

**Perspectivas de la Horticultura Protegida en Villavicencio (Meta): un Enfoque
Sostenible para el Desarrollo Agrícola**

Oscar Iban Hernández Castañeda

Ingeniero Agrónomo

Requisito parcial para optar al título de
Especialista Tecnológico en Horticultura Protegida

Director

Luis Alejandro Arias Rodríguez

Ingeniero Agrónomo, M.Sc., Ph.D.

Especialización Tecnológica en Horticultura Protegida

Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería

Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano

Diciembre de 2024

Tabla de contenido

Introducción	5
La horticultura protegida	7
Invernaderos	9
Invernaderos	9
Invernaderos semi climatizados	9
Invernaderos no climatizados o cubiertas	9
Contexto de la horticultura nacional, departamental y municipal	10
Descripción edafoclimática del municipio de Villavicencio	14
Capacidad de uso de los suelos	14
Clima	16
Precipitaciones	16
Temperatura	17
Humedad relativa	18
Días de lluvia	19
Horas de sol	19
Velocidad del viento	20
Luz diaria integral	22
Ecosistemas	22
Paisaje y usos principales del suelo	23
Desarrollo de la horticultura protegida en Colombia, en el departamento y en el municipio de Villavicencio	25
Aspectos técnicos de la horticultura protegida	26
Selección de invernaderos	26
Invernadero tipo túnel	26
Invernadero tipo semitúnel	26
Invernadero tipo capilla	26
Invernadero plano	27
Invernadero tipo diente de sierra	27
Invernadero de cristal o tipo venlo	27
Parámetros para tener en cuenta en la construcción de un invernadero	27
Tipo de cubierta	27

Clima	29
Suelos	29
Dimensiones	29
Dirección de los vientos	30
Ubicación	30
Orientación	31
Impacto Socioambiental	31
Estudios de Caso	33
Desafíos y Oportunidades	36
Conclusiones	40
Bibliografía	41

Lista de Figuras

Figura 1. Capacidad de uso del suelo para el municipio de Villavicencio-Meta	14
Figura 2. Régimen de precipitación para el municipio de Villavicencio-Meta	17
Figura 3. Régimen de temperatura para el municipio de Villavicencio-Meta.....	18
Figura 4. Régimen de humedad relativa para el municipio de Villavicencio-Meta.	18
Figura 5. Régimen de temperatura para el municipio de Villavicencio-Meta.....	19
Figura 6. Régimen de brillo solar respecto a la precipitación para el municipio de Villavicencio-Meta	20
Figura 7. Régimen de la velocidad de los vientos para el municipio de Villavicencio-Meta	21
Figura 8. Rosa de los vientos para el municipio de Villavicencio-Meta	21
Figura 9. Luz diaria integral para el municipio de Villavicencio-Meta	22
Figura 10. Ecosistemas y zonas de vida Holdridge para el municipio de Villavicencio-Meta	23
Figura 11. Principales paisajes para el municipio de Villavicencio-Meta.....	24
Figura 12. Usos principales del suelo para el municipio de Villavicencio-Meta.....	24

Lista de Tablas

Tabla 1. Tipo de producción de hortalizas en el departamento del Meta, 2022	12
Tabla 2. Área de producción (ha) de hortalizas en el departamento del Meta, 2022	12
Tabla 3. Último año registrado de producción de hortalizas en el departamento del Meta	13
Tabla 4. Usos recomendados para las clases de suelo según su capacidad de uso	15
Tabla 5. Propiedades de los diferentes plásticos usados para cubiertas	28
Tabla 6. Características de los plásticos de polietileno	28
Tabla 7. Conteo de los productos hortícolas cultivados en huertos en el municipio de Villavicencio-Meta	38
Tabla 8. Condiciones de temperatura y DLI para las hortalizas sembradas en el municipio de Villavicencio- Meta	39

Introducción

La superficie de tierra destinada para la agricultura es de aproximadamente 5.000 megahectáreas (Mha), es decir, un 38 % de la superficie de tierra en el mundo; de esta superficie, un tercio se utiliza como tierra de cultivo, mientras que los dos tercios restantes son praderas y pastizales para el pastoreo (FAO, 2020). La presión ejercida sobre la tierra aumenta a medida que la población mundial se expande, se incrementa la demanda de alimentos, pero se limita el acceso a las tierras cultivables per cápita. De acuerdo con las cifras del Grupo Banco Mundial, para el año 2010, la población mundial era de 6,97 mil millones de habitantes, y para ese año, a cada habitante le correspondía unas 0,2 hectáreas de tierra cultivable, 0,02 hectáreas más de lo que correspondía al año 2021 con sus 7,89 mil millones de habitantes. Actualmente, son más de 8 mil millones de habitantes para alimentar y el acceso a la tierra cultivable está en decremento.

Según la FAO, (2021), el crecimiento de la población urbana en la última década ha sido del 4% de la población mundial, inversamente proporcional a la población rural. Esta tendencia se debe a los medios de vida rurales que son más vulnerables y enfrentan importantes rezagos y brechas en sus indicadores de desarrollo; sin embargo, es en estos territorios es donde se da la mayor producción de alimento en el mundo, según este mismo informe, en los territorios rurales de América Latina y el Caribe se producen alimentos para más de 800 millones de personas; se siembra el 14 % de los cultivos del mundo; se alberga gran parte de la biodiversidad global, el agua dulce y los bosques naturales del planeta; se produce la mitad de la energía de la región y se proveen servicios ecosistémicos de los que dependen las ciudades. Sin embargo, la urbanización está impulsando cambios en los sistemas agroalimentarios que afectan la disponibilidad y asequibilidad de dietas saludables, desde la producción, la elaboración, la distribución y la adquisición de alimentos hasta el comportamiento de los consumidores (FAO, 2023).

En la actualidad, la agricultura enfrenta el desafío de producir más alimentos en menor espacio, para una población que crece desmesuradamente y que ha generado un impacto negativo sobre la manera en que se producen los alimentos en el planeta, debido a las emisiones de gases efecto invernadero (GEI) que genera esta actividad y a la deforestación. Según las cifras del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2023), en el 2019, las actividades agrícolas generaron aproximadamente el 22% de las emisiones de gases de efecto invernadero, y de acuerdo con la FAO, (2021), la expansión agrícola causa cerca del 90% de la deforestación mundial; contribuyendo así, en gran medida, al calentamiento global y al cambio climático.

La crisis global del cambio climático afecta directamente al ser humano y a la producción agropecuaria; esta altera los ciclos del agua, generando ciclos extremos de alta precipitación y de sequía, el ser humano y demás seres vivos se exponen a nuevas plagas y enfermedades a causa del incremento de las temperaturas, entre otros que vulneran la seguridad alimentaria de la población mundial y principalmente el acceso al agua, ya que la agricultura es el mayor consumidor de agua dulce en el mundo absorbiendo más del 70% del agua extraída, y, en general, el 41% de las extracciones no son compatibles con el sostenimiento de los servicios ecosistémicos (FAO, 2023).

Bajo este panorama, la producción agrícola presenta múltiples retos de producir más alimentos en condiciones hostiles, incrementar la producción por unidad de área, a fin de alimentar a una población creciente, con baja mano de obra, y ha de contribuir al desarrollo global de los numerosos países en desarrollo dependientes de la agricultura, adoptar métodos de producción más eficaces y sostenibles y adaptarse al cambio climático. Es así como, teniendo en cuenta este contexto, y llevándolo a una escala local, el objetivo del presente trabajo fue determinar diferentes perspectivas para el desarrollo de la horticultura protegida en Villavicencio (Meta) bajo un enfoque sostenible, con el fin de aportar al desarrollo agrícola de la región. Para lo cual, se analizaron los beneficios y desafíos de la

horticultura protegida en zonas de clima cálido tropical, se identificaron las principales especies hortícolas cultivadas bajo las condiciones agroecológicas del municipio de Villavicencio (Meta) y finalmente se evaluaron las zonas agroecológicas óptimas de Villavicencio (Meta) para la implementación de la horticultura protegida en el municipio.

La horticultura protegida

La horticultura viene del latín *hortus* = jardín + *cultura* = cultivar, es definida como el arte y la ciencia de cultivar vegetales, hierbas, plantas ornamentales y frutales. Se distingue de la agricultura por exhibir prácticas especializadas y por las dimensiones de menor escala en que se desarrollan (Leguizamón, 2018), sin dejar de ser una actividad agrícola. Sus orígenes se remontan cuando el hombre aprendió a cultivar, al establecerse en sociedades sedentarias, que los obligó a modificar el ambiente donde se asentaban, implementando sistemas de riego y a obtener cultivos con mejores características organolépticas conforme a la selección y conservación de semillas e implementado sistemas productivos, permitiendo de esta manera producir y sostener poblaciones más numerosas (Leguizamón, 2018). En la actualidad, la población mundial supera los 8 mil millones de personas, y los asentamientos urbanos abarcan alrededor del 57% de la población mundial que requiere ser abastecida para suplir las necesidades alimentarias.

Los sistemas de cultivo a campo abierto están sometidos a factores meteorológicos adversos como son: las variaciones climáticas de altas y bajas temperaturas, fuertes precipitaciones y sequías, el surgimiento de nuevas plagas y enfermedades, la degradación de los suelos y la escasez de agua que generan un alto grado de incertidumbre y un aumento del riesgo para la producción agrícola (Jaramillo, *et al.*, 2013). Se estima que las plagas destruyen cada año hasta un 40% de la producción mundial en los cultivos, mientras que las enfermedades que padecen los cultivos cuestan anualmente más de 220.000 millones de dólares, y los insectos invasores al menos 70.000 millones de dólares, en el mundo (FAO, 2021); adicionalmente, el

incremento de la temperatura, a causa del calentamiento global, incide significativamente en los rendimientos de los cultivos. El incremento de 1 °C redujo los rendimientos de maíz en un $7,5\pm 5,9\%$, en trigo en un $6,0\pm 3,3\%$, en soya en un $6,8\pm 5,9\%$ y en arroz en un $1,2\pm 5,2\%$ en el mundo (Hu, *et al.*, 2024). También, el calentamiento global puede alterar los brotes de aparición de nuevas cepas patógenas y aumentar la propagación de enfermedades hacia nuevas áreas (Singh, *et al.*, 2023). Aunado a esto, la degradación de la tierra en los próximos 25 años podría reducir la producción mundial de alimentos en más de un 12%, incrementando así en un 30% en los precios de los alimentos (UNCCD, 2014).

Por lo anterior, la horticultura protegida surge como una alternativa tecnológica que va hacia el camino de la adaptación frente a estos desafíos de la agricultura en la actualidad (Samanta, *et al.* 2023). La horticultura protegida se conoce también como agricultura bajo cubierta. Consiste en la implementación de técnicas y tecnologías que consiguen modificar total o parcialmente las variables ambientales, creando ambientes controlados que protegen a los cultivos de las fluctuaciones de temperatura, los cambios climáticos y las amenazas de plagas, permitiendo de esta manera obtener una producción fuera de temporada, incrementando la producción y mejorando el rendimiento en los cultivos (Jaramillo, *et al.*, 2013).

Los términos horticultura o agricultura protegida, hace alusión también al uso de estructuras que permitan dar cierta protección a los cultivos de las condiciones ambientales, sea la exposición a la luz, la lluvia, la temperatura, entre otras, con el fin de variar estas condiciones y lograr optimizar su producción. De acuerdo con Jaramillo, *et al.*, 2013, estas estructuras se pueden clasificar en dos tipos: invernaderos y cubiertas. La horticultura protegida bajo invernadero es una actividad que ha crecido en los últimos 20 años (Jaramillo, *et al.*, 2013). Actualmente, conforme al estudio realizado por la Universidad de Copenhague en 2024, mediante análisis de imágenes satelitales, 1,3 millones de hectáreas de la superficie terrestre se encuentran bajo sistemas de cultivo protegido. De acuerdo con el estudio, China es el país con mayor superficie de tierra sembrada bajo invernadero con el 60,4%,

seguido de España e Italia con el 5,6% y el 4,1% respectivamente. A nivel de Latinoamérica, México se encuentra entre los diez primeros países con mayor superficie sembrada bajo invernadero con el 3,3%, ubicándose en la cuarta posición, y en Colombia, se estima que hay alrededor de 10 mil hectáreas (0,78%) sembradas bajo sistemas protegidos.

