Agricultura Vertical Inteligente para Impulsar la Resiliencia de los Sistemas Alimentarios Urbanos en Colombia: Retos y Estrategias

Programa de Maestría en Ingeniería

Presentado por:
Juan Sebastian Eastman González

Dirigido por:
Luis Eduardo Tobón Llano

Pontificia Universidad Javeriana Cali
Facultad de Ingeniería y Ciencias
Junio 2025

Índice general

Resumen ix
Abstract x
Glosario xi
1. Introducción 15
1.1. Planteamiento del problema 16
1.2. Objetivos 18
1.2.1. Objetivo general 18
1.2.2. Objetivos específicos 19
1.3. Justificación y Alcance 19
1.4. Antecedentes 20
2. Bases teóricas y revisión del conocimiento actual 34
2.1. Sostenibilidad y seguridad alimentaria en la Era de la arquitectura vertical inteligente .. 34
2.2. Benchmarking y análisis comparativo en modelos agronómicos con enfoque en la automatización 44
2.2.1. Innovación tecnológica y agronomía para la agricultura vertical 46
2.2.2. Legislación y políticas públicas internacionales y nacionales que fomentan la agricultura vertical inteligente 50
2.3. Simulación paramétrica y diseño sostenible aplicados a sistemas automatizados 55
2.3.1. Agronomía de precisión en la agricultura vertical 59
2.4. Análisis multicriterio y enfoque sistémico en el desarrollo de agricultura vertical inteligente 62
2.5. Economía circular y valoración de servicios ecosistémicos en sistemas automatizados .. 64
2.6. Contexto de aplicación: Cali, Colombia 66
2.6.1. Contexto demográfico y socioeconómico de Colombia 67
2.6.2. Análisis del consumo agroalimentario de Colombia 68
2.6.3. Condiciones climáticas de Cali 78
2.7. Fundamentos de los modelos matemáticos aplicados 83

2.7.1 Teoría de la eficiencia fotosintética y conversión energética 85
2.7.2. Bases teóricas de los modelos de rendimiento en biomasa 87
2.7.3. Modelado de costos energéticos en sistemas agrícolas controlados 89
3. Diseño metodológico y procedimientos de investigación 92
3.1. Diseño del estudio 92
3.2. Técnicas e instrumentos 92
3.3. Proceso de análisis de datos 93
3.4. Selección y aplicación de modelos matemáticos 94
3.5. Procedimiento de cálculo 95
3.6. Limitaciones y supuestos del estudio 96
3.7. Proceso de validación de resultados 96
4. Resultados y análisis: Evaluación del modelo de agricultura vertical para Cali 98
4.1. Análisis de las entrevistas a expertos 98
4.1.1. Integración de tecnologías en la agricultura vertical 98
4.1.2. Componentes tecnológicos y su integración 99
4.1.3. Selección de cultivos para sistemas de producción vertical 99
4.1.4. Beneficios de la agricultura vertical en entornos urbanos 100
4.1.5. Retos y barreras para la implementación 100
4.1.6. Viabilidad económica y estrategias presentes y futuras de implementación 101
4.2. Modelación matemática de la eficiencia fotosintética y costos energéticos 102
4.2.1. Estimación del rendimiento en biomasa seca por mol de fotones 102
4.2.2. Costos energéticos asociados a la iluminación artificial 104
4.2.3. Proyección de costos operativos anuales: Análisis de escenarios 109
4.3. Evaluación sistémica multicriterio de la viabilidad del modelo de agricultura vertical para Cali 115
4.3.1. Metodología de análisis multicriterio aplicada 115

4.3.2. Diseño de la matriz multicriterio 116
4.3.3. Metodología de cálculo para cada dimensión 117
4.3.4. Resultados del análisis multicriterio e interpretación económica a largo plazo 126
4.3.5. Análisis sistémico de interrelaciones entre variables 129
4.3.6. Evaluación integrada de escenarios 131
4.3.7. Análisis de sensibilidad 133
4.3.8. Implicaciones para la implementación en Cali 135
5. Especificaciones técnicas y arquitectura del sistema propuesto 138
5.1. Listado estructurado de requerimientos 138
5.1.1. Requerimientos funcionales 138
5.1.2. Requerimientos no funcionales 139
5.2. Análisis comparativo de sensores comerciales 140
5.2.1. Tipos de sensores 140
5.2.2. Especificaciones técnicas 141
5.2.3. Costos aproximados 141
5.2.4. Ventajas y desventajas de cada tipo de sensor 142
5.3. Sistemas de control y automatización 142
5.3.1. Justificación del uso de sistemas industriales SCADA 142
5.3.2. Descripción de los sistemas de control recomendados 143
5.3.3. Arquitectura del sistema de control 144
5.4. Integración de componentes del sistema 144
5.4.1. Protocolos de comunicación 144
5.4.2. Topología de red 145
5.4.3. Cableado y conexiones 146
5.5. Diseño de software y algoritmos de control 147

