets of subpolar flagella in *Bradyrhizobium japonicum*. *Journal of Bacteriology*, 189(3), 1083-1089. <https://doi.org/10.1128/jb.01405-06>
- Kandel, S., Joubert, P., & Doty, S. (2017). Bacterial endophyte colonization and distribution within plants. *Microorganisms*, 5(4), 1-26. <https://doi.org/10.3390/microorganisms5040077>
- Keegstra, J. M., Carrara, F., & Stocker, R. (2022). The ecological roles of bacterial chemotaxis. *Nature Reviews Microbiology*, 20(8), 491-504. <https://doi.org/10.1038/s41579-022-00709-w>
- Kline, K. A., Fälker, S., Dahlberg, S., Normark, S., & Henriques-Normark, B. (2009). Bacterial adhesins in host-microbe interactions. *Cell Host & Microbe*, 5(6), 580-592. <https://doi.org/10.1016/j.chom.2009.05.011>
- Kong, X., Zhang, C., Zheng, H., Sun, M., Zhang, F., Zhang, M., ..., & Ding, Z. (2020). Antagonistic interaction between auxin and SA signaling pathways regulates bacterial infection through lateral root in *Arabidopsis*. *Cell Reports*, 32(8), 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.celrep.2020.108060>
- Krell, T., Lacal, J., Muñoz-Martínez, F., Reyes-Darías, J. A., Cadirci, B. H., García-Fontana, C., & Ramos, J. L. (2011). Diversity at its best: bacterial taxis. *Environmental Microbiology*, 13(5), 1115-1124. <https://doi.org/10.1111/j.1462-2920.2010.02383.x>

- Lopez, D., Vlamakis, H., & Kolter, R. (2010). Biofilms. *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology*, 2(7), 1-10. <https://doi.org/10.1101/cshperspect.a000398>
- Lowe-Power, T. M., Khokhani, D., & Allen, C. (2018). How *Ralstonia solanacearum* exploits and thrives in the flowing plant xylem environment. *Trends Microbiology*, 26(11), 929-942. <https://doi.org/10.1016/j.tim.2018.06.002>
- Maier, B., & Wong, G. C. L. (2015). How bacteria use type IV pili machinery on surfaces. *Trends in Microbiology*, 23(12), 775-788. <https://doi.org/10.1016/j.tim.2015.09.002>
- Makin, S. A., y Beveridge, T. J. (1996). The influence of A-band and B-band lipopolysaccharide on the surface characteristics and adhesion of *Pseudomonas aeruginosa* to surfaces. *Microbiology*, 142(2), 299-307. <https://doi.org/10.1099/13500872-142-2-299>
- Marathe, R., Meel, C., Schmidt, N.C., Dewenter, L., Kurre, R., Greune, L., ... Klumpp, S. (2014). Bacterial twitching motility is coordinated by a two-dimensional tug-of-war with directional memory. *Nature Communications*, 5(1), 1-10. <https://doi.org/10.1038/ncomms4759>
- Martínez-Gil M., Quesada J. M., Ramos-González M. I., Soriano, M. I., De Cristóbal R. E., Espinosa-Urgel M. (2013). Interplay between extracellular matrix components of *Pseudomonas putida* biofilms. *Research in Microbiology*, 164(5), 382-389. <https://doi.org/10.1016/j.resmic.2013.03.021>
- Matilla, M. A., & Krell, T. (2017). The effect of bacterial chemotaxis on host infection and pathogenicity. *FEMS Microbiology Reviews*, 42(1), 40-67. <https://doi.org/10.1093/femsre/fux052>
- McBride, M. J. (2001). Bacterial gliding motility: multiple mechanisms for cell movement over surfaces. *Annual Review of Microbiology*, 55(1), 49-75. <https://doi.org/10.1146/annurev.micro.55.1.49>
- Méhes, E., y Vicsek, T. (2014). Collective motion of cells: from experiments to models. *Integrative Biology*, 6(9), 831-854. <https://doi.org/10.1039/c4ib00115j>
- Meneses, C. H. S. G., Rouws, L. F. M., Simões-Araújo, J. L., Vidal, M. S., & Baldani, J. I. (2011). Exopolysaccharide production is required for biofilm formation and plant colonization by the nitrogen-fixing endophytes *Gluconacetobacter diazotrophicus*. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 24(12), 1448-1458. <https://doi.org/10.1094/mpmi-05-11-0127>
- Merritt, J. H., Brothers, K. M., Kuchma, S. L., O'Toole, G. A. (2007). SadC reciprocally influences biofilm formation and swarming motility via modulation of exopolysaccharide production and flagellar function. *Journal of Bacteriology*, 189(22), 8154-8164. <https://doi.org/10.1128/JB.00585-07>
- Mongiardini, E. J., Ausmees, N., Pérez-Giménez, J., Althabegoiti, M. J., Quelas, J. I., López-García, S. L., y Lodeiro, A. R. (2008). The rhizobial adhesion protein RapA1 is involved in adsorption of rhizobia to plant roots but not in nodulation. *FEMS Microbiology Ecology*, 65(2), 279-288. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2008.00467.x>
- Nevola, J. J., Stocker, B. A., Laux, D. C., & Cohen P. S. (1985). Colonization of the mouse intestine by an avirulent *Salmonella typhimurium* strain and its lipopolysaccharide-defective mutants. *Infection Immunity*, 50(1), 152-159. <https://doi.org/10.1128/iai.50.1.152-159.1985>
- Ochiai, A., Itoh, T., Kawamata, A., Hashimoto, W., & Murata, K. (2007). Plant cell wall degradation by saprophytic *Bacillus subtilis* strains: gene clusters responsible for rhamnogalacturonan

Capítulo XI. Bacterias endófitas de plantas: establecimiento de la interacción

- depolymerization. *Applied and Environmental Microbiology*, 73(12), 3803-3813. <https://doi.org/10.1128/AEM.00147-07>
- Oldroyd, G. E. (2001). Dissecting symbiosis: developments in Nod factor signal transduction. *Annals of Botany*, 87(6), 709-718. <https://doi.org/10.1006/anbo.2001.1410>
- Orozco-Mosqueda, M. del C., & Santoyo, G. (2020). Plant-microbial endophytes interactions: scrutinizing their beneficial mechanisms from genomic explorations. *Current Plant Biology*, 25, 100189. <https://doi.org/10.1016/j.cpb.2020.100189>
- Partridge, J. D., & Harshey, R. M. (2012). Swarming: flexible roaming plans. *Journal of Bacteriology*, 195(5), 909-918. <https://doi.org/10.1128/jb.02063-12>
- Passari, A. K., Mishra, V. K., Gupta, V. K., Yadav, M. K., Saikia, R., & Singh, B. P. (2015). *In vitro* and *in vivo* plant growth promoting activities and DNA fingerprinting of antagonistic endophytic actinomycetes associates with medicinal plants. *PLoS One*, 10(9), 1-18. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0139468>
- Pedrosa, F. O., Monteiro, R. A., Wasseem, R., Cruz, L. M., Ayub, R. A., Colauto, N. B., ..., & Souza, E. M. (2011). Genome of *Herbaspirillum seropedicae* strain SmR1, a specialized diazotrophic endophyte of tropical grasses. *PLoS Genetics*, 7(5), 1-10. <https://doi.org/10.1371/journal.pgen.1002064>
- Porter, S., Wadhams, G., & Armitage, J. (2011). Signal processing in complex chemotaxis pathways. *Nature Reviews Microbiology*, 9(3), 153-165. <https://doi.org/10.1038/nrmicro2505>
- Quax, T. E. F., Albers, S. V., & Pfeiffer, F. (2018). Taxis in archaea. *Emerging Topics in Life Sciences*, 2(4), 535-546. <https://doi.org/10.1042/ETLS20180089>
- Raina, J.-B., Fernandez, V., Lambert, B., Stocker, R., & Seymour, J. R. (2019). The role of microbial motility and chemotaxis in symbiosis. *Nature Reviews Microbiology*, 17(5), 284-294. <https://doi.org/10.1038/s41579-019-0182-9>
- Reinhold-Hurek, B., Maes, T., Gemmer, S., Van Montagu, M., & Hurek, T. (2006). An endoglucanase is involved in infection of rice roots by the not-cellulose-metabolizing endophyte *Azoarcus* sp. strain BH72. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 19(2), 181-188. <https://doi.org/10.1094/MPMI-19-0181>
- Ross, P., Mayer, R., & Benziman, M. (1991). Cellulose biosynthesis and function in bacteria. *Microbiological Reviews*, 55(1), 35-58. <https://doi.org/10.1128/mr.55.1.35-58.1991>
- Scharf, B. E., Hynes, M. F., & Alexandre, G. M. (2016). Chemotaxis signaling systems in model beneficial plant-bacteria associations. *Plant Molecular Biology*, 90(6), 549-559. <https://doi.org/10.1007/s11103-016-0432-4>
- Sowa, Y., & Berry, R. M. (2008). Bacterial flagellar motor. *Quarterly Reviews of Biophysics*, 41(2), 103-132. <https://doi.org/10.1017/s0033583508004691>
- Sprent, J. I., & James, E. K. (2007). Legume evolution: where do nodules and mycorrhizas fit in? *Plant Physiology*, 144(2), 575-581. <https://doi.org/10.1104/pp.107.096156>