Invernaderos

Los invernaderos son estructuras livianas, cerradas con materiales transparentes, capaces de resistir la fuerza dinámica del viento y que en su interior es posible obtener unas condiciones artificiales de clima, que deben ser lo más próximas a las condiciones biológicas de desarrollo óptimo de la variedad cultivada, para maximizar los procesos de producción por metro cuadrado (Jaramillo, *et al.*, 2013). Jaramillo *et al.* (2013), distinguen tres tipos de invernadero en relación con el control de los factores meteorológicos, a saber:

Invernaderos climatizados: presentan todos los mecanismos electrónicos y mecánicos automatizados para el control de la temperatura, humedad relativa, concentración de CO₂ y luz.

Invernaderos semi climatizados: implementan algunos de los equipos para el manejo y control del clima dentro del invernadero. Estos no requieren de un control riguroso del clima para la producción debido al diseño o a las condiciones donde se instala.

Invernaderos no climatizados o cubiertas: estas estructuras solo incluyen la cobertura transparente usada bajo las especificaciones técnicas para el sitio de instalación de la cubierta. El manejo de las condiciones internas de temperatura y humedad relativa se gestiona mediante la ventilación natural.

El diseño y estructura del invernadero dependerá de las condiciones climáticas y la topografía de la región que condiciona la complejidad o sencillez de la estructura a implementar; pero este tema se tratará en los aspectos técnicos de la horticultura protegida.

Contexto de la horticultura nacional, departamental y municipal

La agricultura colombiana genera alrededor de 58,3 billones de pesos colombianos. En el segundo trimestre del 2024, tuvo una participación del 9,8% del Producto Interno Bruto (PIB) nacional, pasando, del séptimo lugar en 2023 con un 5,95%, a ocupar el cuarto eslabón entre las ramas económicas que mayor aporte le generó a la economía nacional, siendo los cultivos agrícolas sin café, la actividad de mayor participación en el sector con el 64,2% (UPRA, 2024).

Se estima que la frontera agrícola nacional para el año 2024 es de 42'944.940 ha del territorio continental nacional (UPRA, 2024) y de acuerdo con la encuesta nacional agropecuaria (ENA) realizada por el DANE, (2019), el uso total del suelo para el año 2019 fue de 50'102.269 hectáreas, predominando la actividad pecuaria con 39'017.179 hectáreas y una participación del 77,9%, seguido de los bosques con 5'175.846 hectáreas (10,3%), el uso agrícola con 4'617.116 hectáreas (9,2%) y otros usos con 1'292.128 hectáreas (2,6%).

Esta misma encuesta indicó que el área total sembrada en el país para el 2019 fue de 5'311.977 hectáreas, encontrando que, los cultivos agroindustriales presentaron la mayor participación con un 41,2%, seguido de los cereales con el 18,5% y las plantaciones forestales con el 13,5%; mientras que, grupos como tubérculos y plátanos, frutales y hortalizas, verduras y legumbres fueron los que menor participación tuvieron con un 10,8%, 9,5% y 5,4%, respectivamente, del área total sembrada.

En Colombia la comercialización hortícola se realiza vía terrestre sin refrigeración en su mayoría, procedente de la finca hacia la cabecera municipal, llegando a los centros mayoristas; sin embargo, el productor está sujeto al precio de oferta y demanda de los intermediarios (MADR, 2021) y su producción está conformada por más de 30 tipos de cultivos, destinada a satisfacer el mercado interno y el autoconsumo o de agricultura familiar. Los cultivos de arveja, tomate, cebolla de bulbo, zanahoria, ahuyama y cebolla de rama son los que mayor área de cosecha presentan; siendo el tomate, el cultivo con mayor volumen de producción, y con mayor rendimiento cuando se cultiva bajo cubierta (Minagricultura, 2021). Su producción se estima en alrededor de 75.676,97 ton ha⁻¹ en un área de 6.550,54 ha, siendo los departamentos de Cundinamarca (38,65%), Antioquia (22,47%), Huila (12,51%), Boyacá (7,86%) y Caldas (4,85%) los que mayor aporte generan a la producción nacional (Agronet, 2022).

En el departamento del Meta, la producción hortícola se reporta a partir del 2020, año en que se declara la emergencia sanitaria del COVID-19. Durante el primer semestre, se ofertó un total de 5.096 toneladas en hortalizas como tomate chonto, habichuela, pimentón, lechuga, cilantro, cebolla junca, ahuyama pepino cohombro y espinaca en la Central de Abastos de Villavicencio, con un aporte departamental del 2% (173 ton) (Gobernación del Meta, 2021). Para ese año, la producción hortícola en el departamento fue de 0,94 ton ha⁻¹ con un área de 1,4 ha, incrementando su producción en el 2022 en un 2.446,8% (23 ton ha⁻¹) y su área en 250% (3,5 hectáreas), reportándose en dos municipios: Cabuyaro y Restrepo, en Agronet; sin embargo, este reporte solo hace referencia a la categoría de hortalizas varias, por lo que no consideran otros tipos de productos hortícolas que se siembran en la región.

Al realizar la consulta en la base de datos estadísticos de Agronet, clasificando por categorías las hortalizas en frutos, hojas, tallos, raíces y tubérculos y semillas y legumbres, se obtiene la siguiente tabla de producción hortícola en el departamento del Meta para el año 2022:

Tabla 1. Tipo de producción de hortalizas en el departamento del Meta, 2022

Tipo de hortaliza	Hortaliza y legumbres	Area total (ha)	Produccion (Ton)	Rendimiento (Ton/ha)
Fruto	Ahuyama	794	11640	14,7
	Tomate	30,5	650,58	21,3
	Tomate invernadero	19	380	20
Hoja	Aromáticas	2,1	8,4	4
Tallos, raíces y tubérculos	Achira	47	93,55	2,0
	Yuca	7778	126220,7	16,2
Semillas	Arveja	70	84,29	1,2
	Frijol	1537	2708,19	1,8
Otros	Hortalizas varias	3,5	23	6,6
Total		10281,1	141808,71	13,8

Fuente: Elaboración propia.

En la anterior tabla se puede apreciar que, a nivel departamental, la producción total alcanzó las 141.808,71 ton en un área sembrada de 10.281,1 ha. Los principales productos ofertados son yuca y frijol, siendo los municipios de Fuente de Oro (1.900 ha en yuca) y San Juanito (840 ha en frijol) los que mayor área sembrada tuvieron para estos dos tipos de hortalizas.

Tabla 2. Área de producción (ha) de hortalizas en el departamento del Meta, 2022

Municipio	Achira	Ahuyama	Arveja	Frijol	Hortalizas Varias	Plantas aromáticas	Tomate	Tomate bajo cubierta	Yuca	Total genera
Acacias	-	-	-	-	-	-	-	-	14	14
Barranca de Upia	-	6	-	-	-	-	-	-	125	131
Cabuyaro	-	-	-	-	1,5	-	-	-	30	31,5
Castilla la Nueva	-	-	-	-	-	-	-	-	80	80
Cumaral	-	-	-	-	-	-	-	-	60	60
El Calvario	26	-	-	520	-	-	-	11	3	560
El Castillo	-	31	-	28	-	-	-	-	1122	1181
El Dorado	-	-	-	2	-	-	-	-	200	202
Fuente de Oro	-	25	-	-	-	-	-	-	1900	1925
Granada	-	-	-	-	-	-	-	-	925	925
Guamal	-	-	-	-	-	-	-	-	3	3
La Macarena	-	-	-	-	-	-	-	-	215	215
La Uribe	-	-	72	71	-	-	-	-	80	223
Lejanias	-	-	-	2	-	-	13	-	110	125
Mapiripan	-	-	-	-	-	-	-	-	400	400
Mesetas	-	-	-	-	-	-	-	-	70	70
Puerto Concordia	-	48	-	-	-	-	-	-	142	190
Puerto Gaitán	-	-	-	-	-	-	-	-	50	50
Puerto Lleras	-	100	-	-	-	-	-	-	700	800
Puerto López	-	-	-	-	-	-	-	-	135	135
Puerto Rico	-	43	-	-	-	-	-	-	432	475
Restrepo	8	-	-	-	2	2,1	-	-	50	62,1
San carlos de Guaroa	-	1	-	-	-	-	-	-	54	55
San Juan de Arama	-	-	-	-	-	-	-	-	176	176
San Juanito	13	-	-	840	-	-	-	8	-	861
San Martín	-	525	-	-	-	-	22	-	280	827
Villavicencio	-	-	-	-	-	-	-	-	151	151
Vista Hermosa	-	-	-	-	-	-	-	-	1087	1087
Total general	47	779	72	1463	3,5	2,1	35	19	8594	11014,6

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se mencionan otras hortalizas cultivadas en el departamento del Meta, relacionando el último año de registro en la red de información del sector agropecuario de Agronet con su área establecida y producción obtenida por municipio.

Tabla 3. Último año registrado de producción de hortalizas en el departamento del Meta

Municipio	Tipo de hortaliza	Hortaliza y legumbres	Último reporte de siembra y producción	Area (ha)	Producción (Ton)
El Castillo	Fruto	Ají	2012	1	0,4
El Calvario		Calabaza	2012	2	50
Guamal		Habichuela	2018	1	1,5
El Dorado		Habichuela	2018	3,11	6,33
Guamal		Pepino cohombro	2018	1	3
El Calvario		Pépino de guiso	2016	2	2
San Juanito		Uchuva	2007	10	35
El Calvario	Hoja	Cebolla de rama	2015	2	40
El Dorado		Cebolla de rama	2018	2,01	4,13
El Calvario		Cilantro	2015	4	16
El Calvario	Tallos, raíces y tubérculos	Cebolla de bulbo	2015	2,5	30
El Calvario		Papa	2015	1	18
El Calvario		Papa criolla	2015	1	8
San Juanito		Sagú	2018	80	104
El Calvario		Sagú	2018	25	75
Total				137,62	393,36

Fuente: Elaboración propia.

Con base en la información anterior, la oferta de productos hortícolas en el departamento del Meta incluye tanto hortalizas de hoja, como de frutos, tallos, raíces y tubérculos. Su producción está condicionada al área de siembra y a la diversidad de pisos térmicos que oferta diferentes condiciones meteorológicas, principalmente de temperatura, elemento climático determinante para el establecimiento de este tipo de productos, siendo El Calvario, el municipio con mayor diversificación de productos hortícolas ofertados para el departamento.