5.5.1. Descripción general de las funcionalidades requeridas 147
5.5.2. Módulos principales del sistema 148
5.5.3. Diagramas de flujo de datos y procesos 148
5.6. Consideraciones de seguridad y mantenimiento 149
5.6.1. Medidas de seguridad eléctrica y física 149
5.6.2. Procedimientos de mantenimiento preventivo 150
5.6.3. Gestión de repuestos y consumibles 151
6. Proyecciones y líneas de desarrollo futuro 153
6.1. Optimización del Uso de Recursos para la automatización de Riego y Nutrientes 153
6.2. Control Ambiental Avanzado para la Regulación Climática 154
6.3. Detección y Diagnóstico de Anomalías para la Monitorización de Salud del Cultivo ... 156
6.4. Análisis Predictivo y Mantenimiento Preventivo para la Previsión y Planificación 157
6.5. Optimización y Aprendizaje Continuo para el Ajuste permanente de los Modelos 157
6.6. Interacción y Automatización Mejoradas para Interfaces Inteligentes 158
6.7. Integración de Datos y Modelos para mejorar la Conectividad y Escalabilidad 158
7. Conclusiones 160
Referencias Bibliográficas 163
Anexos 169
Anexo 1 Criterios de Inclusión y Exclusión de la revisión bibliográfica y de literatura 169
Anexo 2 Guion encuesta para expertos 171
Anexo 3 Ponderación de criterios 174

Índice de Tablas

Tabla 1: Transformación de la agricultura hacia la llamada Agricultura 4.0 por las tecnologías digitales 22
Tabla 2: Cinco dimensiones del Big Data aplicadas a la agricultura vertical 25
Tabla 3: Desafíos que enfrenta la región en términos de seguridad alimentaria, sostenibilidad y equidad 29
Tabla 4: Perfil del Sistema Alimentario de Cali 31
Tabla 5: ODS consecuentes con la implementación de tecnologías derivadas de la cuarta revolución industrial en el sector agrícola 42
Tabla 6: Aplicaciones básicas del análisis multicriterio 62
Tabla 7: Tecnología disponible en las unidades de producción colombianas 71
Tabla 8: Modelos predominantes de producción agrícola en Colombia 73
Tabla 9: Regulaciones sobre seguridad alimentaria aplicables al sector de verduras frescas en Colombia 75
Tabla 10: Nomenclatura para modelos matemáticos utilizados. 84
Tabla 11: Escenario base – Condiciones estándar 109
Tabla 12: Escenario optimista – Alta eficiencia tecnológica 110
Tabla 13: Escenario pesimista - Condiciones desfavorables 110
Tabla 14: Escenarios con integración solar 40% - Análisis detallado de inversión 111
Tabla 15: Escenario con integración solar 100% - Autoabastecimiento energético completo 113
Tabla 16: Resultados análisis comparativo 114
Tabla 17: Indicadores y valores representativos por dimensión 118
Tabla 18: Sustento teórico para variables dimensión técnica 119
Tabla 19: Sustento teórico para variables dimensión económica 121
Tabla 20: Sustento teórico para variables dimensión ambiental 123
Tabla 21: Sustento teórico para variables dimensión social 124
Tabla 22: Matriz multicriterio 127
Tabla 23: Análisis de costo total acumulado a 15 años (millones COP) 128
Tabla 24: Valor Actual Neto de costos a 15 años (millones COP) 129
Tabla 25: Tabla comparativa de resultados 131
Tabla 26: Requerimientos funcionales mínimos de un sistema de agricultura vertical 138

Tabla 27: Requerimientos no funcionales mínimos de un sistema de agricultura vertical……139
Tabla 28: Ventajas y desventajas de tipo de sensores……..……..…142
Tabla 29: Tipos de cableado, características y usos…….……..…146
Tabla 30: Medidas de seguridad mínimas en entornos industriales……..…150
Tabla 31: Procedimientos de mantenimiento……151