- Stachel, S. E., Messens, E., Van Montagu, M., & Zambryski, P. (1985). Identification of the signal molecules produced by wounded plant cells that activate T-DNA transfer in *Agrobacterium tumefaciens*. *Nature*, *318*(6047), 624-629. <https://doi.org/10.1038/318624a0>
- Steenhoudt, O., & Vanderleyden, J. (2000). *Azospirillum*, a free-living nitrogen-fixing bacterium closely associated with grasses: genetic, biochemical and ecological aspects. *FEMS Microbiology Review*, *24*(4), 487-506. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6976.2000.tb00552.x>
- Sun, W., Dunning, F. M., Pfund, C., Weingarten, R., y Bent, A. F. (2006). Within-species flagellin polymorphism in *Xanthomonas campestris* pv. *campestris* and its impact on elicitation of Arabidopsis FLAGELLIN SENSING2-dependent defenses. *The Plant Cell*, *18*(3), 764-779. <https://doi.org/10.1105/tpc.105.037648>
- Suzuki, T., Shimizu, M., Meguro, A., Hasegawa, S., Nishimura, T., & Kunoh, H. (2005). Visualization of infection of an endophytic actinomycete *Streptomyces galbus* in leaves of tissue-cultured rhododendron. *Actinomycetologica*, *19*(1), 7-12. <https://doi.org/10.3209/saj.19.7>
- Tzipilevich, E., Russ, D., Dangl, J. L., & Benfey, P. N. (2021). Plant immune system activation is necessary for efficient root colonization by auxin-secreting beneficial bacteria. *Cell Host y Microbe*, *29*(10), 1507-1520. <https://doi.org/10.1016/j.chom.2021.09.005>
- Wadhams, G. H., & Armitage, J. P. (2004). Making sense of it all: bacterial chemotaxis. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, *5*(12), 1024-1037. <https://doi.org/10.1038/nrm1524>
- Wadhwa, N., y Berg, H. C. (2022). Bacterial motility: machinery and mechanisms. *Nature Reviews Microbiology*, *20*(3), 161-173. <https://doi.org/10.1038/s41579-021-00626-4>
- Wagner, S., Grin, I., Malmsheimer, S., Singh, N., Torres-Vargas, C. E., & Westerhausen, S. (2018). Bacterial type III secretion systems: a complex device for the delivery of bacterial effector proteins into eukaryotic host cells. *FEMS Microbiology Letters*, *365*(19), 1-13. <https://doi.org/10.1093/femsle/fny201>
- Wheatley, R. M., y Poole, P. S. (2018). Mechanisms of bacterial attachment to roots. *FEMS Microbiology Reviews*, *42*(4), 448-461. <https://doi.org/10.1093/femsre/fuy014>
- Williams, F. D., y Schwarzhoff, R. H. (1978). Nature of the Swarming Phenomenon in *Proteus*. *Annual Review of Microbiology*, *32*(1), 101-138. <https://doi.org/10.1146/annurev.mi.32.100178.000533>
- Xi, J., Patel, M., Dong, S., Que, Q., y Qu, R. (2018). Acetosyringone treatment duration affects large T-DNA molecule transfer to rice callus. *BMC biotechnology*, *18*(1), 1-8. <https://doi.org/10.1186/s12896-018-0459-5>
- Xie, F., Murray, J. D., Kim, J., Heckmann, A. B., Edwards, A., Oldroyd, G. E., & Downie, J. A. (2012). Legume pectate lyase required for root infection by rhizobia. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *109*(2), 633-638. <https://doi.org/10.1073/pnas.1113992109>
- Yang, C., Liu, R., Pang, J., Ren, B., Zhou, H., Wang, G., ..., & Liu, J. (2021). Poaceae-specific cell wall-derived oligosaccharides activate plant immunity via OsCERK1 during *Magnaporthe oryzae* infection in rice. *Nature Communications*, *12*(1), 1-13. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22456-x>
- Yi, Y., de Jong, A., Frenzel, E., & Kuipers, O. P. (2017). Comparative transcriptomics of *Bacillus mycoides* strains in response to potato-root exudates reveals different genetic adaptation of

Capítulo XI. Bacterias endófitas de plantas: establecimiento de la interacción

endophytic and soil isolates. *Frontiers in Microbiology*, 8(1487), 1-14. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01487>

Zhao, X., Wang, Y., Shang, Q., Li, Y., Hao, H., Zhang, Y., Guo, Z., Yang, G., Xie, Z., & Wang, R. (2015). Collagen-like proteins (ClpA, ClpB, ClpC, and ClpD) are required for biofilm formation and adhesion to plant roots by *Bacillus amyloliquefaciens* FZB42. *PLoS One*, 10(2), 1-16. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0117414>



Capítulo XII

234

Bacterias endófitas de plantas: mecanismos de mitigación del déficit hídrico en planta

Andrés E. Moreno-Galván
Daniel F. Rojas-Tapias
Mauricio Camelo-Rusique
Lady R. Molano-Chávez
Ruth R. Bonilla-Buitrago
Germán A. Estrada-Bonilla

Introducción

Las bacterias endófitas son aquellas que habitan la endosfera de las plantas sin causar enfermedad aparente. La colonización bacteriana del tejido vegetal involucra una serie de procesos que incluyen quimioatracción, desplazamiento hacia la planta, adhesión a la superficie vegetal, invasión del tejido y evasión del sistema inmune. Notablemente, una vez las bacterias colonizan el tejido vegetal, estas pueden influenciar la fisiología y el metabolismo de la planta, lo que estimula su crecimiento, reduce el impacto de diversos estreses abióticos (salinidad, sequía, metales pesados) y previene o enfrenta la infección por organismos patógenos. Los mecanismos asociados a estos efectos involucran la modulación de las concentraciones de hormonas de crecimiento y estrés, iones, enzimas antioxidantes, y solutos compatibles, o la competencia directa e indirecta con organismos patógenos (Glick 2015; Ulla et al., 2019, Lata et al., 2019). El uso de bacterias endófitas representa una herramienta para mejorar el crecimiento de diversos cultivos y reducir el impacto negativo de diversas condiciones ambientales sobre su desarrollo.

La interacción planta-microorganismo-ambiente desempeña un papel determinante en el desarrollo y crecimiento natural de las plantas, ya que influencia diversos procesos biológicos (Ngumbi & Kloepper, 2016; Kumar et al., 2019). Estas interacciones pueden ser aprovechadas para el desarrollo de biotecnologías enfocadas en el uso de microorganismos que tienen como objetivo mitigar el impacto negativo de distintos estreses abióticos sobre el crecimiento y desarrollo de diversos cultivos de interés agronómico. El desarrollo de estas tecnologías, no obstante, requiere una profunda comprensión de los mecanismos involucrados. Los mecanismos microbianos asociados a la mitigación del estrés abiótico incluyen la producción de exopolisacáridos, cambios en los niveles de sustancias reguladoras del crecimiento, modulación del sistema antioxidante y acumulación de osmorreguladores. En este capítulo, se presentarán los mecanismos que los microorganismos usan para mitigar el estrés de las plantas expuestas a déficit hídrico.

Producción de exopolisacáridos (EPS)

La producción bacteriana de EPS facilita la adhesión y permanencia de las bacterias sobre la superficie radicular, proceso fundamental para la colonización. En el ambiente natural, los EPS bacterianos actúan como la matriz dentro de la cual se embeben las células para formar estructuras complejas denominadas biopelículas. Curiosamente, estos EPS también cumplen una tarea importante en la mitigación del estrés por déficit hídrico en plantas. La producción microbiana de EPS hacia la rizosfera contribuye con procesos fisicoquímicos

asociados a la agregación del suelo alrededor de la raíz, así como la formación de zonas de microhidratación en la rizosfera. Estos cambios protegen la raíz frente a la desecación y favorecen el intercambio de nutrientes bajo condiciones limitantes de agua, debido a sus características hidrofílicas (Dimkpa et al., 2009; Timmusk & Nevo, 2011; Upadhyay et al., 2011; Yegorenkova et al. 2001; Kavamura & Melo, 2014; Morcillo & Manzanera, 2021). La producción de EPS también resulta en un incremento en el volumen de los macroporos del suelo.

La interacción entre la síntesis bacteriana de EPS y el estrés por sequía ha sido observada en diversas especies bacterianas y vegetales. Por ejemplo, la inducción de tolerancia al estrés por déficit hídrico en *Arabidopsis thaliana* mediada por *Bacillus amyloliquefaciens* FZB42 depende estrictamente de la presencia de EPS. Cepas mutantes deficientes en la producción bacteriana de EPS fueron incapaces de inducir la tolerancia en comparación con la cepa silvestre (Lu et al., 2018). La inoculación de plantas de trigo y girasol con *Pantoea agglomerans* NAS206 y *Rhizobium* sp. YAS34 incrementó la cantidad de agregados de suelo alrededor de la raíz, bajo condiciones de déficit hídrico. Este incremento se correlacionó positivamente con la mitigación del estrés e influyó positivamente sobre la toma de nutrientes y el crecimiento (Amellal et al., 1998; Alami et al., 2000; Morcillo y Manzanera, 2021).

La síntesis de EPS en las bacterias parece ser a su vez regulada también por déficit hídrico en algunas especies. Empleando *Bacillus megaterium* XT14 y *Bacillus licheniformis* XT38, se observó que el déficit hídrico causado por la adición de concentraciones crecientes de sorbitol resultó en un incremento neto en la síntesis de exopolisacáridos. Estas bacterias, además, fueron capaces de mitigar el estrés por sequía en plantas de pasto Guinea y maíz (Vardharajula et al., 2011; Moreno-Galván, Cortés-Patiño, et al., 2020; Moreno-Galván, Romero-Perdomo et al., 2020).

Modulación de sustancias reguladoras del crecimiento vegetal

La regulación de la concentración de sustancias reguladoras del crecimiento vegetal, como ácido indolacético, giberelinas y citoquininas, es otro de los mecanismos utilizado por las bacterias para mitigar el estrés por déficit hídrico (Étesami & Maheshwar, 2018; Ulla et al., 2019). Estas fitohormonas modulan procesos de desarrollo y respuesta a estrés en las plantas, y, en consecuencia, su abundancia impacta procesos vegetales de forma global (Qin et al., 2016).