En el municipio de Villavicencio, se puede apreciar que la producción hortícola no es una actividad representativa para la economía regional. A continuación, se describen las condiciones edafoclimáticas que presenta el municipio de Villavicencio, y realizar un análisis de zonas potencialmente productivas para la

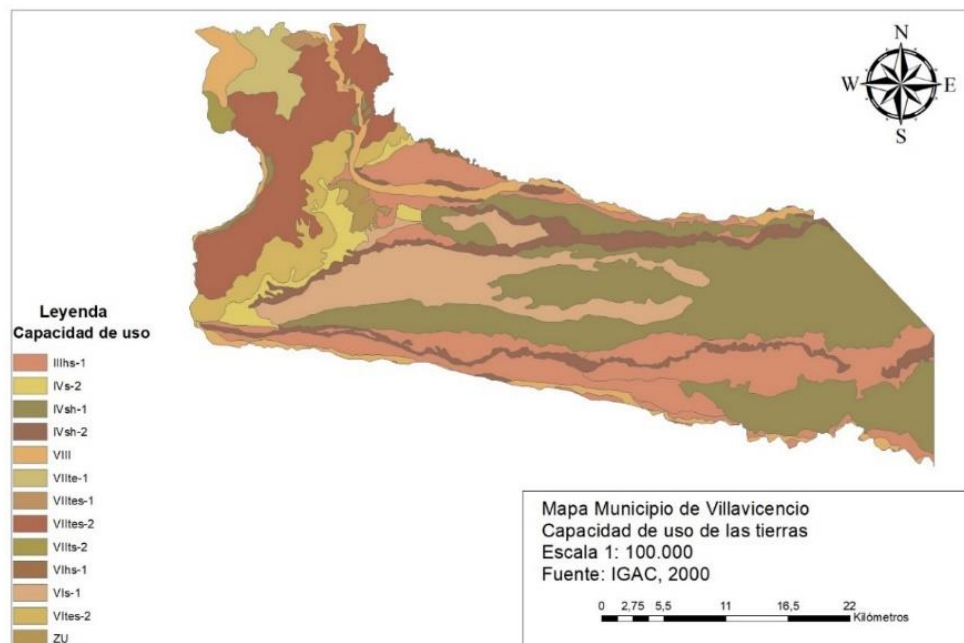
implementación de sistemas hortícolas protegidos conforme a diseños planteados de invernaderos en el trópico cálido.

Descripción edafoclimática del municipio de Villavicencio

Capacidad de uso de los suelos

Las clases de suelo que presenta el municipio de Villavicencio de acuerdo con su capacidad de uso corresponden a las clases III, IV, VI, VII y VIII. En la tabla se distinguen los usos recomendados para cada tipo de suelo. Se puede apreciar que las clases con mayor distribución en superficie de tierra corresponden a la clasificación IIIhs con aptitud para agricultura con cultivos anuales y semi perennes como arroz, sorgo, maíz, soya, plátano y pastos introducidos para ganadería semi intensiva y la clase IVsh aptas para cultivos anuales y perennes como: caña, sorgo, arroz, maíz, palma africana, frutales y pastos introducidos para ganadería semi intensiva.

Figura 1. Capacidad de uso del suelo para el municipio de Villavicencio-Meta



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4. Usos recomendados para las clases de suelo según su capacidad de uso

Clase	Usos recomendados	% área
IIIhs-1	Tiene aptitud para agricultura con cultivos anuales y semi perennes como arroz, sorgo, maíz, soya, plátano y pastos introducidos para ganadería semi-intensiva	20,33
IVs-2	La unidad presenta aptitud para cultivos anuales y perennes como frijol, yuca, caña, cacao, frutales y pastos introducidos para ganadería semi-intensiva	2,46
IVsh-1	Estas tierras son aptas para cultivos anuales y perennes (caña, sorgo, arroz, maíz, palma africana, frutales) y pastos introducidos (braquiaria) para ganadería semi-intensiva	33,07
IVsh-2	Estos suelos son aptos para cultivos anuales (arroz, sorgo, maíz), ganadería semi-intensiva con pastos introducidos (braquiaria, alemán) y para actividad forestal multipropósito	7,19
VIhs-1	Estos suelos son aptos para la agroforestería con ganadería extensiva, zoocultura y para la conservación y protección del bosque natural	0,18
VIII	Esta clase de tierras no tiene aptitud agropecuaria y la cobertura dominante es con arbustos y herbazales naturales poco densos. Su utilización debe estar orientada a la conservación y protección de los recursos naturales	5,93
VIIte-1	Las tierras de esta unidad son aptas para actividades agroforestales con fines de conservación y protección de los recursos naturales	2,36
VIItes-1	La unidad tiene aptitud para actividades agrosilvopastoriles	0,28
VIItes-2	La unidad es apta para ganadería extensiva asociada con actividades agroforestales	11,24

Vllts-2	Las tierras de esta unidad tienen aptitud para actividades agroforestales dirigidas a la conservación y protección de los recursos naturales	0,46
Vls-1	La unidad es apta para ganadería extensiva con pastos introducidos como el braquiaria, asociado con actividades de agroforestería (frutales, caucho, pino, eucalipto)	11,17
Vltes-2	Los suelos son aptos para labores agrosilvopastoriles: cultivos comerciales de cacao, caña, maíz, frutales asociados con actividad pecuaria (pastos introducidos y leguminosas arbustivas) y forestal de producción-protección	4,55

Fuente: Elaboración propia, basado en información del IGAC.

Clima

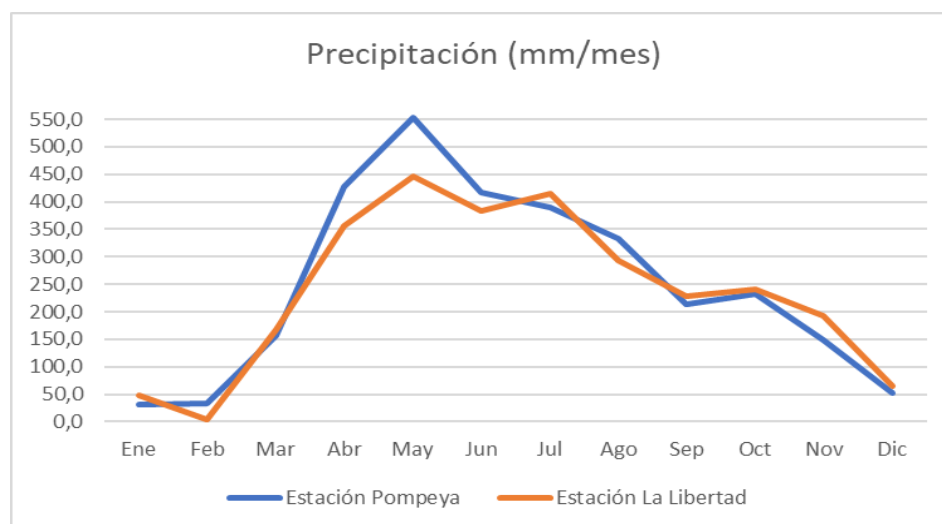
Para establecer el régimen pluviométrico del municipio de Villavicencio, se tiene en cuenta la información pluviométrica suministrada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), de la estación Pompeya de código 35020060 ubicada en la latitud 4,03975 y longitud -73,368 con la información de la estación agrometeorológica La Libertad, ubicada en la latitud 4,05736111 y longitud -73,46791667 del municipio de Villavicencio. Los datos de horas sol, humedad relativa y temperatura se analizaron con la información de la estación agrometeorológica la Libertad.

Precipitaciones

El municipio presenta un régimen de lluvia monomodal con una precipitación anual de 2.989 mm. Puede presentar dos picos moderados de alta precipitación en los meses de mayo y julio con precipitaciones superiores a 400 mm. La época de lluvias inicia desde marzo y termina hasta inicios de noviembre y la época seca, o de poca

precipitación, en los meses que van de noviembre hasta marzo. Los meses de máxima precipitación son abril, mayo y junio con 426,8, 553 y 417,8 mm respectivamente, y los meses de mínima precipitación son enero y febrero con 31,8 y 32,8 mm respectivamente.

Figura 2. Régimen de precipitación para el municipio de Villavicencio-Meta

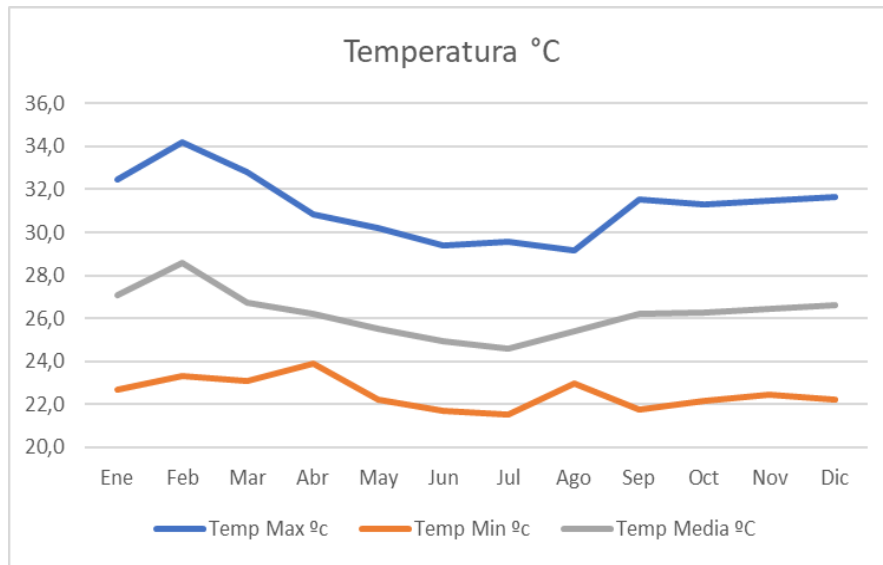


Fuente: Elaboración propia, basado en datos de IDEAM.

Temperatura

El rango de máxima temperatura se presenta en los meses de poca precipitación, siendo el mes de febrero el más caluroso con hasta 34,2 °C. Al ser mayo el mes de máxima precipitación, se presenta un descenso de temperatura a partir de este mes y un incremento a mediados de septiembre. La temperatura mínima promedio es de 22,5 °C, siendo junio y julio los meses que registran temperaturas mínimas de 21,7 y 21,5 °C respectivamente. La temperatura media del municipio oscila entre los 26 y 28 °C. Conviene precisar que el municipio presenta una parte de su territorio en zonas montañosas, donde se ubican las veredas Pipiral, Santa Helena, Quebrada Honda, Santa Teresa, Lourdes, San Cristóbal y Quebrada Colorada, donde la temperatura media puede alcanzar rangos entre los 12 a 24 °C.

Figura 3. Régimen de temperatura para el municipio de Villavicencio-Meta

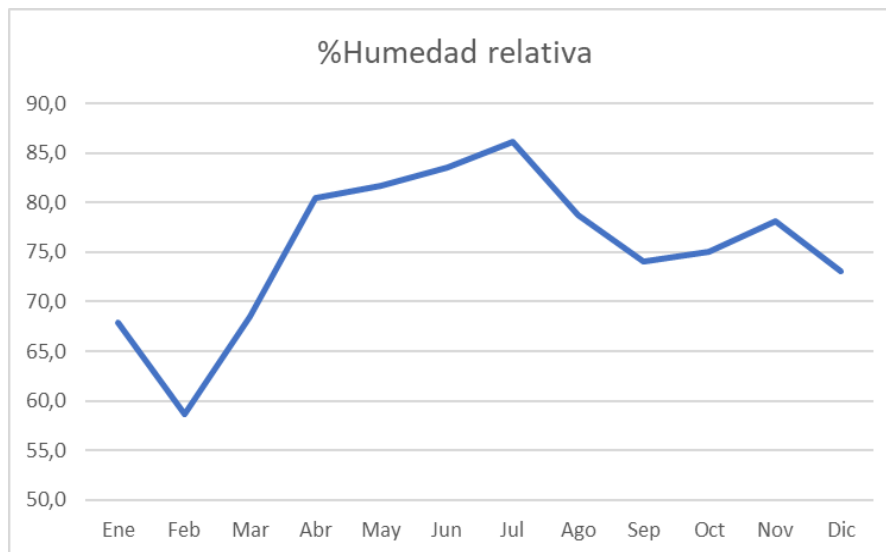


Nota: Elaboración propia, basado en datos de IDEAM.

Humedad relativa

Los meses con mayor humedad son junio y julio, con 83,5% y 86,1% respectivamente. El mes con la humedad relativa más baja es febrero, con 58,6%.