Índice de Figuras

Figura 1: Las cuatro revoluciones. 35
Figura 2: Degradación de la tierra. 40
Figura 3: Nivel de estrés hídrico debido al sector agrícola, por cuenca. 40
Figura 4: Principios de la agricultura sostenible. 58
Figura 5: La red urbana de Colombia. 68
Figura 6: Temperaturas máximas y mínimas promedio en Cali. 79
Figura 7: Categorías de nubosidad en Cali. 80
Figura 8: Horas de luz natural en Cali. 81
Figura 9: Probabilidad diaria de precipitación en Cali. 81
Figura 10: Modelamiento de los Grados día de crecimiento en Cali 82
Figura 11: Sistema de riego inteligente 154
Figura 12: Simulacion de ambientel 155
Figura 13: Sistema de deteccion 156

Resumen

La presente investigación se propone desarrollar un modelo avanzado de agricultura vertical para la ciudad de Cali. Este modelo integra soluciones tecnológicas de vanguardia, automatizadas e inteligentes, adaptadas a las especificidades climáticas, socioeconómicas y legales locales. Los objetivos específicos incluyen identificar y analizar los requerimientos técnicos, agronómicos y legales necesarios para el establecimiento de un modelo de agricultura vertical en Cali, realizar un estudio comparativo con modelos de referencia internacional y analizar iniciativas locales exitosas. Además, se busca establecer un predimensionamiento técnico específico mediante simulaciones avanzadas y evaluar integralmente los aspectos técnicos, financieros, sociales y ambientales de la propuesta. La metodología empleada combinó enfoques cualitativos y cuantitativos. Se llevó a cabo una revisión sistemática de literatura y un análisis documental de proyectos y estudios de caso relevantes. Se realizaron entrevistas semi-estructuradas a expertos en agricultura urbana para obtener información detallada sobre los requisitos técnicos y las mejores prácticas. Asimismo, se utilizaron paquetes de software para modelado y simulación, y se aplicó una matriz de evaluación multicriterio para analizar la viabilidad y sostenibilidad del modelo propuesto. Los resultados indican que la agricultura vertical inteligente y automatizada ofrece ventajas significativas sobre la agricultura convencional, incluyendo un mayor control del ambiente de cultivo, menor uso de agua y pesticidas, y la capacidad de cultivar en áreas urbanas. Sin embargo, enfrenta desafíos como la alta inversión inicial y la necesidad de habilidades técnicas específicas. Los entrevistados destacaron la importancia de la eficiencia en el uso de recursos, la optimización de la producción y la creación de valor agregado mediante la venta de productos frescos y de alta calidad. Se concluye que, aunque existen barreras, la implementación de la agricultura vertical puede mejorar la seguridad alimentaria y la sostenibilidad urbana en Cali, promoviendo la resiliencia de los sistemas alimentarios locales.

Palabras clave: Agricultura vertical inteligente, Automatización, Resiliencia, Sistemas Alimentarios Urbanos, Desarrollo sostenible.

Abstract

The present research aims to develop an advanced vertical farming model for the city of Cali. This model integrates cutting-edge, automated, and intelligent technological solutions tailored to the local climatic, socioeconomic, and legal specificities. The specific objectives include identifying and analyzing the technical, agronomic, and legal requirements necessary for establishing a vertical farming model in Cali, conducting comparative study with international reference models, and analyzing successful local initiatives. Additionally, it seeks to establish a specific technical pre-dimensioning through advanced simulations and comprehensively evaluate the technical, financial, social, and environmental aspects of the proposal. The methodology employed combined qualitative and quantitative approaches. A systematic literature review and a documentary analysis of relevant projects and case studies were conducted. Semi-structured interviews with urban agriculture experts were carried out to obtain detailed information on technical requirements and best practices. Software packages for modeling and simulation were also used, and a multi-criteria evaluation matrix was applied to analyze the feasibility and sustainability of the proposed model. The results indicate that intelligent and automated vertical farming offers significant advantages over conventional agriculture, including greater control over the cultivation environment, reduced water and pesticide usage, and the ability to cultivate in urban areas. However, it faces challenges such as high initial investment and the need for specific technical skills. The interviewees highlighted the importance of resource use efficiency, production optimization, and value creation through the sale of fresh, high-quality products. It is concluded that, despite existing barriers, the implementation of vertical farming can improve food security and urban sustainability in Cali, promoting the resilience of local food systems.