Ácido indol-3-acético

El ácido indol-3-acético (AIA) es el representante más abundante de la familia de las auxinas en plantas. Otros miembros de esta familia son el ácido indol-3-butírico (IBA), el ácido 4-cloroindol-3-acético (4-Cl-AIA) y el ácido fenilacético (PAA) (Sukumar et al., 2013). Las auxinas son una clase de fitohormonas involucradas en la regulación del crecimiento y desarrollo vegetal. Este grupo de compuestos es naturalmente sintetizado por las plantas empleando varias vías metabólicas, la mayor parte dependientes de triptófano (Zhao, 2010), no obstante, también pueden ser sintetizados por bacterias. El AIA regula la división de las células vegetales, y se sintetiza y actúa en los ápices y en las hojas jóvenes de la planta, así como en el tallo y la raíz, lo que induce la división celular.

El incremento en los niveles de AIA bajo condiciones de estrés es potencialmente beneficioso para el crecimiento y el desarrollo de las plantas. Un aumento en las concentraciones de AIA estimula el crecimiento del tallo y la raíz, lo que mitiga la pérdida de biomasa, debido al retardo del crecimiento por causa del estrés abiótico (Riemann et al., 2015). Adicionalmente, un aumento en los niveles de AIA se correlaciona con un aumento en la concentración de fenoles totales y calcio intracelular, y con mayor actividad polifenol oxidasa. El aumento de AIA, por lo tanto, puede también mitigar indirectamente el estrés por déficit hídrico (Ahmad et al. 2008; Chowdhury, 2003; Ullah et al., 2019).

Bajo condiciones de estrés, no obstante, las concentraciones de AIA en la planta típicamente decrecen. Además, la acción del AIA sobre el crecimiento y desarrollo vegetal disminuye debido a un bloqueo mediado por etileno (Figueiredo et al., 2008; Farooq et al., 2012; Duca et al., 2018). Notablemente, las bacterias pueden suplir esta deficiencia mediante la síntesis y liberación de AIA de forma endógena o exógena (Kim et al., 2012). Una correlación entre la producción microbiana de AIA y la disminución del estrés por sequía ha sido observada en diversas especies vegetales, incluyendo trigo, maíz, pasto Guinea, pasto Ryegrass, y algunas leguminosas (Chandra et al., 2018; Saleem et al., 2018; Moreno-Galván, Cortés-Patiño, et al., 2020; Moreno-Galván, Romero-Perdomo et al., 2020; Cortés-Patiño et al., 2021). Algunos de los géneros bacterianos productores de AIA son *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Enterobacter*, *Azospirillum* y *Herbaspirillum*.

Giberelinas

Las giberelinas (GB) son hormonas vegetales que participan en la germinación, elongación de los tallos, floración, maduración de frutos y crecimiento primario de la raíz. Las giberelinas son diterpenoides sintetizados a través de la vía de los terpenoides, en una serie de pasos secuenciales que inician en los plástidos y siguen en el retículo endoplasmático. Las GB son típicamente clasificadas según su número de carbonos (C20 y C19), siendo las GB C19 las más activas biológicamente (Salazar-Cerezo et al., 2018). Bajo condiciones de estrés, los niveles de GB en las plantas decrecen. Esta disminución causa un aumento en la concentración de represores del crecimiento y, en consecuencia, una disminución en la tasa de elongación celular. Este efecto se debe en parte a una relación antagonista entre el ácido abscísico y las GB, donde los niveles de ABA incrementan bajo estrés y regulan de forma negativa los de GB (Figueiredo et al., 2008; Pandey et al., 2016; Parwez et al., 2022). Un aumento en la concentración de GB mediado por bacterias puede, por lo tanto, estimular el desarrollo celular y favorecer la tolerancia a condiciones de sequía (Masciarelli et al., 2014; Khan et al., 2016; Radhakrishnan et al., 2017; Nett et al., 2017; Ghosh et al., 2019). Varios géneros bacterianos, como *Bacillus*, *Rhizobium*, *Sinorhizobium*, *Mesorhizobium* y *Pseudomonas*, son capaces de producir GB y, en consecuencia, representan potenciales moduladores del crecimiento vegetal.

Citoquininas

Las citoquininas (CK) son derivados estructurales de la adenina. Las CK más comunes son la kinetina, la zeatina y la benzilaminopurina, y controlan procesos de elongación y diferenciación celular en la planta bajo condiciones normales. Las CK actúan concertadamente con las auxinas, pero normalmente tienen efectos contrarios. Bajo condiciones de estrés abiótico, los niveles de CK se correlacionan inversamente con los de ácido abscísico (ABA). Durante estrés abiótico, la concentración de CK disminuye, mientras que los niveles de ABA incrementan, lo que causa la activación de diversas respuestas a estrés en la planta (Li et al., 2016; Gujjar y Supaibulwatana, 2019). La disminución de los niveles de CK debido a estrés reduce la división y proliferación celular. No obstante, la adición exógena de CK a la planta puede estimular el crecimiento en condiciones adversas. El aumento en la síntesis de CK durante estrés puede además retrasar la senescencia y reducir el daño oxidativo (Chang et al., 2016; Huang et al., 2018; Gujjar y Supaibulwatana, 2019).

El uso de bacterias productoras de CK es una herramienta promisoriosa para el desarrollo de cultivos tolerantes a sequía. En tomate, el uso de *Pseudomonas*

fluorescens G20-18 productora de CK mejoró su nivel de tolerancia a sequía. La relación de causalidad entre la producción microbiana de CK y la tolerancia al estrés abiótico fue determinada empleando mutantes incapaces de sintetizar CK, los cuales exhibieron un menor efecto de mitigación. Las diferencias debidas a las CK fueron observadas a nivel fisiológico, metabólico y transcriptómico (Mekureyaw et al., 2022). Cepas productoras de CK, como *Bacillus subtilis* IB-22, han mostrado mitigar el estrés por sequía en plantas de lechuga, de la misma forma que *Pseudomonas aeruginosa* PM389, *Pseudomonas aeruginosa* ZNP1, *Bacillus endophyticus* J13 y *Bacillus tequilensis* J12 en arábidopsis (Arkhipova et al., 2007; Ghosh et al., 2019).

Modulación de la síntesis de etileno

Cuando las plantas son expuestas a condiciones de estrés, estas responden produciendo *etileno de estrés*, y dado que las plantas reaccionan diferencialmente al estrés, eso da lugar a un variado rango de sensibilidad al etileno (Glick et al., 2007). Las plantas sintetizan etileno a partir del ácido 1-aminociclopropano-1-carboxílico (ACC), mediante la acción de la enzima ACC oxidasa. Asimismo, el ACC es producido a partir de S-adenosilmetionina (SAM), mediante la acción de la ACC sintasa (Glick et al., 2007; Vurukonda et al., 2016). Bajo condiciones de estrés hídrico, las plantas aumentan la producción de ACC. Este ACC puede incluso ser liberado en los exudados radiculares y allí soportar el crecimiento de una variedad de microorganismos (Wang et al., 2013; Liu et al., 2015; Abiri et al., 2017).

La función del etileno bajo condiciones de estrés presenta una variedad compleja de interacciones. El estrés hídrico, por ejemplo, resulta en la formación de dos picos de etileno separados en el tiempo. El primer pico es de baja intensidad y ocurre a las pocas horas del estrés, mientras el segundo es significativamente mayor y se produce en un lapso de dos a tres días después del estrés (Glick, 2005; Glick et al., 2007). Durante el primer pico de etileno, la cantidad de ACC existente en los tejidos es baja y, en consecuencia, se produce poco etileno. Este etileno está encargado de iniciar la respuesta de protección de la planta frente al estrés abiótico. El segundo pico debe su magnitud al incremento de la síntesis de ACC. Este etileno, en contraste, está relacionado con la inhibición del crecimiento de la planta (Glick, 2014; Müller & Munné-Bosch, 2015; Iqbal et al., 2017; Dubois et al., 2018).

La forma en que las bacterias endófitas mitigan el estrés abiótico está directamente relacionada con la presencia y acción de la enzima ACC desaminasa. Las bacterias con actividad ACC desaminasa tienen el potencial de reducir la acción inhibitoria del segundo pico de etileno al consumir a su precursor. El

metabolismo del ACC bacteriano produce alfa-cetobutirato y amonio como subproductos, los cuales pueden ser usados como fuentes de carbono y nitrógeno (Shaharoon et al. 2006; Yang et al. 2008). Esta enzima es relativamente común en los géneros *Azospirillum*, *Rhizobium*, *Agrobacterium* y *Herbaspirillum*. Otros compuestos químicos pueden reducir la concentración de etileno de estrés en las plantas (p. ej., rizobiotoxina, 1-metilciclopropeno y ácido aminooxiacético), no obstante, sus usos prácticos son limitados. El uso de bacterias endófitas productoras de ACC desaminasa tiene un alto potencial para mitigar diversos estreses abióticos en condiciones de campo (Duca et al., 2018).

Modulación bacteriana de la actividad enzimática antioxidante

Las enzimas antioxidantes desempeñan un papel primordial en la respuesta a diversos estreses abióticos, incluyendo la sequía. Estas enzimas son las encargadas de detoxificar especies reactivas del oxígeno, como el radical superóxido (O_2^-) y el peróxido de hidrógeno (H_2O_2), para así proteger las células vegetales del daño oxidativo y restaurar compuestos antioxidantes clave, como el ácido ascórbico y el glutatión (Das & Roychoudhury, 2014). Algunas enzimas antioxidantes son el superóxido dismutasa (SOD) que convierte el radical superóxido en H_2O_2 , catalasa (CAT), y el ascorbato peroxidasa (APX), que convierte este H_2O_2 en agua. La glutatión reductasa (GR) restaura el *pool* de glutatión reducido. Otras enzimas importantes son la dehidroxiascorbato reductasa (DHAR) y la monodehidroxiascorbato reductasa (MDHAR) implicadas en la restauración del ascorbato (Das & Roychoudhury, 2014; Pedrosa Gomes et al., 2014).