Figura 4. Régimen de humedad relativa para el municipio de Villavicencio-Meta

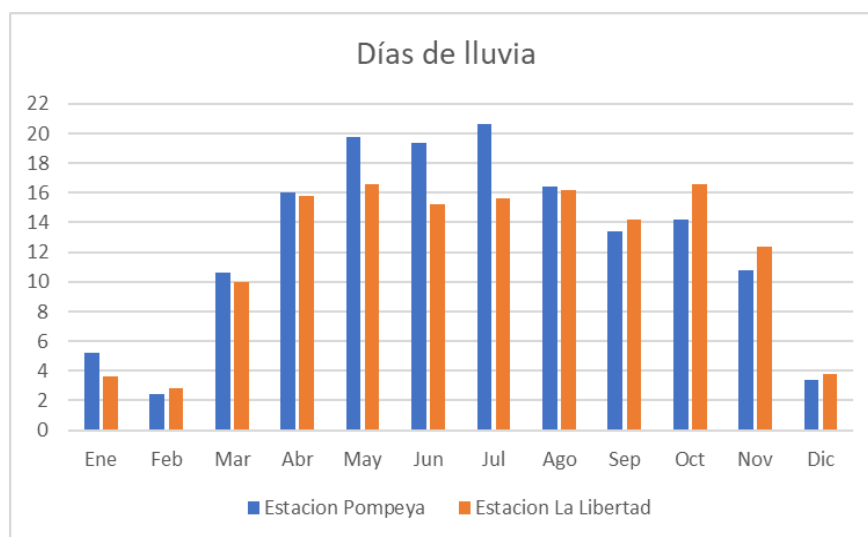


Nota: Elaboración propia, basado en datos de IDEAM.

Días de lluvia

El número de días al año con eventos de lluvia oscila entre los 150 hasta los 250 en zonas de montaña. Los meses con mayor número de eventos lluviosos son mayo, junio y julio (20,19 y 21 días respectivamente), y disminuye con algunos picos en el mes de octubre, luego el número de eventos lluviosos es menor hasta febrero y vuelven a ser más frecuentes en marzo, periodo donde inician las primeras lluvias. Contrario a los días de lluvia, los meses que presentan mayor número de días secos son enero, febrero y diciembre, con alrededor de 26 días secos en el mes.

Figura 5. Régimen de temperatura para el municipio de Villavicencio-Meta

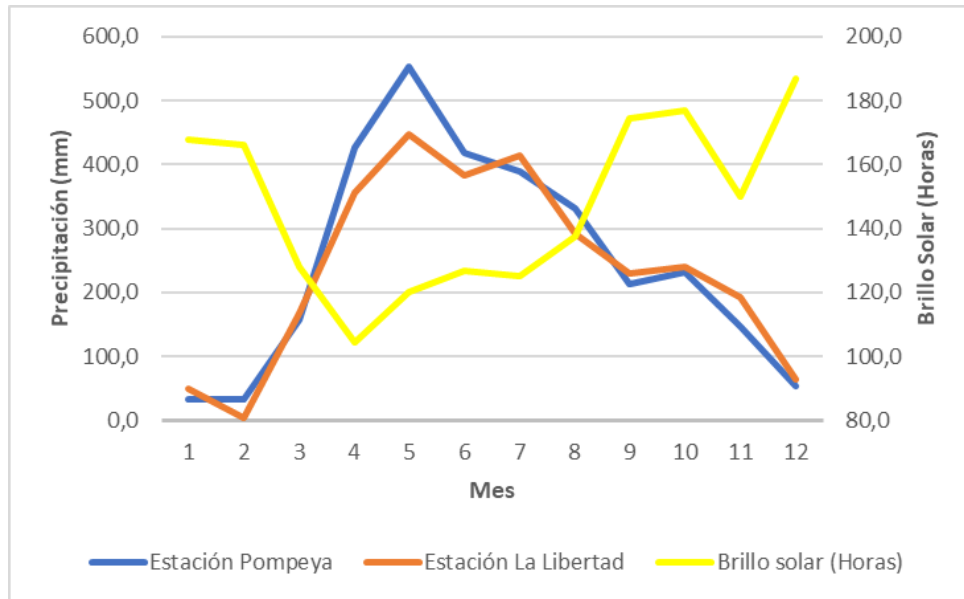


Nota: Elaboración propia, basado en datos de IDEAM.

Horas de sol

Presenta un total anual de 1764,8 horas; sin embargo, esta condición varía conforme al régimen de lluvia. En la gráfica, se observa el comportamiento inverso que tiene el brillo solar con respecto a los meses con mayor precipitación. Durante estos meses, el brillo solar puede bajar hasta 104,5 horas/mes; mientras que, para los meses de poca precipitación, el brillo solar alcanza hasta 186.8 horas/mes.

Figura 6. Régimen de brillo solar respecto a la precipitación para el municipio de Villavicencio-Meta

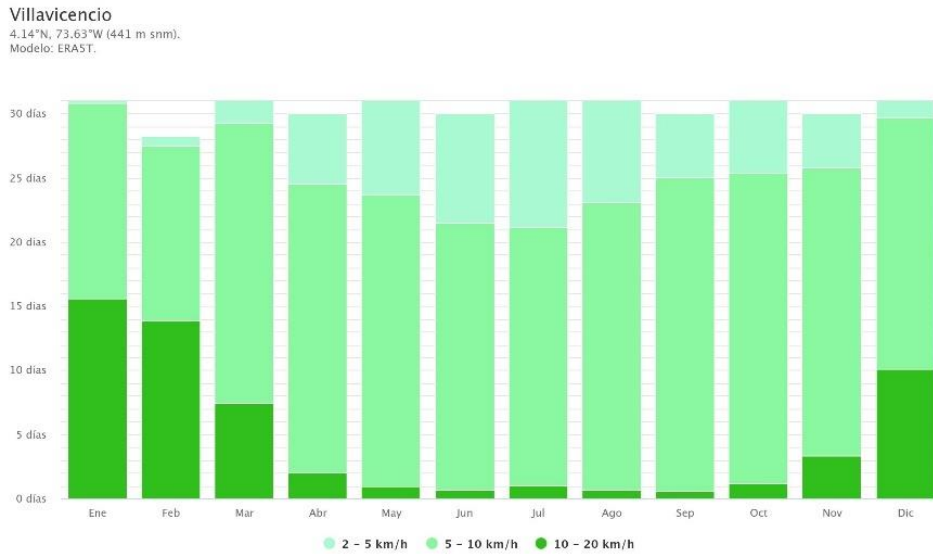


Nota: Elaboración propia, basado en datos de IDEAM.

Velocidad del viento

La siguiente información se obtiene a partir de los datos del servicio meteorológico creado por la Universidad de Basilea, Suiza, denominado Meteoblue. La gráfica siguiente muestra que la ciudad presenta vientos que oscilan entre los 5 a 10 km/h en el año, es decir, con base en esta información, la velocidad media de los vientos en Villavicencio es de 2 m/s aproximadamente. Presenta un aumento en los meses que van de diciembre a marzo, llegando a presentar vientos hasta de 10 a 20 km/h por más de 5 días.

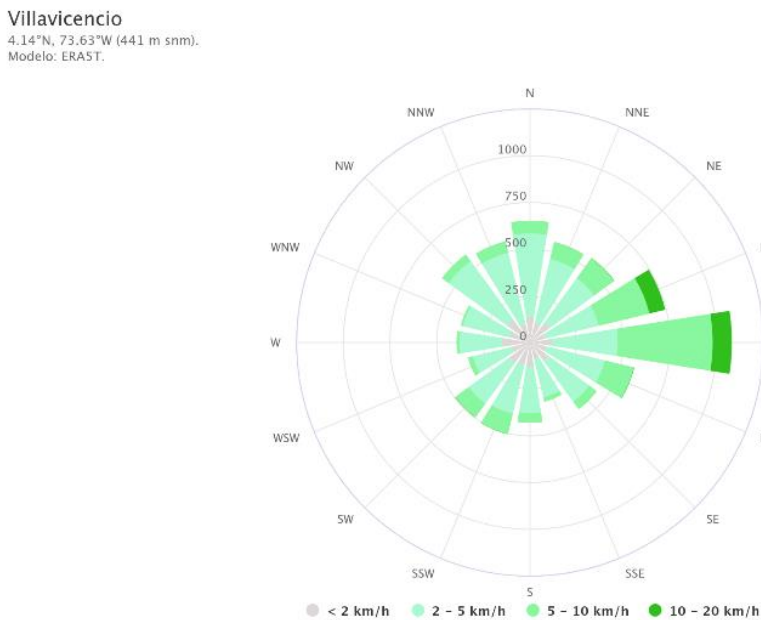
Figura 7. Régimen de la velocidad de los vientos para el municipio de Villavicencio-Meta



Fuente: Meteoblue, 2024.

Los vientos alisios del este y este-noreste, tienen mayor incidencia sobre las condiciones agrometeorológicas de la región.

Figura 8. Rosa de los vientos para el municipio de Villavicencio-Meta

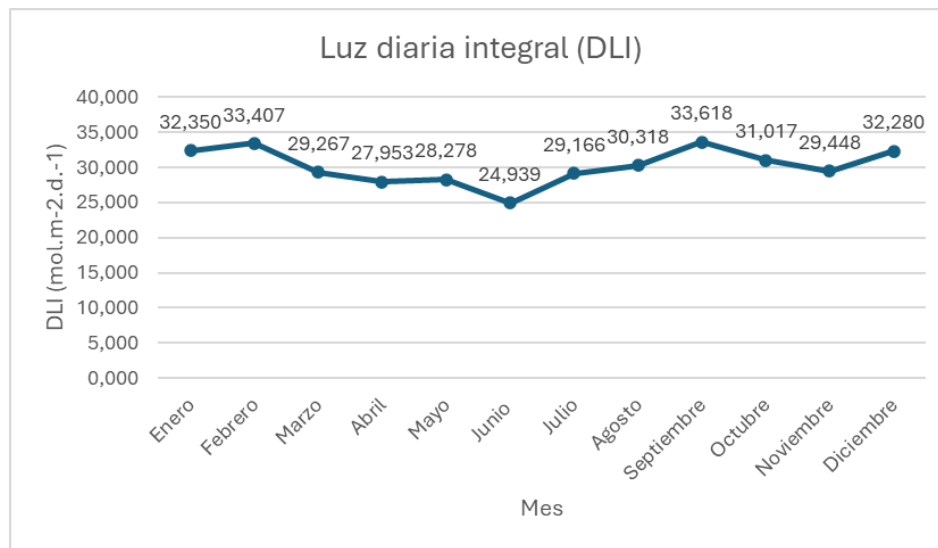


Fuente: Meteoblue, 2024.

Luz diaria integral

La luz diaria integral, o DLI, es la cantidad de radiación fotosintéticamente activa entregada a la planta en función de la intensidad de luz diaria. Se expresa en $\text{mol. m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$. Este indicador permite orientar en la toma de decisión sobre el tipo de cubierta a usar en una determinada zona de acuerdo con la especie y fenología que se va a establecer bajo cubierta. La siguiente gráfica se obtiene a partir del **DLI Calculator Version 2.1.5**, se puede observar el promedio de DLI mensual que presenta la ciudad de Villavicencio. Septiembre es el mes con mayor índice de radiación por metro cuadrado día y junio el de menor radiación, correspondiendo, a una mayor radiación en los meses de poca precipitación.