Keywords: Smart Vertical Farming, Automation, Resilience, Urban Food Systems, Sustainable Development.

Glosario

Agricultura de precisión –Precision agriculture: Uso de tecnologías de información, sensores, imágenes satelitales, sistemas de posicionamiento global, y otras tecnologías para recolectar datos sobre condiciones de cultivo y suelos. Estos datos permiten tomar decisiones optimizadas sobre labores agrícolas como siembra, fertilización y cosecha, logrando un mejor uso de insumos y mayor productividad.

Agricultura vertical – Vertical farming: Es un sistema de cultivo innovador que permite la producción agrícola en múltiples niveles superpuestos o en estructuras verticalmente integradas, como edificios, torres o contenedores. Este método se caracteriza por su capacidad para producir alimentos en ambientes controlados dentro de áreas urbanas o espacios reducidos, optimizando el uso del suelo y los recursos hídricos, y minimizando la necesidad de pesticidas y fertilizantes.

Analítica de drones – Drone analytics: Captura de imágenes de alta calidad de cultivos en tiempo real en sus diferentes estadios. Esto permite la creación de medidas preventivas y correctivas en el suministro de agua, el uso de fertilizantes, la eliminación de plagas y el uso de bioinsumos.

Analítica de volúmenes de datos – Big data analytics: Técnicas avanzadas para la recolección, almacenamiento y procesamiento de grandes cantidades de datos generados con frecuencia. Los algoritmos neuronales permiten la previsión y la acción utilizando datos almacenados.

Aprendizaje automático – Machine learning: Es una rama de la inteligencia artificial que permite a las computadoras aprender y mejorar en tareas a partir de datos, sin necesidad de estar explícitamente programadas. En agricultura permite, por ejemplo, analizar imágenes para identificar malezas o predecir rendimientos.

Benchmarking: Proceso de comparar las prácticas, rendimientos y eficiencias de una explotación agrícola con los estándares establecidos por líderes en el sector o con prácticas de otras explotaciones agrícolas, con el objetivo de identificar áreas de mejora, promover la innovación

y mejorar la competitividad y sostenibilidad de las operaciones agrícolas. Este proceso implica el análisis sistemático de datos y la implementación de mejores prácticas.

Bioinsumos – Bioinputs: Insumos elaborados a partir de recursos naturales y biológicos, como microorganismos, feromonas y extractos vegetales. Son alternativas sustentables a insumos químicos tradicionales. Su aplicación precisa mediante agricultura digital aumenta efectividad y reduce costos.

Cadena de bloques – Blockchain: Es una tecnología que se enfoca en garantizar la seguridad y confiabilidad de la transferencia de volúmenes de datos encriptados, no encriptados y particionados. Para el sector agrícola, esta tecnología implica contratos inteligentes que protegen los datos almacenados en su tránsito desde el origen hasta el usuario, garantizando el origen y la legitimidad de cualquier proceso (transacción) con estos, como los datos sobre la calidad de los productos perecederos.

Computación en la nube – Cloud computing: Uso de servidores y software remotos a los que se accede vía internet, en lugar de utilizar recursos informáticos locales. Permite el procesamiento y almacenamiento de grandes volúmenes de datos. Es crucial para aplicaciones de agricultura digital que requieren analizar datos de diferentes fuentes.

Economía circular – Circular economy: Es un enfoque sistémico que busca reducir el desperdicio, maximizar la eficiencia de los recursos y fomentar la reutilización y el reciclaje de insumos y productos a lo largo del ciclo de vida agrícola.

Internet de las cosas – Internet of things: Ofrece a la industria una variedad de oportunidades para monitorear y controlar remotamente las actividades de la cadena de valor. La computación en la nube (cloud computing), que almacena y analiza datos de procesamiento, transporte y mercado en tiempo real, permite la agricultura de precisión. La temperatura, la humedad, el estado fisiológico, la generación de enfermedades y los nutrientes son procesados y entregados al tomador de decisiones para que los tomen medidas. A través de los sistemas ciberfísicos, se facilita la conexión entre la realidad y la virtualidad.

Resiliencia – Resilience: Se refiere a la capacidad de los sistemas agrícolas y ecosistemas asociados para resistir, adaptarse y recuperarse de perturbaciones o cambios adversos, como fenómenos climáticos extremos, plagas, enfermedades o fluctuaciones económicas.