La inoculación de plantas con microorganismos puede generar cambios en la actividad de diversas enzimas antioxidantes involucradas en la mitigación del estrés abiótico. No obstante, el mecanismo mediante el cual las bacterias modulan este balance enzimático antioxidante en la planta aún no es bien comprendido (Lata et al., 2018; Kumar et al., 2019). En plantas de pasto Ryegrass, maíz y pasto Guinea, se ha observado un aumento en la actividad enzimática antioxidante en condiciones de estrés por sequía, debido a la inoculación con bacterias de los géneros *Bacillus*, *Azospirillum*, *Herbaspirillum* y *Pseudomonas*. Este aumento en la actividad antioxidante se correlacionó con la mitigación del estrés, evidenciado por un incremento en la biomasa en etapas tempranas y tardías del desarrollo vegetal (Moreno-Galván, Cortés-Patiño, et al., 2020; Moreno-Galván, Romero-Perdomo et al., 2020; Cortés-Patiño et al., 2021; Mendoza-Labrador et al., 2021).

Biosíntesis de solutos compatibles: prolina, trehalosa y glicina betaína

Uno de los osmolitos o solutos compatibles más importantes en la adaptación a estrés por sequía en plantas es el aminoácido prolina. Este osmolito puede ser sintetizado por bacterias y plantas, y su función bajo condiciones de estrés hídrico es reducir el potencial osmótico celular, así como mejorar la retención de agua y la estructura celular (Anwar et al. 2014; Masood, et al. 2016; Chekwube y Babalola, 2018). Curiosamente, la inoculación con bacterias de diversos géneros (p. ej., *Bacillus*, *Azospirillum*, *Pseudomonas*, *Herbaspirillum*, *Serratia*, *Rhizobium*) es capaz de modular los niveles de prolina en diferentes especies de plantas (p. ej., pepino, frijol, maíz, pasto Ryegrass y pasto Guinea) bajo condiciones de estrés por déficit hídrico. El efecto neto de la modulación en las concentraciones de prolina se relaciona con una mitigación de los efectos deletéreos del estrés (Ngumbi y Kloepper, 2016; Moreno-Galván, Cortés-Patiño et al., 2020; Moreno-Galván, Romero-Perdomo et al., 2020; Cortés-Patiño et al., 2021; Mendoza-Labrador et al., 2021).

La trehalosa, un glucósido formado por dos moléculas de α -glucosa, actúa como estabilizador de proteínas y membranas. Su efecto osmoprotector favorece la formación de un gel a medida que la célula se deshidrata, lo que mitiga el daño causado por la pérdida de agua. Plantas bajo estrés hídrico capaces de acumular una mayor concentración de trehalosa han demostrado soportar mejor el estrés (Zhou et al., 2014; Forni et al., 2017). La inoculación de bacterias endófitas en plantas sometidas a estrés por sequía ha demostrado incrementar las concentraciones de trehalosa en las plantas. En plantas de frijol sometidas a estrés por sequía, la inoculación de un mutante de *Rhizobium etli* que sobreexpresa los genes de síntesis de trehalosa incrementó los niveles de esta en la planta. Dicho aumento se correlacionó con mayor supervivencia, número de nódulos funcionales y rendimiento bajo condiciones de estrés, comparado con el mutante, que era incapaz de sintetizar trehalosa (Suárez et al., 2008). En plantas de maíz sometidas a estrés por sequía, la inoculación de la bacteria *Azospirillum brasilense*, modificada genéticamente para sintetizar trehalosa, incrementó tanto la supervivencia de las plantas en 30 % como la producción de biomasa en 73 %, en comparación con las plantas inoculadas con la cepa sin modificar (Rodríguez-Salazar et al., 2009).

La acumulación de glicina betaína bajo condiciones de estrés hídrico también favorece la retención de agua y ayuda a mantener las estructuras de las proteínas en las plantas. Esto se debe a su alta solubilidad en agua y a que no hace parte de la esfera de hidratación de las proteínas. Asimismo, ayuda a

mantener la actividad fotosintética de la planta, lo que aumenta la conductancia estomática y mantiene la actividad y estabilidad de los cloroplastos. También interactúa con fitohormonas para conferir tolerancia a estrés por sequía en las plantas (Ahmad et al., 2013; Masood et al., 2016; Sharma et al., 2019). Bajo condiciones de estrés abiótico, las bacterias pueden sintetizar y excretar glicina betaína. En plantas de frijol Mungo inoculadas con *Pseudomonas aeruginosa*, se observó un incremento en los niveles de glicina betaína bajo condiciones de sequía. Este incremento se relacionó con una mayor mitigación de los efectos negativos del déficit hídrico (Sarma & Sakia, 2013; Etesami & Maheshwari, 2018). Igualmente, *Sphingomonas* sp. y *B. amyloliquefaciens* mitigaron los efectos del estrés por sequía en cultivos de soya y arroz en una forma dependiente de la producción de glicina betaína (Asaf et al., 2017; Khan et al., 2014; Shahzad et al., 2017; Ulla et al., 2019).

Referencias

- Ahmad, F., Ahmad, I., & Khan, M. S. (2008). Screening of free-living rhizospheric bacteria for their multiple plant growth promoting activities. *Microbiol. Res.*, 163(2), 173-181. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0944501306000437>
- Ahmad, R., Lim, C. J., & Kwon, S. Y. (2013). Glycine betaine: a versatile compound with great potential for gene pyramiding to improve crop plant performance against environmental stresses. *Plant Biotechnology Reports*, 7(1), 49-57. <https://doi.org/10.1007/s11816-012-0266-8>
- Alami, Y., Achouak, W., Marol, C., & Heulin, T. (2000). Rhizosphere soil aggregation and plant growth promotion of sunflowers by an exopolysaccharide-producing *Rhizobium* sp. strain isolated from sunflower roots. *Appl. Environ. Microbiol.*, 66(8), 3393-3398.
- Amellal, N., Burtin, G., Bartoli, F., Heulin, T. (1998). Colonization of wheat rhizosphere by EPS producing *Pantoea agglomerans* and its effect on soil aggregation. *Applied Environmental Microbiology*, 64(10), 3740-3747.
- Anwar Hossain, M., Hoque, M. A., Burritt, D. J., & Fujita, M. (2014). *Proline protects plants against abiotic oxidative stress*. En P. Ahmad (Ed.), *Oxidative damage to plants* (pp. 477-522). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-799963-0.00016-2>
- Arkhipova, T. N., Prinsen, E., Veselov, S. U., Martinenko, E. V., Melentiev, A. I., & Kudoyarova, G. R. (2007) Cytokinin producing bacteria enhance plant growth in drying soil. *Plant Soil*, 292(1-2), 305-315.
- Asada, K., Urano, M., & Takahashi, M. (1973). Subcellular location of superoxide dismutase in spinach leaves and preparation and properties of crystalline spinach superoxide dismutase. *European Journal of Biochemistry*, 36(1) 257-266.
- Asaf, S., Khan, A. L., Khan, M. A., Imran, Q. M., Yun, B. W., & Lee, I. J. (2017). Osmoprotective functions conferred to soybean plants via inoculation with *Sphingomonas* sp LK11 and exogenous trehalose. *Microbiological Research*, 205(1), 135-145. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2017.08.009>

Capítulo XI. Bacterias endófitas de plantas: establecimiento de la interacción

- Bistgani, Z. E., Siadat, S. A., Bakhshandeh, A., Pirbalouti, A. G., & Hashemi, M. (2017). Interactive effects of drought stress and chitosan application on physiological characteristics and essential oil yield of *Thymus daeneksis* Celak. *Crop Journal*, 5(5), 407-415.
- Borjas-Ventura, R., Julca Otiniano, A., & Alvarado Juamán, L. (2020). Las fitohormonas una pieza clave en el desarrollo de la agricultura. *Journal of the Selva Biosphere*, 8(2), 150-164.
- Chandra, D., Srivastava, R., & Sharma, A. K. (2018). Influence of IAA and ACC deaminase producing fluorescent pseudomonads in alleviating drought stress in wheat (*Triticum aestivum*). *Agricultural Research*, 7(3), 290-299. <https://doi.org/10.1007/s40003-018-0305-y>
- Chang, Z., Liu, Y., Dong, H., Teng, K., Han, L., & Zhang, X. (2016). Effects of cytokinin and nitrogen on drought tolerance of creeping bentgrass. *PLoS ONE*, 11(4), e0154005. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0154005>
- Chekwube, M., & Babalola, O. (2018). The influence of plant growth promoting rhizobacteria in plant tolerance to abiotic stress: a survival strategy. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 102(1), 7821-7835.
- Chowdhury, A. K. (2003). Control of sclerotium blight of groundnut by growth substances. *Crop Research*, 25(2), 355-359.
- Cortés-Patiño, S., Vargas, C., Álvarez-Flórez, F., Bonilla, R., & Estrada-Bonilla, G. (2021). Potential of *Herbaspirillum* and *Azospirillum* consortium to promote growth of perennial ryegrass under water deficit. *Microorganisms*, 9(1), 1-16. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9010091>
- Das, K., & Roychoudhury, A. (2014). Reactive oxygen species (ROS) and response of antioxidants as ROS-scavengers during environmental stress in plants. *Frontiers in Environmental Science*, 2(12), 1-13. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2014.00053>
- Dimkpa, C., Weinand, T., Asch, F. (2009). Plant-rhizobacteria interactions alleviate abiotic stress conditions. *Plant Cell Environ*, 32(12), 1682-1694.
- Dubois, M., Van Den Broeck, L., & Inzé, D. (2018). The pivotal role of ethylene in plant growth. *Trends Plant Science*, 23(4), 311-323. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2018.01.003>
- Duca, D. R., Rose, D. R., & Glick, B. R. (2018). Indole acetic acid overproduction transformants of the rhizobacterium *Pseudomonas* sp. UW4. *Antonie van Leeuwenhoek, International Journal of General and Molecular Microbiology*, 111(9), 1645-1660. <https://doi.org/10.1007/s10482-018-1051-7>
- Etesami, H., & Maheshwari, D. K. (2018). Use of plant growth promoting rhizobacteria (PGPRs) with multiple plant growth promoting traits in stress agriculture: action mechanisms and future prospects. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 156(1), 225-246. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.03.013>
- Fang, Y., & Lizhong, X. (2015). General mechanisms of drought response and their application in drought resistance improvement in plants. *Cellular and Molecular Life Sciences*, 72(4), 673-689. <https://doi.org/10.1007/s00018-014-1767-0>
- Farooq, M., Hussain, M., Wahid, A., & Siddique, K. H. M. (2012). Drought stress in plants: an overview. En R. Aroca (Ed.), *Plant responses to drought stress* (pp. 1-33). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-32653-0_1