Figura 9. Luz diaria integral para el municipio de Villavicencio-Meta



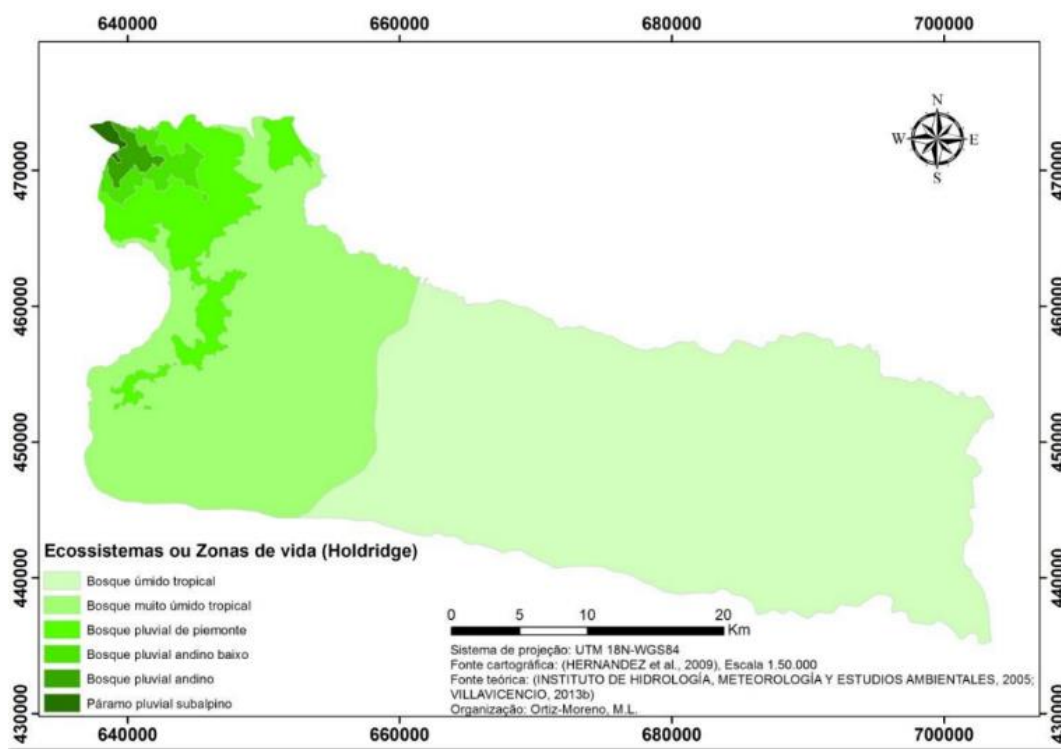
Nota: Elaboración propia con datos obtenidos de DLI Calculator Version 2.1.5

Ecosistemas

De acuerdo con el estudio realizado por Moreno (2015) sobre análisis de la interacción entre ordenamiento territorial y biodiversidad: estudio de caso en Villavicencio (Meta, Colombia), los ecosistemas que predominan en el municipio de Villavicencio, según la clasificación de ecosistemas o zonas vida Holdridge, son los

ecosistemas de bosque húmedo y muy húmedo tropical, con 61,5% y 29,2%, respectivamente. El 7,15% del municipio presenta un ecosistema de bosque pluvial de piedemonte. El 1,26% corresponde a bosque pluvial andino bajo. El 0,68% corresponde a bosque pluvial. Y el páramo pluvial subalpino está representado por 0,21% del territorio por la vereda Pipiral.

Figura 10. Ecosistemas y zonas de vida Holdridge para el municipio de Villavicencio-Meta

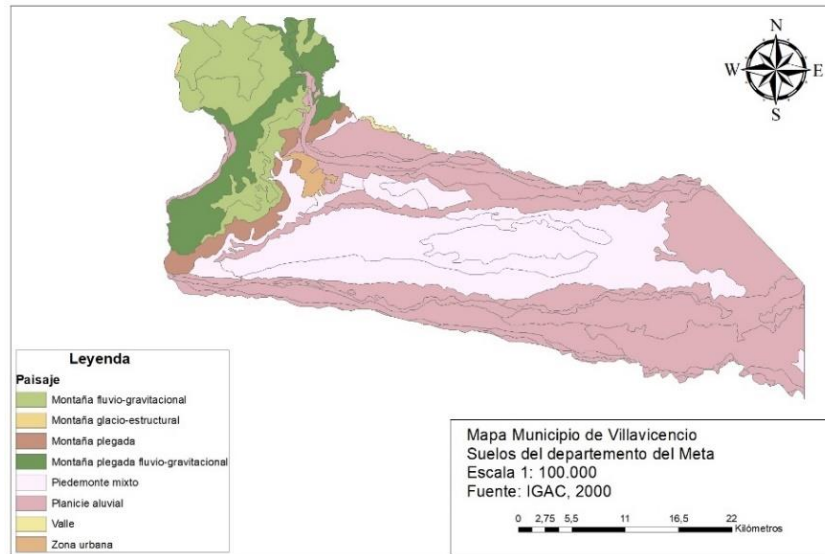


Fuente: Obtenido de Moreno, (2015).

Paisaje y usos principales del suelo

El 78% del municipio presenta un relieve plano con paisaje de piedemonte 31,07% y planicies aluviales 47,12%, se ubican dentro del piso térmico de 0-800 msnm. El 20,84% corresponde a un paisaje montañoso que varía desde los 800 msnm hasta los 3.700 msnm.

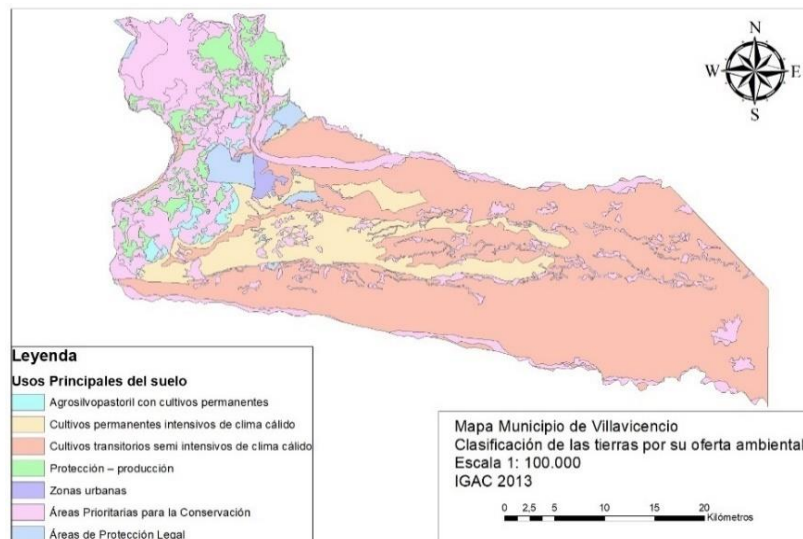
Figura 11. Principales paisajes para el municipio de Villavicencio-Meta



Nota: Elaboración propia.

En estos paisajes, de piedemonte y planicie aluvial, predomina el uso de los suelos correspondiente a cultivos transitorios semi intensivos de clima cálido y permanentes intensivos de clima cálido, como los indicados en la capacidad de uso de suelos. Las regiones montañosas corresponden a las áreas prioritarias para la conservación y de protección legal.

Figura 12. Usos principales del suelo para el municipio de Villavicencio-Meta



Nota: Elaboración propia.

Desarrollo de la horticultura protegida en Colombia, en el departamento y en el municipio de Villavicencio

El impulso de la producción hortícola bajo invernadero en Colombia inicia con los cultivos de flores. Actualmente, se estima que existen más de 10.000 hectáreas en cultivos bajo invernadero, de las cuales, alrededor de 6.800 hectáreas están destinadas a la producción de especies ornamentales como flores (Marín-Benítez, *et al.*, 2023).

Sin embargo, el diseño de las estructuras implementadas para el establecimiento de cultivos de las flores no es el más adecuado para la producción de otro tipo de cultivos con mayores exigencias climáticas (Bojacá *et al.*, 2011). Es por ello que el diseño de invernaderos implementados en Colombia ha ido evolucionando, desde su estructura, pasando de los invernaderos tradicionales en madera y metal-madera con cubiertas en plástico, a los invernaderos multi túnel tipo millenium que proporcionan una estructura más sólida, resistente y duradera al ser fabricados en acero y con cubiertas más tecnificadas y propiedades específicas conforme a las condiciones del lugar (Jaramillo, *et al.*, 2013; Villagrán *et al.*, 2018; Villagrán & Bojacá, 2019), que permiten diversificar la producción no solo de flores sino de especies hortícolas como el tomate, que es la hortaliza más sembrada con mayor volumen de producción bajo sistemas protegidos (Minagricultura, 2021). Actualmente, se estima que hay alrededor de 7000 hectáreas de tomate sembrado bajo cubiertas (Agronet, 2021).

En el departamento del Meta, la producción de hortalizas bajo sistemas protegidos se reporta en los municipios de El Calvario y San Juanito, con 19 hectáreas sembradas en tomate para el año 2022. En el municipio de Villavicencio no se reportan sistemas de producción de hortalizas bajo sistemas protegidos.

Aspectos técnicos de la horticultura protegida

A continuación, se realiza una breve descripción de los aspectos más importantes a considerar en la horticultura protegida, de acuerdo con Jaramillo, *et al.*, (2013) y Villagrán & Numa-Vergel, (2023).

Selección de invernaderos

Existen numerosos tipos de invernaderos que, de acuerdo con las condiciones topográficas y agrometeorológicas de cada región, determinarán la sencillez o complejidad de su estructura y tipo a diseñar.

Invernadero tipo túnel

Este tipo de invernadero confiere mayor resistencia al viento por su diseño en arco y ofrece mayor transmitancia. Dado a su diseño, el fenómeno de la inversión térmica puede alterar las condiciones del microclima interior al presentar una baja transferencia de energía, por lo que requieren de implementar dispositivos de ventilación.

Invernadero tipo semitúnel

Este tipo de invernadero es el más empleado en horticultura protegida debido a su capacidad para el control de factores climáticos, ofrece resistencia al viento, buena ventilación y reparto de luminosidad. Sin embargo, su costo inicial es elevado.

Invernadero tipo capilla

Se caracteriza por presentar un techo formado con dos planos inclinados, en forma de galpón. Apto para regiones de alta precipitación con poca incidencia de los vientos, ya que esta estructura no ofrece mayor resistencia a los vientos. Presenta problemas de ventilación en grandes extensiones y la luminosidad no es uniforme.

Invernadero plano

Este tipo de invernadero es similar a una caja de fósforo. Con dos lados claramente diferenciados: vertical y horizontal. Es ideal para zonas poco lluviosas, se adapta bien a la forma del terreno y tiene una uniformidad luminosa. Este tipo de invernadero presenta una mala ventilación, el tipo de cubierta es vulnerable a la destrucción del viento y, si llueve mucho, puede generar bolsas de agua en la lámina instalada.

Invernadero tipo diente de sierra

Su modelo característico es la disposición de la cubierta, que son semejantes a los dientes de una sierra. La dirección de las cubiertas se debe ubicar en sentido de los vientos que predomina la zona. Debido a su diseño, no presenta uniformidad en la luminosidad y se limita para cultivos poco exigentes en luz.

Invernadero de cristal o tipo venlo

Este tipo de invernadero es empleado en el norte de Europa. Su estructura se conforma por paneles de vidrio que descansan sobre un conjunto de barras transversales. Su hermeticidad le brinda una mejor climatización al interior del invernadero.

Parámetros para tener en cuenta en la construcción de un invernadero

Tipo de cubierta

En países tropicales, se emplean cubiertas de bajo costo, como el plástico, dado que las condiciones ambientales no son tan extremas como en zonas nórdicas de Europa u Asia, donde emplean el vidrio como tipo de material de cubierta. El plástico es un material flexible que debe presentar propiedades mecánicas (resistencia a los vientos, fricción y fotorresistente), ópticas (transmitancia de luz) y térmicas (termorresistente); adicionalmente que sea hidrófilo, que eviten la formación de gotas de agua.

Los materiales plásticos más usados para cubiertas de invernadero son: polietileno de alta y baja densidad (pead y pebd), copolímero etileno vinil acetato (eva), policloruro de vinilo (pvc), policarbonato (pc). En la tabla siguiente se describen algunas de sus propiedades:

Tabla 5. Propiedades de los diferentes plásticos usados para cubiertas

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

Nota: Tomado de Villagrán & Numa-Vergel, (2023).

Existen, en el mercado, películas de polietileno con características especiales y se clasifican de acuerdo con la influencia sobre los campos de radiación. La principal de ellas, y en general para casi todas las películas, es la baja conductividad eléctrica.