Robots agrícolas – Agriculture robots: Su inserción se enfoca en cualquier eslabón de la cadena de valor, apoyando las actividades de producción, procesamiento, distribución y consumo. Los brazos robóticos utilizados en agricultura para tareas de irrigación, administrar la temperatura y la humedad en atmosferas controladas e introducir nutrientes son un ejemplo de esto. Se distinguen tres tipos de robots: el primero se refiere a la agricultura a cielo abierto cuya tarea es la irrigación; el segundo se refiere a las instalaciones para controlar las actividades de la granja y monitorear el rendimiento del cultivo; y el tercero se refiere a la ganadería para el cuidado de los animales.

Seguridad alimentaria – Food safety: Desde una perspectiva agronómica, es la capacidad de asegurar que todas las personas tengan acceso en todo momento a suficientes alimentos nutritivos y seguros para satisfacer sus necesidades nutricionales y preferencias alimentarias, con el fin de llevar una vida activa y saludable.

Sensores remotos inalámbricos – Wireless remote sensors: Las tecnologías de posicionamiento (GPS), la transmisión de datos por Bluetooth y la identificación de radiofrecuencia (RFID) ayudan a registrar posiciones y movimientos en tiempo real e histórico, recopilar datos por proximidad a través de dispositivos emisores y receptores, e identificar objetos y animales a lo largo de la cadena de valor. En general, estas tecnologías permiten una trazabilidad completa.

Servicio ecosistémico – Ecosystem service: Se refiere a los beneficios que los ecosistemas proporcionan a la agricultura y a la sociedad en general, los cuales incluyen la polinización de cultivos, el control biológico de plagas, la regulación hídrica, la fertilidad del suelo y la protección contra la erosión.

Sistema Alimentario Urbano – Urban food system: Engloba el conjunto de procesos, infraestructuras y actores involucrados en la producción, procesamiento, distribución, acceso y consumo de alimentos dentro de las áreas urbanas y periurbanas. Este concepto abarca la integración de prácticas agrícolas sostenibles en el entorno urbano, con el fin de mejorar la seguridad alimentaria, reducir la dependencia de cadenas de suministro largas y fomentar economías locales. Los sistemas alimentarios urbanos incluyen también la gestión de residuos orgánicos y la promoción de dietas saludables y sostenibles entre la población urbana.

Sistemas ciber-físicos – Cyber-physical systems: Integración entre sistemas físicos y procesos computacionales, mediante sensores, software y conectividad. Permite monitorear procesos agrícolas y responder de manera automatizada o semi-automatizada.

Sostenibilidad – Sustainability: En agronomía, la sostenibilidad se refiere al desarrollo y aplicación de técnicas y prácticas agrícolas que permiten la producción de alimentos, fibras y otros productos vegetales de manera que se conserven los recursos naturales, minimicen los impactos negativos sobre el medio ambiente y aseguren la viabilidad económica y la equidad social para las generaciones presentes y futuras.

1. Introducción

La transición hacia sistemas alimentarios sostenibles y resilientes se ha posicionado como un imperativo global ante los desafíos que imponen el crecimiento demográfico, la urbanización acelerada y el cambio climático (Maceira, et al., 2023). En este escenario, la agricultura vertical emerge como una innovación disruptiva con el potencial de reconfigurar las prácticas agrícolas urbanas, integrando tecnologías avanzadas para el cultivo en espacios reducidos y controlados. La presente investigación se enfoca en la implementación de la agricultura vertical inteligente en Colombia, un país que enfrenta retos particulares en términos de seguridad alimentaria, uso eficiente de los recursos naturales y equidad social.

La creciente demanda de alimentos, impulsada por una población que se espera alcance los 10 mil millones a nivel global para el año 2050, requiere enfoques innovadores que garanticen la producción sostenible (FAO, 2024). La agricultura vertical se presenta como una solución estratégica, capaz de producir alimentos de manera intensiva y sostenible en el corazón de las ciudades, minimizando la huella de carbono asociada al transporte y al uso de suelo agrícola tradicional (Schteingart, 2023). No obstante, su adopción enfrenta retos significativos, especialmente en países en desarrollo como Colombia, donde la integración de soluciones tecnológicas en el sector agrícola aún se encuentra en etapas iniciales.