- Figueiredo, M. V. B., Burity, H. A., Martínez, C. R., & Chanway, C. P. (2008). Alleviation of drought stress in the common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) by co-inoculation with *Paenibacillus polymyxa* and *Rhizobium tropici*. *Applied Soil Ecology*, 40(1), 182-188. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2008.04.005>
- Forni, C., Duca, D., & Glick, B. R. (2017). Mechanisms of plant response to salt and drought stress and their alteration by rhizobacteria. *Plant and Soil*, 410(1-2), 335-356. <https://doi.org/10.1007/s11104-016-3007-x>
- Ghosh, D., Gupta, A., & Mohapatra, S. (2019). A comparative analysis of exopolysaccharide and phytohormone secretions by four drought-tolerant rhizobacterial strains and their impact on osmotic-stress mitigation in *Arabidopsis thaliana*. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 35(6), 1-15. <https://doi.org/10.1007/s11274-019-2659-0>
- Glick, B. R. (2005). Modulation of plant ethylene levels by the bacterial enzyme ACC deaminase. *FEMS Microbiology Letters*, 251(1), 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.femsle.2005.07.030>
- Glick, B. R. (2014). Bacteria with ACC deaminase can promote plant growth and help to feed the world. *Microbiological Research*, 169(1), 30-39. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2013.09.009>
- Glick, B. R. (2015). Stress control and ACC deaminase. En B. Lugtenberg (Ed.), *Principles of plant-microbe interactions* (pp. 257-264). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-08575-3_27
- Glick, B. R., Cheng, Z., Czarny, J., & Duan, J. (2007). Promotion of plant growth by ACC deaminase-producing soil bacteria. *European Journal of Plant Pathology*, 119(3), 329-339. <https://doi.org/10.1007/s10658-007-9162-4>
- Gujjar, R. S., & Supaibulwatana, K. (2019). The mode of cytokinin functions assisting plant adaptations to osmotic stresses. *Plants*, 8(12), 1-18. <https://doi.org/10.3390/plants8120542>
- Huang, X., Hou, L., Meng, J., You, H., Li, Z., Gong, Z., Shi, Y. (2018). The antagonistic action of abscisic acid and cytokinin signaling mediates drought stress response in *Arabidopsis*. *Molecular*, 11(7), 970-982.
- Iqbal, N., Khan, N. A., Ferrante, A., Trivellini, A., Francini, A., & Khan, M. (2017). Ethylene role in plant growth, development and senescence: interaction with other phytohormones. *Frontiers in Plant Science*, 8, 475. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00475>
- Kavamura, V. N., & Melo, I. S. de (2014). Effects of different osmolarities on bacterial bio-film formation. *Brazilian Journal of Microbiology*, 45(2), 627-631. <https://doi.org/10.1590/S1517-83822014000200034>
- Khan, A. L., Waqas, M., Kang, S. M., Al-Harrasi, A., Hussain, J., Al-Rawahi, A., Al Khiziri, S., Ullah, I., Ali, L., Jung, H. Y., & Lee, I. J. (2014). Bacterial endophyte *Sphingomonas* sp LK11 produces gibberellins and IAA and promotes tomato plant growth. *Journal of Microbiology*, 52(8), 689-695. <https://doi.org/10.1007/s12275-014-4002-7>
- Khan, Z., Rho, H., Firrincieli, A., Hung, S. H., Luna, V., Masciarelli, O., Kim, S. H., & Doty, S. (2016). Growth enhancement and drought tolerance of hybrid poplar upon inoculation with endophyte consortia. *Current Plant Biology*, 6(1), 38-47.

- Kim, Y.-C., Glick, B. R., Bashan, Y., & Ryu, C.-M. (2012). Enhancement of plant drought tolerance by microbes. En R. Aroca (ed.), *Plant responses to drought stress* (pp. 383-413). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-32653-0_15
- Kumar, A., Patel, J. S., Meena, V. S., & Ramteke, P. W. (2019). Plant growth-promoting rhizobacteria: strategies to improve abiotic stresses under sustainable agriculture. *Journal of Plant Nutrition*, 42(11-12), 1402-1415. <https://doi.org/10.1080/01904167.2019.1616757>
- Lata, R., Chowdhury, S., Gond, S. K., & White, J. F. (2018). Induction of abiotic stress tolerance in plants by endophytic microbes. *Letters in Applied Microbiology*, 66(4), 268-276. <https://doi.org/10.1111/lam.12855>
- Li, W., Herrera-Estrella, L., Tran, L. S. P. (2016). The Yin-Yang of cytokinin homeostasis and drought acclimation/adaptation. *Trends Plant Science*, 21(7), 548-550.
- Lu, X., Liu, S. F., Yue, L., Zhao, X., Zhang, Y. B., Xie, Z. K., & Wang, R.Y. (2018). *Epsc* involved in the encoding of exopolysaccharides produced by *Bacillus amyloliquefaciens* FZB42 act to boost the drought tolerance of *Arabidopsis thaliana*. *International Journal of Molecular Sciences*, 219(12), 3795.
- Masciarelli, O., Llanes, A., & Luna, V. (2014). A new PGPR co-inoculated with *Bradyrhizobium japonicum* enhances soybean nodulation. *Microbiological Research*, 169(7-8), 609-615. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2013.10.001>
- Masood, A., Khan, M. I., Per, T. T., Asgher, A., Fatma, M., & Khan, N. A. (2016). Glycine betaine: role in shifting plants toward adaptation under extreme environment. En N. Iqbal, R. Nazar, & N. A. Khan (Eds.), *Osmolytes and plants acclimation to changing environment: Emerging Omics Technologies* (pp. 69-82). Springer.
- Mekureyaw, M. F., Pandey, C., Hennessy, R. C., Nicolaisen, M. H., Liu, F., Nybroe, O., & Roitsch, T. (2022). The cytokinin-producing plant beneficial bacterium *Pseudomonas fluorescens* G20-18 primes tomato (*Solanum lycopersicum*) for enhanced drought stress responses. *Journal of Plant Physiology*, 270(1), 26-38. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2022.153629>
- Mendoza-Labrador, J., Romero-Perdomo, F., Abril, J., Hernández, J. P., Uribe-Vélez, D., & Buitrago, R. B. (2021). *Bacillus* strains immobilized in alginate macrobeads enhance drought stress adaptation of Guinea grass. *Rhizosphere*, 19, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2021.100385>
- Morcillo, R. J. L., & Manzanera, M. (2021). The effects of plant-associated bacterial exopolysaccharides on plant abiotic stress tolerance. *Metabolites*, 11(6), 337. <https://doi.org/10.3390/metabo11060337>
- Moreno-Galván, A. E., Cortés-Patiño, S., Romero-Perdomo, F., Uribe-Vélez, D., Bashan, Y., & Bonilla, R. R. (2020). Proline accumulation and glutathione reductase activity induced by drought-tolerant rhizobacteria as potential mechanisms to alleviate drought stress in Guinea grass. *Applied Soil Ecology*, 147(1), 103367. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.103367>
- Moreno-Galván, A., Romero-Perdomo, F. A., Estrada-Bonilla, G., Meneses, C. H. S. G., & Bonilla, R. R. (2020). Dry-Caribbean *Bacillus* spp. strains ameliorate drought stress in maize by a strain-specific antioxidant response modulation. *Microorganisms*, 8(6), 823. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8060823>