Tabla 6. Características de los plásticos de polietileno

Tipos de películas plásticas de polietileno	Características	Condiciones climáticas recomendados a usar
Claras	Transmisión luz >90%	Nublados
Difusas	Transmisión luz 80-90%	Alta radiación
Anti-dust	Baja carga eléctrica que evita la atracción del polvo	Alta polución y polvo
Anti-goteo	Con aditivo anti-drip que reduce la tensión superficial agua	HR ≥ 80%
Anti-plagas o anti-vector	Filtra radiación UV y ayuda a repeler insectos	-
Con bloqueo NIR	Generan un bloqueo parcial de la radiación infrarroja cercano (NIR)	Climas cálidos y áridos
Con bloqueo MIR	Bloqueo de la radiación térmica del infrarrojo medio.	Climas fríos con heladas
Luminiscentes	Absorben longitudes ultravioletas y verdes que son poco útiles para las plantas y las convierten en luz azul y roja	-

Nota: Villagrán & Numa-Vergel, (2023) y Jaramillo, *et al.*, (2013)

Clima

La sostenibilidad del cultivo en invernadero dependerá directamente de las condiciones climáticas del sitio donde se instalará la estructura. Es necesario analizar las variables meteorológicas de humedad relativa, radiación solar, velocidad y dirección del viento. Estas, en conjunto, sumadas a la concentración de CO₂, y principalmente la temperatura, que determinarán las condiciones de microclima generadas en el interior del invernadero.

Temperaturas por encima de los rangos tolerantes de cada especie, conducen en las plantas a problemas de disfunción enzimática por degradación y síntesis de proteínas, al cierre estomático e inhibiendo la fotosíntesis, y otros procesos asociados a la reproducción. Por lo anterior, las horas de sol más intensas es uno de los problemas que tienen que enfrentar y resolver los horticultores de regiones cálidas y mediterráneas mediante un diseño de ventilación que permita la renovación del aire al interior del invernadero y reducir así el exceso de temperaturas, la humedad excesiva y renovar el CO₂ (Martínez & Roca, 2011).

Suelos

Es importante conocer las propiedades físicas del suelo donde se va a establecer la estructura del invernadero. Entre ellas la textura donde se van a cimentar las bases con el objetivo de prevenir el asentamiento de la construcción, para que la estructura tenga una estabilidad y durabilidad. Por otra parte, si el cultivo se va a establecer en suelo, es necesario, aparte de las propiedades físicas, tener en cuenta las químicas y microbiológicas para determinar las condiciones edafológicas en las que se va a sembrar y adecuar conforme a la especie a implementar.

Dimensiones

Las dimensiones del invernadero dependerán del clima de la zona donde se va a establecer. Naves de 10-12 m de ancho con 60 m de longitud, facilitan el manejo del cultivo dentro del invernadero, y la altura debe permitir un buen flujo de aire y

mejorar las condiciones de temperatura. Las alturas promedio de un invernadero son mínimo de 3,5 m debajo de la canal y una altura máxima de 5,5-6m.

Sin embargo, en climas cálidos, de acuerdo con los modelos de simulación CFD realizados por Villagrán, (2016), indican que el uso de invernaderos ventilados naturalmente con alturas superiores a los usados comúnmente y combinando sistemas de ventilación lateral y cenital permite incrementar el valor de inercia térmica, mejorando las condiciones microclimáticas internas proporcionando un mayor intercambio de aire, generado principalmente por la variación de presiones en cada una de las ventanas con mayores índices de renovación en modelos de invernadero con anchos no superiores a 40 metros.

Dirección de los vientos

Es el factor dominante para la ubicación de un invernadero en condiciones intertropicales. El invernadero debe disponer sus áreas de ventilación en sentido perpendicular a la dirección de los vientos predominantes, permitiendo maximizar el efecto de renovación térmica obtenido mediante ventilación natural.

Ubicación

El relieve juega un papel importante en la ubicación de la estructura de un invernadero. Se recomienda instalar los invernaderos en zonas con pendientes menores al 2%, pendientes mayores requerirán de una adecuación y nivelación del terreno, elevando los costos de inversión; adicionalmente, se requiere de realizar un análisis sobre los movimientos de los vientos, el sentido en que caen las lluvias en la zona, y las curvas de nivel del terreno, con el fin de garantizar una uniformidad del clima en el interior del invernadero y una evacuación del agua de lluvia. En regiones hondonadas, no se recomienda establecer un invernadero, debido a que sus condiciones dificultan las labores de cultivo, el manejo del clima y del agua.

El sitio seleccionado deberá contar con disponibilidad de agua. Esta puede ser de una fuente superficial o subterránea, y debe garantizar la cantidad necesaria para satisfacer los requerimientos hídricos de los cultivos.

Orientación

Es importante construir el invernadero con el eje longitudinal en dirección norte-sur. En esta orientación se asegura la máxima exposición de luz solar y que puede ser aprovechada por las plantas.

Impacto Socioambiental

De acuerdo con Marín-Benitez, *et al.*, (2023), “los cultivos bajo invernadero han aumentado significativamente su área de acción, por lo que es necesario generar un mayor control sobre las prácticas ambientales y agrícolas que se desarrollan en estos sistemas productivos”. Investigaciones realizadas por Ortiz-Alamilla, *et al.*, (2023), sobre los impactos socioambientales de la agricultura protegida en los municipios de Chiautzingo, San Salvador el Verde y San Felipe Teotlalcingo ubicados en la región Sierra Nevada de Puebla, México, describen que mientras la agricultura protegida tiene un crecimiento constante en estas localidades, especialmente en cultivos de flores, frutas y hortalizas, la superficie de producción de cultivos tradicionales como maíz y frijol, ha disminuido, destacando que esta relación inversa entre cultivos comerciales y básicos conlleva a importantes impactos socioambientales negativos y que las políticas agrícolas, tienen un alcance limitado en los medios de vida rurales si no se tienen en cuenta las prácticas agrícolas tradicionales y la cultura local.

Aunque la agricultura protegida se caracteriza por su eficiencia en el uso de los recursos y su mayor productividad en comparación con la agricultura tradicional y de campo abierto, este modelo de producción ha sido objeto de críticas debido a los impactos ambientales negativos que puede generar en el agroecosistema, principalmente en el ciclo del agua, aire y suelo (Ortiz-Alamilla, *et al.*, 2023). Como se mencionó con anterioridad, el plástico más usado en la horticultura protegida es el polietileno, sea como cubierta o acolchado. Este tipo de material necesita largos periodos de tiempo para degradarse después de haber sido utilizado, lo que ha provocado un gran problema de contaminación por este tipo de residuo y su extensa

acumulación ha provocado la presencia de plásticos en diversos ecosistemas (Rodríguez-Alba, *et al.*, s.f.).

Estudios anteriores realizados por Kapanen *et al.*, (2008), sobre la biodegradabilidad de los plásticos en agricultura protegida, señalan que al enterrar los plásticos luego de su uso, después de un año se encontró un 4% menos del peso inicial empleado sin encontrar ecotoxicidad en el suelo ni cambios en la diversidad bacteriana oxidantes de amoníaco en el suelo. A su vez, investigaciones realizadas sobre el efecto de emisiones de gases de efecto invernadero (CH_4 y N_2O) en la agricultura protegida y a campo abierto en el cultivo de arroz, arrojaron que el efecto potencial del calentamiento global se redujo en un 6,49% y 18,65% para el CH_4 y N_2O cuando se cultiva en invernadero que a campo abierto. Este efecto se debe a que el cultivo de arroz bajo invernadero redujo las emisiones de CH_4 Y N_2O en un 6,58-18,73% y un 2,51-21,35%, en comparación con el cultivo tradicional a campo abierto (Xu, *et al.*, 2017).

La sostenibilidad de la agricultura no solo se basa en técnicas de campo que mejoren la eficiencia del uso de los recursos naturales, sino además adecuándose a las limitaciones que existen en la actualidad, como las de uso de suelo y el crecimiento de las urbes. Frente a esta situación surgen los sistemas de cultivos sin suelo (SCS), que incluyen aquellos métodos y sistemas que hacen crecer las plantas fuera de su ambiente natural que es el suelo. Engloba sistemas como los hidropónicos, aeropónicos, entre otros. Han tenido un gran avance en todo el mundo debido al desarrollo de los plásticos en la agricultura (Urrestarazu, 2015).

Los SCS en la agricultura bajo cubierta, se ha vuelto muy popular principalmente, porque permite la intensificación de la producción hortícola en muchas regiones del mundo, generan beneficios productivos al incrementar la productividad por metro cuadrado de superficie, también beneficios sociales y ambientales, cada vez más demandados en la agricultura bajo el escenario actual de aumento poblacional y crisis ambiental (Ortiz, *et al.*, 2022).

Estudios de Caso

El principal factor para impulsar la productividad agrícola y elevar los ingresos es la adopción de tecnologías y prácticas innovadoras por parte de los agricultores. Esto les permitirá aumentar los rendimientos, gestionar los insumos con mayor eficiencia, introducir nuevos cultivos y sistemas de producción, mejorar la calidad de sus productos, conservar los recursos naturales y adaptarse a los desafíos climáticos. (Grupo Banco Mundial, 2019).

Para lograr este impulso se requiere de la implementación de tecnologías adaptadas a las condiciones agrometeorológicas del lugar. En Colombia, el diseño de invernaderos se concentra más para zonas de alta altitud, templadas y frías, específicamente localizados en la región Andina del país, como Cundinamarca, Boyacá, Santander, Antioquia y Valle del Cauca. Su diseño predomina en cubiertas plásticas y se fundamenta principalmente en la ventilación natural, que permiten acondicionar, a un bajo costo, el microclima generado en el interior del invernadero con el clima exterior para el control de las variables ambientales relevantes, como temperatura, humedad relativa, CO₂, a partir del intercambio de aire entre el exterior y el interior del invernadero a través de las áreas de ventilación dispuestas en la estructura. Esta dinámica de fluidos se puede estudiar a través de modelos empíricos de balance de energía, experimentación en campo, termografía digital o mediante simulación numérica aplicando técnicas como la dinámica de fluidos computacional (CFD, por sus siglas en inglés) (Villagrán & Bojacá, 2019).

Sin embargo, el uso de cubiertas plásticas para la producción hortícola en condiciones de baja altitud es limitada principalmente por las condiciones de alta temperatura, radiación solar, vientos y precipitación; adicionalmente la presión que ejercen las plagas y enfermedades en estas zonas es mayor. Por lo anterior, la implementación de invernaderos con cubiertas en malla anti-insectos ha tomado importancia para el desarrollo de invernaderos en estas zonas, principalmente en la región del Caribe colombiano (Villagrán, *et al.*, 2020)

Es por lo anterior, que el uso de mallas anti-insectos ha ido en aumento, ya que ofrece una barrera física que impide la entrada de insectos plaga al interior del invernadero, pero su uso tiende a influenciar de manera negativa sobre el microclima al interior del invernadero, haciendo descender la tasa de ventilación natural, aumentando la temperatura y la humedad favoreciendo la aparición de enfermedades (Teitel, 2006; Pérez *et al.*, 2016).

Estudios realizados en el Magdalena por Villagrán, *et al.*, (2020), con la implementación de un invernadero tipo capilla construido en acero estructural y cubierta de polietileno con paredes de ventilación de 3,5 m en malla anti-insecto, bajo condiciones de temperatura media de 28,16 °C, con una media máxima y mínima de 33,6 y 23,2 °C, respectivamente, y un flujo de aire de 0,2 a 5 m/s, arrojaron que el empleo de malla anti-insecto con mayor número de hilos y menor porosidad causaron una disminución del flujo del aire en el interior del invernadero a causa de una caída de presión reduciendo la tasa de ventilación en condiciones de velocidades menores a 2 m/s, concluyendo así, que antes de seleccionar e implementar algún tipo de malla anti-insecto se evalúen las condiciones dominantes de velocidad y dirección del viento para las horas críticas del periodo diurno con el objetivo de garantizar la generación de un microclima adecuado y homogéneo para el crecimiento y desarrollo de las plantas al interior del invernadero.

De acuerdo con Pérez *et al.*, (2016), es importante determinar también la permeabilidad, resistencia que ofrece al viento, sobre el tipo de malla a emplear en el diseño y construcción del invernadero; también, sobre el grosor de los hilos y su resistencia de la radiación solar y a la exclusión de plagas (Giannoulis, *et al.*, 2021). 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 anti-insecto blancas (Villagrán *et al.*, 2023).

En Indonesia, Impron, *et al.*, (2007), desarrollaron un modelo climático para el diseño de invernaderos para zonas de trópico bajo, indicando que la combinación de cubiertas plásticas con propiedades ópticas que reducen la carga térmica del invernadero y el uso de mallas anti-insecto proporcionan un ambiente optimizado en cuanto a la ventilación en los invernaderos; sin embargo, señalan que el diseño de la ventilación de los invernaderos se debe determinar mediante técnicas como la dinámica de fluidos computacional (CFD).

Más reciente, Flores, *et al.*, (2018), en Guanajuato, México, evaluaron el efecto de poner sombrío a las cubiertas con una técnica de encalado, que consistió en opacar el material de cubierta mediante la adición de una mezcla a base de cal sobre un polietileno blanco lechoso de 70% de transmisividad, junto con el efecto de la ventilación cenital y lateral del tipo de cortina enrollable protegidas con malla anti-áfidos. Los resultados obtenidos arrojan que el sombreado tiene poca influencia sobre el comportamiento de la temperatura y la humedad del aire en el interior del invernadero, mientras que la ventilación cenital y lateral, con la velocidad promedio del viento de 3 km/h, la tasa de renovación de aire aumento generando un salto térmico con una diferencia de temperatura, interna y externa, de 1,10 °C, igualando las condiciones externas de temperatura y disminuyendo la humedad relativa del interior del invernadero.

En Colombia, se comercializan mallas con diferentes grados de finura (mesh), es decir, con diferentes números de huecos por pulgada cuadrada. Se pueden encontrar de 17, 25, 40 hasta 50 mesh. Por lo tanto, la malla 17 tiene menos orificios que la malla 50. Debido a ello, la malla 50 tiene mayor capacidad para limitar el ingreso de insectos al invernadero, pero generará una mayor pérdida del flujo del aire al interior del invernadero, provocando un microclima con mayor temperatura en su interior (Villagrán *et al.*, 2023).

Otro sistema empleado para el enfriamiento son los invernaderos con ventilación natural aumentada (NVAC por sus siglas en inglés). Este diseño de invernaderos combina la ventilación natural con un sistema de nebulización no convencional con un diseño de techo NVAC que, de acuerdo con McCartney, *et al.*, (2018), este diseño proporciona un flujo de aire de 0,38 m/s sin uso de ventiladores, aumentando el enfriamiento al interior del invernadero e incrementando la humedad relativa. Este sistema puede proporcionar una alternativa para mitigar el efecto de la temperatura al interior del invernadero; no obstante, presenta desafíos sobre el manejo de la humedad relativa, que puede incidir en el desarrollo de enfermedades sobre el tipo de especie cultivada al interior del invernadero en climas cálidos.

Desafíos y Oportunidades

Si bien, los reportes para la producción bajo sistemas protegidos en el departamento no se encuentran documentados para el resto de los municipios, no es un indicador de que estos sistemas no se hallan implementado e intentado establecer. Recientemente, ha habido intentos por desarrollar iniciativas individuales para establecer sistemas de producción bajo cubierta, como es el caso del cultivo de Cannabis medicinal en Guamal, con un área de 200 m², pero por los costos de producción, la falta de implementación de un sistema adecuado y el desconocimiento han llevado al fracaso. Otra de las iniciativas es el establecimiento de sistemas hortícolas para el autoconsumo y venta local, como es el ejemplo de la Hacienda Tierra Dulce, ubicada en el municipio de San Luis de Cubarral, que implementa un sistema de cubierta artesanal en guadua y madera y con estructura metálica, abarcando un total de 3000 m² para la producción de lechuga, tomate, cilantro, cherry, remolacha, albahaca, espinaca, cebolla cabezona y perejil, que fomenta el desarrollo de la horticultura bajo este tipo de proyectos a través de cursos personalizados y de la experiencia adquirida.

La cadena productiva de abastecimiento de hortalizas para el municipio de Villavicencio, de acuerdo con un sondeo realizado en los principales centros de

acopio como: central de abastos de Villavicencio, plazas de mercado y fruver, provienen de mercados nacionales, principalmente del departamento de Cundinamarca, de municipios como Chía, Cota y sabana de Bogotá. El abastecimiento de este tipo de productos para el municipio depende exclusivamente del mercado nacional, dejando en desventaja al municipio para el abastecimiento de estos productos.

Resultado sondeo sobre el origen de las hortalizas en los principales centros de comercialización en Villavicencio



Fuente: Elaboración propia

Al ser productos que se transportan por tierra, la crisis de des abastecimiento que enfrenta el municipio es grande cuando las condiciones topográficas y ambientales de la vía impiden la fluidez del tráfico que conecta con el municipio, generando bloqueos prolongados que incomunican el comercio, como lo ocurrido en el año 2019 con el cierre de la vía Villavicencio-Bogotá en el kilómetro 58, o más recientemente, con la avalancha ocurrida, en el sector el Naranjal, en julio de 2023, que ocasionaron largas horas de viaje, con paso alterno en esta vía. Estas situaciones conllevan a desmejorar la calidad del producto transportando y genera un alza de los precios en las cadenas de mercado, afectando directamente la canasta familiar y la disminución de consumo de estos productos.

Villavicencio cuenta con unas condiciones climáticas cálidas muy húmedas con temperaturas medias que pueden ascender por encima de los 24 °C y precipitaciones superiores a los 160 mm, según el modelo de clasificación de Caldas-Lang (Castañeda, 2014). Su producción hortícola, de acuerdo con información obtenida por la alcaldía municipal, se confina a espacios pequeños menores de 2.000 m² y es destinada para el autoconsumo. En la tabla siguiente se puede apreciar el número de veces que se encontró cada especie de hortaliza en los huertos establecidos por los campesinos en cada uno de los corregimientos del municipio de Villavicencio:

Tabla 7. Conteo de los productos hortícolas cultivados en huertos en el municipio de Villavicencio-Meta

Hortalizas	Corregimiento							Total general
	1	2	3	4	5	6	7	
Ahuyama	-	1	-	-	1	3	-	5
Aji	-	-	-	-	2	-	2	4
Arracacha	-	-	-	-	-	1	-	1
Cebolla larga	-	-	1	1	2	3	-	7
Cebollín	-	-	-	-	2	-	-	2
Cilantro	1	-	1	-	1	1	-	4
Cúrcuma	-	-	-	-	-	1	-	1
Frijol	-	-	-	-	1	1	-	2
Habichuela	-	-	1	-	2	1	-	4
Lechuga	1	-	-	-	3	1	-	5
Pepino cohombro	-	-	1	-	1	-	-	2
Pimentón	-	-	-	-	2	1	-	3
Rábano	-	-	-	-	2	-	-	2
Repollo	-	-	-	-	-	1	-	1
Sagú	-	-	-	-	-	1	-	1
Tomate	1	-	1	1	3	1	-	7
Yuca	1	1	3	1	4	3	1	14
Zanahoria	-	-	-	-	1	1	-	2

Fuente: Datos obtenidos por la secretaria de desarrollo rural de la alcaldía municipal.

Se puede apreciar que los corregimientos con mayor diversidad de especies hortícolas sembradas son los corregimientos 5 y 6. Esto se debe a que estos corregimientos se encuentran ubicados en la parte noroccidente del municipio, franja donde inicia el piedemonte con la zona de montaña. En estas áreas, conforme a la información climática, la temperatura media oscila entre los 18 y 24 °C, temperatura dentro de los rangos óptimos de crecimiento para cada una de estas

especies encontradas en el municipio (Tabla 8). Se puede apreciar también que la yuca es una de las hortalizas que más se siembra para el autoconsumo por los campesinos del municipio, seguido de la cebolla larga y el tomate.

En cuanto a la cantidad de radiación fotosintéticamente activa, se observa que, para las especies hortícolas encontradas, el DLI medio mensual del municipio supera los DLI requeridos para algunas de estas especies. Pudiendo incidir negativamente sobre el fotosistema, acelerar la senescencia en las plantas (Shibaeva, *et al.*, 2022). Por lo que se podría contemplar el uso de coberturas que mitiguen el impacto de la radiación directa sobre las plantas, como las cubiertas difusas o cubiertas NIR.

Tabla 8. Condiciones de temperatura y DLI para las hortalizas sembradas en el municipio de Villavicencio- Meta

Tipo de Hortaliza	Hortalizas	Temperatura optima de crecimiento (°C)	Temperatura Min (°C)	Temperatura Max (°C)	DLI requerido (mol/m ² /día)
Fruto	Ahuyama	18-24	10	33	-
	Ají	21-30	19	35	20
	Habichuela	22-26	16	28	22
	Pepino cohombro	23-25	20	35	20
	Pimentón	21-25	19	27	20
	Tomate	20-24	19	27	22
Hoja	Cebolla larga	13-24	7	30	-
	Cebollín	13-24	7	30	-
	Cilantro	19-27	17	30	-
	Lechuga	15-18	7	24	14
	Repollo	20-25	5	29	12
Raíces y tubérculos	Arracacha	15-16	15	22	-
	Cúrcuma	18-27	18	30	-
	Rábano	16-19	5	24	12
	Sagú	18-24	16	32	-
	Yuca	25-29	16	38	-
	Zanahoria	15-21	7	24	-
Semillas	Frijol	18-25	17	35	22

Fuente: Datos tomados de Ugas et al., (2000); González, (2013); Lombardia, (2023).

Bajo este contexto, el municipio de Villavicencio presenta una oferta de productos hortícolas que varían desde semillas, hojas, frutos a raíces y tubérculos. Los diferentes pisos térmicos que presenta el municipio generan zonas climáticas focalizadas que permiten el establecimiento y producción de especies hortícolas

bajo sistemas de producción protegida en cultivos sin suelo, ya que este sistema puede generar menor impacto ambiental, en cuanto a superficie de área, en la adecuación del sitio a establecer la unidad productiva y contribuir en un menor uso de plaguicidas agrícolas; diversificando así su producción y consumo de hortalizas. Se calcula que el consumo per cápita al día de hortalizas en Colombia es de 100 gr/día (Agrosavia, 2020), comparado con la oferta de abastecimiento para el año 2020 en el municipio de Villavicencio, para ese año la cantidad que podía consumir cada habitante por día correspondía a un 0,05 kg/día, es decir la mitad del promedio nacional. Estas cifras se encuentran por debajo de los índices de consumo planteado por la Organización Mundial de la Salud, que indican que, para tener una buena salud y reducir el riesgo de varias enfermedades no transmisibles se debe consumir 400 gr/día de frutas y verduras crudas o mínimamente procesadas (FAO, 2022).

Al diversificar la producción de alimentos e impactar en menor grado el ecosistema, se contribuye a mejorar la calidad de vida de las personas al implementar dietas más nutritivas, aumentando el potencial de las frutas y verduras producidas localmente con múltiples beneficios hacia la salud humana acortando positivamente la cadena de comercialización del municipio.

Conclusiones

El municipio de Villavicencio al depender demasiado de los sistemas productivos externos de la región y al no contar con sistemas de producción hortícolas dedicados a la comercialización, no presenta una autonomía para tomar decisiones rápidas o resolver problemas de manera independiente cuando la cadena de suministro de alimentos se enfrenta a eventos inesperados.

El municipio de Villavicencio presenta una oferta de productos hortícolas que varían desde semillas, hojas, frutos a raíces y tubérculos. Los diferentes pisos térmicos que presenta el municipio generan zonas climáticas focalizadas que permiten el

establecimiento y producción de especies hortícolas bajo sistemas de producción protegida en cultivos sin suelo; sin embargo, se requiere de la investigación y experimentación local para obtener resultados concretos sobre el comportamiento y producción de las hortalizas que ya se producen de manera local y que se destinan para autoconsumo.