- Müller, M., & Munné-Bosch, S. (2015). Ethylene response factors: a key regulatory hub in hormone and stress signalling. *Plant Physiology*, 169(1), 32-41. <https://doi.org/10.1104/pp.15.00677>
- Nett, R. S., Montanares, M., Marcassa, A., Lu, X., Nagel, R., Charles, T. C., Hedden, P., Rojas, M. C., & Peters, R. J. (2017). Elucidation of gibberellin biosynthesis in bacteria reveals convergent evolution. *Nature Chemical Biology*, 13(1), 69-74. <https://doi.org/10.1038/nchembio.2232>
- Ngumbi, E., & Kloepper, J. (2016). Bacterial-mediated drought tolerance: current and future prospects. *Applied Soil Ecology*, 105, 109-125. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2016.04.009>
- Pandey, G. K., Pandey, A., Prasad, M., & Böhmer, M. (2016). *Abiotic stress signaling in plants: functional genomic intervention*. Frontiers Media. <https://doi.org/10.3389/978-2-88919-891-7>
- Parwez, R., Aftab, T., Gill, S. S., & Naeem, M. (2022). Abscisic acid signaling and crosstalk with phytohormones in regulation of environmental stress responses. *Environmental and Experimental Botany*, 199(11), 104885. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2022.104885>
- Pedrosa Gomes, M., Smedbol, É., Mércia Lima Carvalho Carneiro, M., Souza Garcia, Q., & Juneau, P. (2014). Reactive oxygen species and plant hormones. En P. Ahmad (Ed.), *Oxidative damage to plants* (pp. 65-88). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-799963-0.00002-2>
- Qin, Y., Druzhinina, I. S., Pan, X., & Yuan, Z. (2016). Microbially mediated plant salt tolerance and microbiome-based solutions for saline agriculture. *Biotechnology Advances*, 34(7), 1245-1259. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2016.08.005>
- Radhakrishnan, R., Hashem, A., & Abd Allah, E. F. (2017). *Bacillus*: a biological tool for crop improvement through bio-molecular changes in adverse environments. *Frontiers in Physiology*, 8(9). <https://doi.org/10.3389/fphys.2017.00667>
- Riemann, M., Dhakarey, R., Hazman, M., Miro, B., Kohli, A., & Nick, P. (2015). Exploring jasmonates in the hormonal network of drought and salinity responses. *Frontiers in Plant Science*, 6(1), 1077. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.01077>
- Rio, L. A. del (2015). ROS and RNS in plant physiology: an overview. *Journal of Experimental Botany*, 66(10), 2827-37.
- Rodriguez-Salazar, J., Suárez, R., Caballero-Mellado, J., Iturriaga, G. (2009). Trehalose accumulation in *Azospirillum brasilense* improves drought tolerance and biomass in maize plants. *FEMS Microbiol Lett*, 296(1), 52-59.
- Salazar-Cerezo, S., Martínez-Montiel, N., García-Sánchez, J., Pérez-y-Terrón, R., & Martínez-Contreras, R. D. (2018). Gibberellin biosynthesis and metabolism: a convergent route for plants, fungi and bacteria. *Microbiological Research*, 208(1), 85-98. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2018.01.010>
- Saleem, A. R., Brunetti, C., Khalid, A., Della Rocca, G., Raio, A., Emiliani, G., De Carlo, A., Mahmood, T., & Centritto, M. (2018). Drought response of *Mucuna pruriens* (L.) DC. inoculated with ACC deaminase and IAA producing rhizobacteria. *Plos One*, 13(2), e0191218. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0191218>
- Sarma, R. K., & Saikia, R. (2013). Alleviation of drought stress in mung bean by strain *Pseudomonas aeruginosa* GGRJ21. *Plant and Soil*, 377(1-2), 111-126. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1981-9>

Capítulo XI. Bacterias endófitas de plantas: establecimiento de la interacción

- Shahzad, R., Khan, A. L., Bilal, S., Waqas, M., Kang, S. M., Lee, I. J. (2017) Inoculation of abscisic acid-producing endophytic bacteria enhances salinity stress tolerance in *Oryza sativa*. *Environmental and Experimental Botany*, 136(1), 68-77.
- Sharma, A., Shahzad, B., Kumar, V., Kohli, S. K., Sidhu, G. P. S., Bali, A. S., ..., & Zheng, B. (2019). Phytohormones regulate accumulation of osmolytes under abiotic stress. *Biomolecules*, 9(7), 1-36. <https://doi.org/10.3390/biom9070285>
- Suárez, R., Wong, A., Ramírez, M., Barraza, A., Orozco, M. C., Cevallos, M. A., Lara, M., Hernández, G., & Iturriaga, G. (2008). Improvement of drought tolerance and grain yield in common bean by overexpressing trehalose-6-phosphate synthase in rhizobia. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 21(7), 958-966.
- Sukumar, P., Legué, V., Vayssières, A., Martin, F., Tuskan, G. A., & Kalluri, U. C. (2013). Involvement of auxin pathways in modulating root architecture during beneficial plant-microorganism interactions. *Plant, Cell and Environment*, 36(5), 909-919. <https://doi.org/10.1111/pce.12036>
- Timmusk, S., Nevo, E. (2011). Plant root associated biofilms. En D. K. Maheshwari (Ed.), *Bacteria in agrobiology. Plant nutrient management* (Vol. 3) (pp. 285-300). Springer.
- Ullah, A., Nisar, M., Ali, H., Hazrat, A., Hayat, K., Keerio, A. A., Ihsan, M., Laiq, M., Ullah, S., Fahad, S., Khan, A., Khan, A. H., Akbar, A., & Yang, X. (2019). Drought tolerance improvement in plants: an endophytic bacterial approach. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 103(18), 7385-7397. <https://doi.org/10.1007/s00253-019-10045-4>
- Upadhyay, S., Singh, J., Singh, D. (2011). Exopolysaccharide-producing plant growth-promoting rhizobacteria under salinity condition. *Pedosphere*, 21(2), 214-222.
- Vardharajula, S., Zulfikar Ali, S., Grover, M., Reddy, G., Bandi, V., Sandhya, V., ..., & Bandi, V. (2011). Drought-tolerant plant growth promoting *Bacillus* spp.: effect on growth, osmolytes, and antioxidant status of maize under drought stress. *Journal of Plant Interactions*, 6(1), 1-14. <https://doi.org/10.1080/17429145.2010.535178>
- Vurukonda, S. S. K. P., Vardharajula, S., Shrivastava, M., SkZ, A. (2016). Enhancement of drought stress tolerance in crops by plant growth promoting rhizobacteria. *Microbiological Research*, 184(1), 13-24. <http://dx.doi.org/10.1016/j.micres.2015.12.003>
- Yegorenkova, I., Konnova, S., Sachuk, V., Ignatov, V. (2001). *Azospirillum brasilense* colonisation of wheat roots and the role of lectin-carbohydrate interactions in bacterial adsorption and root-hair deformation. *Plant and Soil*, 231(2), 275-282.
- Zarattini, M., & Forlani, G. (2017). Toward unveiling the mechanisms for transcriptional regulation of proline biosynthesis in the plant cell response to biotic and abiotic stress conditions. *Frontiers in Plant Science*, 8(6), 1-8. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00927>
- Zhao, Y. (2010). Auxin biosynthesis and its role in plant development. *Annual Review of Plant Biology*, 61(1), 49-64. <https://doi.org/10.1146/ANNUREV-ARPLANT-042809-112308>
- Zhou, M. L., Zhang, Q., Sun, Z. M., Chen, L. H., Liu, B. X., Zhang, K. X., Zhu, X. M., Shao, J. R., Tang, Y. X., & Wu, Y. M. (2014). Trehalose metabolism-related genes in maize. *Journal of Plant Growth Regulation*, 33(2), 256-271. <https://doi.org/10.1007/s00344-013-9368-y>





Los autores

Edwin Andrés Villagrán Munar

Investigador máster sénior • Centro de Investigación Tibaitatá - AGROSAVIA

evillagran@agrosavia.co

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

Ingeniero agrícola. Magíster en Ingeniería Agrícola de la Universidad Nacional de Colombia y candidato a doctor en Ciencias Ambientales y Sostenibilidad. Actualmente, se desempeña como investigador máster sénior de AGROSAVIA y cuenta con diez años de experiencia en investigación en sistemas de producción hortícola y ornamental bajo estructuras de agricultura protegida. También cumple el papel de coordinador técnico de estructuras de agricultura protegida de AGROSAVIA.

Linda Gómez Arias

Investigadora máster • Centro de Investigación Tibaitatá - AGROSAVIA

lygomez@agrosavia.co

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

Ingeniera de Producción Biotecnológica de la Universidad Francisco de Paula Santander, con maestría en Ciencias Biológicas de la Pontificia Universidad Javeriana, con énfasis en Biotecnología Vegetal. Investigadora máster con experiencia en genética molecular vegetal, cultivo de tejidos vegetales, formulación y participación en proyectos de investigación, estandarización de protocolos de micropropagación vegetal, limpieza de virus y producción de material de siembra *in vitro*. Actualmente, se desempeña como coordinadora técnica de la Red de Laboratorios de Producción Vegetal de AGROSAVIA.

Douglas Andrés Gómez Latorre

Investigador máster • Centro de Investigación Tibaitatá - AGROSAVIA

dagomez@agrosavia.co

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-6067-7596>

Ingeniero catastral y geodesta, y magíster en Ciencias-Meteorología. Investigador en el área de Agroclimatología del Centro de Investigación Tibaitatá de AGROSAVIA. Su trabajo se ha focalizado en el modelamiento espacial y el análisis del riesgo agroclimático, así como en el área de climatología aplicada a la agricultura. En la actualidad, se enfoca en el desarrollo de sistemas de soporte a la toma de decisiones (SSTD), integrando el uso de predicciones climáticas, modelos de simulación de cultivo y opciones de manejo cultural resilientes.

Yeni Rodríguez Giraldo

Investigadora máster • Centro de Investigación Tibaitatá - AGROSAVIA

yrodriguezr@agrosavia.co

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-2024-8153>

Química industrial, especialista en Planeación Ambiental y Manejo Integral de Recursos Naturales, magíster en Ciencias Agronómicas con énfasis en Ciencias del Suelo y Recursos Naturales, con experiencia en análisis instrumental en el área de suelos, tejido vegetal, aguas, abonos orgánicos y alimentos. Cuenta con formación y experiencia en la implementación de pruebas de validación y desarrollo de técnicas analíticas, y con la capacidad para implementar un sistema de gestión de calidad bajo las normas ISO 9001 e ISO/IEC 17025 en laboratorios lácteos, ambientales y agropecuarios. Línea de investigación enfocada en análisis e interpretación de las propiedades fisicoquímicas del suelo y en el estudio de metales pesados en suelos, tejido vegetal, aguas, abonos orgánicos y alimentos.