Bibliografía

Agronet. (s.f.). Reporte: área, producción, rendimiento y participación municipal en el departamento por cultivo.

<https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=4>

Agrosavia. (2020, 7 de octubre). Consumo de hortalizas valor nutricional y beneficios en la salud humana.

https://www.fontagro.org/new/uploads/adjuntos/Consolidado_ptt_7_de_octubre_2020.pdf

Bojacá, C., GIL, R. & SCHREVEENS, E. (2011). The greenhouse effect in the high tropics of Colombia: a modeling approach. *Acta Horticulturae* 893, 791-796.

Castañeda, P. (2014). Zonificación climatológica según el modelo Caldas – Lang de la cuenca río negro mediante el uso del Sistema de Información Geográfica SIG. Universidad Militar Nueva Granada.

DANE. (2019, 30 de junio de 2020). Encuesta Nacional Agropecuaria (ENA) 2019. https://geoportal.dane.gov.co/descargas/ena_result/boletin_ena_2019.pdf

FAO. (2020, 7 de mayo). Uso de la tierra en la agricultura según las cifras. <https://www.fao.org/sustainability/news/detail/es/c/1279267/#:~:text=La%20superficie%20de%20tierra%20destinada%20a%20la%20agricultura,restantes%20son%20praderas%20y%20pastizales%20para%20el%20pastoreo.>

FAO. (2023). El estado mundial de la agricultura y la alimentación: Revelar el verdadero costo de los alimentos para transformar los sistemas agroalimentarios. Roma.

FAO. (2022). Taller Internacional FAO/OMS sobre Frutas y Verduras 2020 en preparación para el Año Internacional de las Frutas y Verduras 2021. Roma.

FAO. (2021, 2 de junio). El cambio climático aumentará el riesgo de propagación de plagas, que ya destruyen un 40% de la producción de cultivos. <https://news.un.org/es/story/2021/06/1492762>.

FAO. (2021, 6 de noviembre). Cop26-La expansión agrícola causa cerca del 90% de la deforestación mundial. <https://www.fao.org/newsroom/detail/cop26-agricultural-expansion-drives-almost-90-percent-of-global-deforestation/es#:~:text=06%2F11%2F2021%20Roma%20%E2%80%93%20La%20expansi%C3%B3n%20agr%C3%ADcola%20causa%20cerca,resultados%20de%20su%20nuevo%20estudio%20mundial%20por%20teledetecci%C3%B3n>.

FAO, 2021, La expansión agrícola causa cerca del 90 % de la deforestación mundial

FAO. (2021). Perspectivas de la agricultura y desarrollo rural de las Américas: Una mirada hacia América Latina y el Caribe 2021-2022. San José, Costa Rica.

FAO. (2023). El estado de la seguridad alimentaria y la nutrición: Urbanización, transformación de los sistemas agroalimentarios y dietas saludables a lo largo del continuo rural-urbano. Roma.

Flores, A., Gutierrez, C., Saldaña, N., Saldaña, A. & Saldaña, A. (2018). Estudio de las estrategias para la gestión del clima en invernaderos de baja tecnología en climas cálido. Rev.Mex.Cienc. Agríc. 21: 4383- 4394.

Giannoulis, A., Briassoulis, D., Nikoleta-Georgia, P. & Mistriotis, A. (2021). Evaluation of insect-proof agricultural nets with enhanced functionality. Biosystems Engineering 208: 98-112.

Gobernación del Meta. (2021). Evaluaciones agropecuarias municipales 2020. Secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural.

González, M. 2013. Nuevas fichas hortícolas [tercera edición]. Instituto de investigaciones agropecuarias, 246: 58p.

Grupo Banco Mundial. (2019, 16 de septiembre). La innovación agrícola y la tecnología son la clave para reducir la pobreza en los países en desarrollo, según un informe del Banco Mundial. <https://www.bancomundial.org/es/news/press-release/2019/09/16/agricultural-innovation-technology-hold-key-to-poverty-reduction-in-developing-countries-says-world-bank>

[report#:~:text=De%20acuerdo%20con%20un%20nuevo%20informe%20del%20Banco,demanda%20de%20alimentos%20y%20hacer%20frente%20a%20lo](#)

Hu, T., Zhang, X., Khanal, S., Wilson, R., Leng, G., Toman, E., Wang, X., Li, Y. & Zhao, K. (2024). Climate change impacts on crop yields: A review of empirical findings, statistical crop models, and machine learning methods. *Environmental Modelling & Software* 179: 106-119.

IPCC. (2023). Climate change 2023 synthesis report. Geneva, Switzerland.

Impron, I., Hemming, S. & Bot G. (2007). Simple greenhouse climate model as a design tool for greenhouses in tropical lowland. *Biosystems Engineering* 98: 79-89.

Jaramillo, J., Rodríguez, V., Aguilar, P. & Restrepo, J. (2013). Producción bajo condiciones protegidas. En J. Jaramillo, V. Rodríguez, L. Gil, M. García, J. Clímaco, D. Quevedo, G. Sánchez, P. Aguilar, L. Pinzón, M. Zapata, J. Restrepo & M. Guzmán. (Eds.). *Tecnología para el cultivo de tomate bajo condiciones protegidas*. (pp. 15-55). Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria.

Kapanen, A., Schettini, E., Vox, G. & Itavaara, M. (2008). Performance and Environmental Impact of Biodegradable Films in Agriculture: A Field Study on Protected Cultivation. *J Polym Environ* 16: 109-122.

Leguizamón. (2018). Historia de la horticultura. INTA, Buenos Aires.

Lombardia, A. (2023), "Dataset on Crop Species Daily Light Integrals (DLIs) and Yields", Mendeley Data,1. doi: 10.17632/3shw2jx2wk.1

MADR. (2021, abril). Cadena de las hortalizas. Dirección de cadenas agrícolas y forestales. <https://sioc.minagricultura.gov.co/Hortalizas/Documentos/2021-03-30%20cifras%20sectoriales.pdf>

Marín-Benítez, A., Marín-Escobar, J., Maury-Mena, S. & Maury, A. (2023). Caracterización e inventario ambiental de cultivos bajo invernadero en Tenjo, Colombia. *SciELO* 36(1). <https://doi.org/10.18273/revion.v36n1-2023006>

Martínez, P. & Roca, D. (2011). El control del clima de los invernaderos de plástico. Un enfoque actualizado. En Flórez, V. (Ed.). *Sustratos, manejo del clima, automatización y control en sistemas de cultivo sin suelo*. (pp. 179-245). Universidad Nacional De Colombia.

Metoblue. (s.f). Datos climáticos y meteorológicos históricos simulados para Villavicencio.

https://www.meteoblue.com/es/tiempo/historyclimate/climatemodelled/villavicencio_colombia_3665900

McCartney, L., Lefsrud, M. & Orsat, V. (2018). An experimental study of the cooling performance and airflow patterns in a model Natural Ventilation Augmented Cooling (NVAC) greenhouse. *Biosystems Engineering*, 174: 173-189.

Moreno, M. L. (2015). Análise da interação entre ordenamento territorial e biodiversidade: estudo de caso em Villavicencio (Meta, Colômbia). Sao Carlos, Brasil: Tese(Doutorado) Universidade Federal de Sao Carlos.

Ortiz-Alamilla, A., Neri-Suárez, M., López-González, J. & Vilaboa-Arroniz, J. (2023). Análisis de la agricultura protegida y sus impactos socioambientales en tres municipios de la Sierra Nevada de Puebla, México. *Revista de Ciencias Sociales y Humanidades*, 8 (36).

Ortiz, G., Numa, S., Gómez, L., Rodríguez, J. & Villagran, E. (2022). La técnica del cultivo sin suelo y su contribución al mejoramiento tecnológico de la agricultura bajo cubierta: Un análisis bibliométrico. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar* 6(7):17-38. DOI:[10.37811/cl_rcm.v6i7.3887](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v6i7.3887)

Pérez, C. Ramírez, J. & López, I. (2016). Características aerodinámicas de mallas anti-insectos usadas en ventanas de invernaderos en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 7 (3): 493-506.

Rodríguez-Alba, E., Bernal, A., Gaitán, H., Kim, C., Salguero, J., Toledo, E., Vásquez, C. & Martínez-Richa, A. (s.f.). La Ciencia de los Polímeros Biodegradables. XXVI Verano de la Ciencia 10.

Samanta, S., Kumar, S. & Khoisnam, N. (2023). Current status, future prospects, and obstacles for protected cultivation in India. *Agri Journal World* 3(2): 21-27.

Shibaeva, T., Mamaev, A., Sherudilo, E. & Titov, A. (2022). The role of photosynthetic daily light integral in plant response to extended photoperiods. *Russian Journal of Plant Physiology* 69(7).
<https://doi.org/10.1134/S1021443722010216>

Singh, B., Delgado-Baquerizo, M., Egidi, E., Guirado, E., Leach, J., Liu, H. & Trivedi, P. (2023). Climate change impacts on plant pathogens, food security and paths forward. *Nature Reviews Microbiology* volume 21: 640–656

Teitel, M. (2006). The effect of screens on the microclimate of greenhouses and screenhouses - a review. *International Society for Horticultural Science* [10.17660/ActaHortic.2006.719.67](https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2006.719.67)

Ugás R., Siura, S., Delgado de la Flor, F., Casas, A. & Toledo, J. 2000. Datos básicos de hortalizas. Programa de Hortalizas, Universidad nacional Agraria La Molina, Lima. 202 p

UNCCD. (2014). The land in numbers livelihoods at a tipping point. Bonn, Germany.

UPRA. (2024, 6 de agosto). Frontera agrícola nacional. https://upra.gov.co/es-co/Documents/01_Frontera_Agricola.pdf

UPRA. (2024, 15 de agosto). Producto Interno Bruto PIB II trimestre de 2024. <https://upra.gov.co/es-co/Paginas/boletines-reportes.aspx>

University of Copenhagen. (2024, 3 de junio). Greenhouses cover more and more of Earth's Surface. <https://science.ku.dk/english/press/news/2024/greenhouses-cover-more-and-more-of-earths-surface/>

Urrestarazu. 2015. Manual práctico del cultivo sin suelo e hidroponía. Mundi Prensa.

Villagrán, E. (2016). Diseño y evaluación climática de un invernadero para condiciones de clima intertropical de montaña (Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia).

Villagrán, E., Bojacá, C. & Rojas, N. (2018). Determinación del comportamiento térmico de un invernadero espacial colombiano mediante dinámica de fluidos computacional. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 21 (2): 415 – 426. <https://doi.org/10.31910/rudca.v21.n2.2018.1070>

Villagrán, E. & Bojacá, C. (2019). Simulación del microclima en un invernadero usado para la producción de rosas bajo condiciones de clima intertropical. *Chilean J. Agric. Anim. Sci., ex Agro-Ciencia*, 35(2):137-150.

Villagrán, E., Jaramillo, J. & León-Pacheco. R. (2020). Ventilación natural en invernadero con mallas anti-insecto evaluadas con un modelo computacional de fluidos. *Agronomía Mesoamericana*, 31(3):709-728

Villagrán, E. & Nuba-Vergel, S. (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. (p. 259).

Agrosavia

Villagrán, E., Nuba-Vergel, S. & Rodriguez, Y. (2023). Materiales de cubierta y cerramiento para la construcción de invernaderos: criterios técnicos para su selección. En Villagrán, E. & Nuba-Vergel, S. (Eds.). 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. (pp. 63-85). Agrosavia.

Xu, G., Liu, X., Wang, Q., Xiong, R. & Hang, Y. (2017). Effects of screenhouse cultivation and organic materials incorporation on global warming potential in rice fields. *Environ Sci Pollut Res* 24: 6581–6591.