Iván Edilberto Chacón Garzón

Profesional de apoyo a la investigación • Centro de Investigación Tibaitatá - AGROSAVIA

ichacon@agrosavia.co

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-1644-5541>

Ingeniero mecánico con experiencia en ejecución de proyectos de investigación, con capacidad para planear, diseñar, dirigir, tecnificar y mantener proyectos o plantas de producción. Durante sus cinco años de carrera profesional se ha desempeñado como profesional de apoyo a la investigación en AGROSAVIA en proyecto de mecanización agrícola y agroindustrial.

Stephanie Johana Numa Vergel

Investigadora Máster • Centro de Investigación Tibaitatá - AGROSAVIA

snuma@agrosavia.co

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-0071-6458>

Bióloga con especialización en Planeación Ambiental y Manejo Integral de los Recursos Naturales. Magíster en Biología Aplicada, con experiencia en formulación y ejecución de proyectos de investigación. Actualmente, se encuentra vinculada como investigadora máster, desempeñando el papel de coordinadora de la Red de Laboratorios de Entomología de AGROSAVIA, con experiencia en la evaluación del comportamiento de abejas en laboratorio, manejo integrado de plagas (MIPE) en cultivos de flores, formulación y control de calidad de dietas artificiales para insectos, crías de artrópodos en laboratorio e invernadero, y modelamiento de sistemas biológicos con el fin de desarrollar programas de manejo integrado de plagas, para ofrecer a los productores recomendaciones aplicables en sus sistemas productivos.

Fabián Andrés Velásquez Ayala

Profesional de apoyo a la investigación • Centro de Investigación Tibaitatá - AGROSAVIA

favelasquez@agrosavia.co

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-1535-3549>

Ingeniero agroindustrial de la Universidad del Tolima, candidato a magíster en la Universidad Nacional de Colombia (Bogotá). Actualmente, vinculado a AGROSAVIA en el Centro de Investigación Tibaitatá, donde ha desarrollado proyectos de investigación en el área de ingeniería de procesos. Cuenta con cinco años de experiencia en investigaciones relacionadas con modelación matemática y simulación de procesos, combustión de biomasa, manejo de energía y manejo poscosecha de alimentos. Ha participado en proyectos que incluyen el diseño y evaluación de equipos para módulos de producción de azúcar no centrifugada de caña. Es profesional de apoyo a la investigación adscrito a la red de cultivos transitorios de AGROSAVIA.

John Javier Espitia González

Profesional de Apoyo a la Investigación • Centro de Investigación Tibaitatá - AGROSAVIA

jjespitia@agrosavia.co

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-2684-655X>

Ingeniero mecánico, magíster en Energías Renovables y Sostenibilidad Energética, e investigador júnior (IJ). Ha desarrollado diseño, tecnificación y mantenimiento de plantas de producción. Se ha desempeñado en AGROSAVIA en proyectos relacionados con diseño de maquinaria agrícola, industrial y agroindustrial. Actualmente, es profesional de apoyo a la investigación, adscrito a la Red de Innovación de Cacao, desarrollando proyectos de investigación en el área de ingeniería de procesos.

Diego Alejandro Salinas Velandia

Profesional de apoyo a la investigación • Centro de Investigación Tibaitatá - AGROSAVIA

dsalinas@agrosavia.co

Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-9108-6791>

Magíster en Estudios Interdisciplinarios del Desarrollo, con título de ingeniero agrónomo, y experiencia en gestión y ejecución de proyectos de investigación con participación interinstitucional en el sector agropecuario. Miembro de la Red de Hortalizas y Plantas Aromáticas en AGROSAVIA, actualmente desarrolla tres líneas de investigación: competitividad en el sector agropecuario, sistemas agroalimentarios y desarrollo sostenible.

Julio Ricardo Galindo Pacheco

Investigador PhD • Centro de Investigación Tibaitatá - AGROSAVIA

jgalindo@agrosavia.co

<https://orcid.org/0000-0002-8240-6957>

Ingeniero agrónomo, especialista en Estadística y doctorado en Fisiología de Cultivos de la Universidad Nacional de Colombia. Perteneciente a la Red de Hortalizas y Plantas Aromáticas de AGROSAVIA. Se desempeña en las líneas de investigación en agricultura vertical, nutrición vegetal, inocuidad y horticultura, con experiencia en implementación de buenas prácticas agrícolas. Asimismo, posee habilidades en análisis estadístico aplicado en agricultura, programación y análisis en Python, R y S.A.S.

Adriana Marcela Santos-Díaz

Investigadora máster sénior • Centro de Investigación Tibaitatá - AGROSAVIA

asantos@agrosavia.co

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-3248-7322>

Magíster en Ciencias Bioquímicas de la Universidad Nacional de Colombia y microbióloga industrial de la Pontificia Universidad Javeriana. Investigadora máster sénior de AGROSAVIA, donde se desempeña desde 2014 como coordinadora técnica de la Red de Laboratorios de Microbiología Agrícola. Cuenta con más de diez años de experiencia liderando procesos de registro de laboratorios de control de calidad de bioinsumos agrícolas (bioplaguicidas e inoculantes biológicos). Ha participado en diferentes proyectos de investigación enfocados en la búsqueda, la selección y el desarrollo de productos biológicos a base de bacterias, hongos y virus.

Sandra Valbuena Aguilar

Profesional de apoyo de laboratorio • Centro de Investigación Tibaitatá - AGROSAVIA

svalbuena@agrosavia.co

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-1851-781X>

Bióloga con conocimiento en manejo y aplicación de técnicas *in vitro* en el campo de la biotecnología vegetal, enfocada en el estudio y manejo de recursos genéticos vegetales, agrosilvestres y de importancia ecológica. Cuenta con formación académica con énfasis en el manejo de recursos naturales, su preservación y sostenibilidad. Experiencia en técnicas de producción de material vegetal *in vitro* de especies agronómicas, exóticas y nativas.

Tatiana Miranda Salas

Profesional de apoyo a la investigación • Centro de Investigación Tibaitatá - AGROSAVIA

tmiranda@agrosavia.co

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-4324-3662>

Ingeniera agrónoma, especialista en Gestión de Proyectos de la Universidad de los Llanos. Ha trabajado en investigación en el área sanitaria de sistemas productivos de maracuyá, plátano y cacao; asimismo, en manejo agronómico del sistema productivo del plátano, métodos de multiplicación de semilla, caracterización del sistema productivo y desarrollo rural. Se ha desempeñado como asistente técnico en los cultivos de maracuyá y guayaba-pera. Actualmente, se desempeña como profesional de apoyo a la investigación del Departamento de Agrobiodiversidad adscrita a la Red de Frutales de AGROSAVIA.

Gabriela Toro-Tobón

Profesional de apoyo a la investigación • Centro de Investigación Tibaitatá - AGROSAVIA

gtorot@agrosavia.co

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-7208-1028>

Bióloga y magíster en Ciencias Biología de la Universidad Nacional de Colombia. Actualmente es profesional de apoyo a la investigación en el Centro de Investigación Tibaitatá de AGROSAVIA. Tiene experiencia en fisiología vegetal y evaluación de estrés abiótico en plantas, especialmente en especies forrajeras y frutales.

Carolina Pachón-Venegas

Tesista de maestría • Centro de Investigación Tibaitatá - AGROSAVIA

cpachon@agrosavia.co

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-1560-1410>

Bióloga y candidata a magíster en Ciencias-Biología de la Universidad Nacional de Colombia. Beneficiaria de la beca Auxiliar Docente 2021-II. Miembro del grupo de investigación en Sistemas Agropecuarios Sostenibles de AGROSAVIA, donde desarrolla su tesis de maestría. Ha trabajado como asesora técnica en el proyecto "Trazas, oficios y territorios", y fue coautora de la publicación homónima.

Daniel Torres-Cuesta

Profesional de apoyo a la investigación • Centro de Investigación Tibaitatá - AGROSAVIA

dtorres@agrosavia.co

Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-9101-0543>

Magíster en Ciencias Agrarias con énfasis en suelos y aguas de la Universidad Nacional de Colombia. Ingeniero en Agroecología de la Universidad Minuto de Dios. Profesional de apoyo a la investigación en AGROSAVIA, con experiencia en evaluación agronómica de pastos y forrajes, recuperación de suelos y praderas degradadas, establecimiento y manejo agronómico de cultivos forrajeros, manejo de la fertilización integral en cultivos forrajeros con el uso de bacterias solubilizadoras de fósforo y fuentes de fósforo de baja solubilidad.

Germán Estrada-Bonilla

Investigador PhD • Centro de Investigación Tibaitatá - AGROSAVIA

gaestrada@agrosavia.co

Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-8742-5957>

Doctor en Agronomía (Suelos y Nutrición de Plantas) de la Escuela Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, de la Universidad de São Paulo. Máster en Ciencias Agropecuarias (Fitotecnia) de la Universidad Federal Rural de Río de Janeiro y microbiólogo de la Pontificia Universidad Javeriana. Investigador en el área de microbiología de suelos en AGROSAVIA y presidente de la Asociación Latinoamericana de Rizobiología (ALAR) en Colombia. Desarrolla proyectos en el área de suelo-microorganismo-planta-ambiente, buscando, específicamente, mejorar la eficiencia de la fertilización y modular la respuesta de los cultivos al estrés abiótico. Tiene experiencia en el uso de bacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPB, por su sigla en inglés) y de residuos orgánicos en cultivos agroindustriales. Su objetivo es mejorar la competitividad de la agricultura en Colombia, utilizando la microbiología del suelo como eje de innovación.

Fagua Álvarez-Flórez

Bióloga PhD • Laboratorio de Fisiología y Bioquímica Vegetal,

Universidad Nacional de Colombia - sede Bogotá

falvarez@unal.edu.co

Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-8897-2047>

Bióloga de la Universidad Nacional de Colombia con Maestría en Bioquímica Experimental y Doctorado en Biología Vegetal de la Universidad de Barcelona, y Postdoctorado en el Center for Research in Agrigenomic (CRAG). Profesora de la Universidad de Barcelona y de la Universidad de Vic (Barcelona, España). Coordinadora del Laboratorio de Cultivo de Tejidos Vegetales en el Departamento de Biología de la Universidad Nacional de Colombia.

Valerin A. Aguirre-Franco

Tesista • Centro de Investigación Tibaitatá - AGROSAVIA

aaguirre@agrosavia.co

Orcid: <https://orcid.org/0009-0001-8382-363X>

Estudiante de Biología con énfasis en Gestión y Conservación Ambiental de la Universidad El Bosque. Certificada en estudio de biología del suelo centrado en la dinámica de poblaciones microbianas y faunísticas. Tiene experiencia en monitoreo ecosistémico sustentable e implementación de técnicas moleculares para el estudio de interacciones bacteria-planta.

Juan S. Garcerá-Riaño

Practicante • Centro de Investigación Tibaitatá - AGROSAVIA

juanhkhjk@hotmail.com

Estudiante de Microbiología Industrial de la Pontificia Universidad Javeriana sede Bogotá. Cuenta con experiencia en análisis microbiológicos y metagenómicos encaminados al estudio de la diversidad bacteriana y tipificación de estos microorganismos según su afinidad por distintos sustratos esenciales para el desarrollo celular.

Jonathan A. Mendoza-Labrador

Investigador máster • Centro de Investigación Tibaitatá - AGROSAVIA

jamendoza@agrosavia.co

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-5863-6365>

Máster en Ciencias con énfasis en Microbiología de la Universidad Nacional de Colombia e ingeniero en Biotecnología de la Universidad Francisco de Paula Santander. Actualmente es investigador máster en el Centro de Investigación Tibaitatá de AGROSAVIA. Cuenta con experiencia en la caracterización fenotípica y la formulación de bioproductos inmovilizados en microesferas de alginato a base de bacterias promotoras de crecimiento vegetal.

Paola J. Criollo-Campos

Investigadora máster • Centro de Investigación Tibaitatá - AGROSAVIA

pcriollo@agrosavia.co

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-8623-2536>

Máster en Ciencias Ambientales de la Universidad Jorge Tadeo Lozano y bióloga de la Universidad del Tolima. Actualmente, se desempeña como investigadora máster en el Centro de Investigación Tibaitatá de AGROSAVIA. Cuenta con amplia experiencia en aislamiento, conservación y descripción de bacterias simbióticas fijadoras de nitrógeno tipo rizobios y en la determinación enzimática de parámetros de calidad del suelo. Está capacitada en formulación y ejecución de proyectos de investigación, enfocados en mejorar las condiciones del agro colombiano.

Sergio Pardo-Díaz

Investigador máster • Centro de Investigación Tibaitatá - AGROSAVIA

spardo@agrosavia.co

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-3873-1891>

Máster en Ciencias Biológicas y microbiólogo agrícola y veterinario de la Pontificia Universidad Javeriana. Sus principales áreas de experiencia están enfocadas en microbiología de suelos, biorremediación y biología molecular relacionada con ecología microbiana. Actualmente, se desempeña como investigador máster en el Centro de Investigación Tibaitatá de AGROSAVIA, donde desarrolla un trabajo en diversidad microbiana en suelos de cultivos de interés agrícola y en producción de enmiendas orgánicas para disminuir el impacto generado por la aplicación de fertilizantes de síntesis química.

Daniel F. Rojas-Tapias

Investigador PhD • Centro de Investigación Tibaitatá - AGROSAVIA

dfrojas@agrosavia.co

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-4051-7907>

Doctor en Microbiología Molecular de la Cornell University, máster en Ciencias Biológicas de la Universidad de los Andes y microbiólogo industrial y matemático de la Pontificia Universidad Javeriana. Realizó su entrenamiento posdoctoral en el Programa de Enfermedades Infecciosas y Microbioma del Broad Institute of MIT and Harvard. Sus principales áreas de experticia son la microbiología, la interacción huésped-hospedero y la biología molecular. Actualmente, se desempeña como investigador PhD en el Centro de Investigación Tibaitatá de AGROSAVIA, donde enfoca su investigación en los aspectos moleculares de la interacción planta-microorganismo y en la bioprospección y aprovechamiento de la diversidad microbológica del suelo para la recuperación de suelos agrícolas impactados por estreses abióticos.

Andrés E. Moreno-Galván

Investigador máster • Centro de Investigación Tibaitatá - AGROSAVIA

aemoreno@agrosavia.co

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-9264-6663>

Máster en Ciencias con énfasis en microbiología de la Universidad Nacional de Colombia y microbiólogo industrial de la Pontificia Universidad Javeriana. Cuenta con experiencia en investigación enfocada en la mitigación de estreses abióticos en plantas mediante bioestimulación bacteriana. Dentro de sus áreas de experiencia se encuentran la microbiología, la bioprospección de diversidad microbiana y la fisiología vegetal de la interacción planta-microorganismo. En la actualidad, se desempeña como investigador máster en el Centro de Investigación Tibaitatá de AGROSAVIA, adelantando proyectos enfocados en la mitigación de efectos del cambio climático en la agricultura mediante el estudio de la interacción suelo-planta-microorganismo-ambiente.

Mauricio Camelo-Rusique

Investigador Máster • Centro de Investigación Tibaitatá - AGROSAVIA

mcamelor@agrosavia.co

Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-8733-6655>

Máster en Biología Aplicada de la Universidad Militar y microbiólogo industrial de la Pontificia Universidad Javeriana. Se desempeña como investigador máster en el Centro de Investigación Tibaitatá de AGROSAVIA. Cuenta con catorce años de experiencia en investigación y desarrollo de bioproductos a base de bacterias promotoras del crecimiento vegetal. También posee amplia y reconocida experiencia en la formulación y ejecución de proyectos de investigación nacionales e internacionales que han tenido como objetivo demostrar la eficiencia y eficacia de los biofertilizantes en diferentes cultivos de interés agroindustrial.

Lady R. Molano-Chávez

Profesional de apoyo a la investigación • Centro de Investigación Tibaitatá - AGROSAVIA

lmolano@agrosavia.co

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-8640-4051?lang=en>

Administradora de empresas de la Universidad Minuto de Dios y técnica en Producción Agropecuaria del Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA). Actualmente, se desempeña como profesional de apoyo a la investigación en AGROSAVIA. Cuenta con experiencia en el seguimiento administrativo y ejecución presupuestal de proyectos de investigación a nivel nacional y de cooperación técnica internacional asociados al uso de herramientas biotecnológicas para el desarrollo de biofertilizantes. Tiene conocimientos en redacción científica, elaboración de inventarios de colecciones bacterianas, montajes experimentales en laboratorio-invernadero-campo, revisión de artículos sobre bacterias promotoras de crecimiento vegetal y en procesos de obtención de registros ante el ICA.

Ruth R. Bonilla-Buitrago

Investigadora PhD sénior • Centro de Investigación Tibaitatá - AGROSAVIA

rbonilla@agrosavia.co

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-2542-0194>

Doctora en Ciencias Agrícolas y máster en Química Agrícola de la Universidad de Agricultura de Varsovia. Licenciada en Química y Biología de la Universidad de La Salle. Actualmente es investigadora PhD sénior de AGROSAVIA, donde es líder del grupo de investigación Sistemas Agropecuarios Sostenibles. Ha formulado y desarrollado proyectos de investigación y transferencia nacionales e internacionales en el área de biofertilización. Posee más de 60 publicaciones en revistas de alto impacto y ha generado productos para el sector agropecuario: Monibac y el Álbum Élite de microorganismos caracterizados fenotípicamente y genotípicamente. Ha contribuido con la formación de recursos humanos a nivel de pregrado, maestría y doctorado. Es revisora de revistas científicas de Springer y Frontiers. Es integrante del Comité Científico de Porkcolombia.

Este libro aborda algunos conceptos técnicos sobre estrategias productivas existentes para mejorar la adaptación y mitigación al cambio climático en cultivos de interés y que pueden ser aplicadas en cultivos establecidos en el trópico alto colombiano. Primero, se presentan algunas generalidades de la relación entre agricultura y cambio climático, destacando los desafíos y las oportunidades que enfrenta el sector agrícola en este contexto. Luego, se profundiza en las características y los usos de los invernaderos en Colombia, así como su importancia y aplicaciones en la producción agrícola, y se establecen criterios para la selección y el diseño de invernaderos, que permiten maximizar su eficiencia, adaptabilidad y funcionalidad a las condiciones climáticas del trópico alto. Asimismo, se brinda información esencial sobre sistemas de climatización activa y pasiva, destacando su relevancia y eficiencia en el control y la gestión microclimática en el interior de los invernaderos. Además, se muestran resultados de un modelo de producción de agricultura vertical que se plantea como una alternativa innovadora para optimizar e intensificar la producción hortícola. De otro lado, se mencionan algunos conceptos de interés para el uso de invernaderos en prácticas como el endurecimiento de especies vegetales y la cría de insectos, resaltando su importancia en la producción agrícola sostenible. Por último, se dan a conocer técnicas biotecnológicas para enfrentar las condiciones de sequía, que ofrecen soluciones innovadoras y prometedoras para diferentes tipos de cultivos en áreas que pueden verse afectadas por la escasez de agua debido a los efectos adversos generados por el cambio climático.

AGROSAVIA

Corporación colombiana de investigación agropecuaria

Centro de Investigación Tibaitatá. Km 14 vía Mosquera-Bogotá, Cundinamarca.
Código postal 250047, Colombia.

Línea de atención al cliente: 018000121515 atencionalcliente@agrosavia.co

<http://www.agrosavia.co/>