Este estudio busca explorar los desafíos y oportunidades de la agricultura vertical inteligente en el contexto urbano colombiano, identificando estrategias de implementación que promuevan la seguridad alimentaria urbana, la sostenibilidad ambiental y el desarrollo económico inclusivo. A través de un enfoque metodológico mixto, se analizan las condiciones técnicas, legales y socioeconómicas necesarias para el éxito de estos sistemas innovadores de cultivo, con especial énfasis en las particularidades del contexto colombiano.

El interés por la agricultura vertical en Colombia se justifica por su potencial para contribuir a resolver problemas estructurales como la dependencia alimentaria de centros urbanos respecto a las zonas rurales circundantes, la ineficiencia en el uso de recursos y la necesidad de fortalecer la resiliencia ante crisis climáticas y económicas. A pesar de los casos de éxito internacional en la implementación de la agricultura vertical, en Colombia su desarrollo se ha visto limitado por

factores como políticas públicas insuficientes, escaso acceso a financiamiento y falta de capacitación técnica (Sabourín, et al., 2014).

Por tanto, esta investigación se propone no solo identificar y analizar las barreras existentes para la adopción de la agricultura vertical en Colombia, sino también proponer un conjunto de estrategias viables y específicas que faciliten su integración en los sistemas alimentarios urbanos del país. Estas estrategias se enfocan en el diseño técnico apropiado a las condiciones locales, la formulación de políticas públicas de apoyo, el desarrollo de modelos financieros accesibles y la generación de capacidades técnicas y de gestión entre los actores relevantes.

La presente investigación aspira a ser una contribución valiosa al campo de la agronomía urbana y la planificación de sistemas alimentarios sostenibles, ofreciendo perspectivas prácticas y teóricas para la implementación de la agricultura vertical inteligente en Colombia, con aplicación directa al estudio del caso de Cali. Con ello, se busca no solo avanzar hacia la autosuficiencia alimentaria y la sostenibilidad urbana, sino también inspirar a otras regiones y países en desarrollo a explorar y adaptar estas tecnologías innovadoras en el marco de sus propios desafíos y oportunidades.

1.1. Planteamiento del problema

El crecimiento económico y la dinámica poblacional están impulsando cambios estructurales en las economías a nivel mundial, lo que tiene un impacto significativo en la seguridad alimentaria y la gestión de recursos naturales. Este proceso de transformación se refleja en la disminución de la participación de la agricultura en la producción y el empleo totales, planteando así desafíos diversos en diferentes regiones (FAO, 2017).

En el contexto global, la proyección de que la población alcance casi 10 mil millones de personas para el año 2050 representa un desafío formidable en términos de seguridad alimentaria y gestión de recursos naturales. Este crecimiento demográfico conlleva una demanda adicional de alimentos, estimada en un incremento del 50% en comparación con los niveles de 2013, ejerciendo una presión intensificada sobre los recursos naturales (Benis and Ferrão, 2018).

Por otra parte, la transición dietética hacia alimentos con mayor intensidad de recursos, como la carne, implica no solo un aumento en la cantidad de alimentos producidos, sino también un cambio en el tipo de producción agrícola, lo que puede tener consecuencias negativas para el medio ambiente. La ganadería, por ejemplo, es mucho más demandante en términos de recursos como tierra y agua, y tiene un impacto ambiental más significativo en comparación con la producción de cultivos básicos (Benis and Ferrão, 2018).

Según (Kalantari et al., 2017) diversos factores inciden hoy también en la industria alimentaria y su procesamiento, tales como: el crecimiento de la población y sus crecientes necesidades, la reducción de recursos naturales debido a la expansión urbana, la erosión del suelo, diversas formas de contaminación, la aparición de biocombustibles, las restricciones impuestas a las técnicas de producción alimentaria afectadas por las demandas de los consumidores y los proveedores de normativas que exigen mejor calidad, menor uso de químicos y numerosas iniciativas ambientalmente útiles desde el origen hasta el consumidor. Recientemente, las preocupaciones ambientales se han combinado, además, con un creciente interés por la salud, lo que ha llevado a un mayor interés en proveer alimentos saludables e integrarlos en los proyectos de desarrollo sostenible.

Estos desafíos globales también se manifiestan a nivel regional, como en el caso de Bogotá, Colombia, donde según Arias (2020), a pesar de que un 75% del suelo es rural, la ciudad solo logra generar el 5% de los alimentos necesarios para su propio consumo. Esta situación destaca una notable dependencia de Bogotá de las regiones circundantes para satisfacer sus necesidades alimentarias (Arias, 2020).

La dependencia de Bogotá de las regiones circundantes se refleja en cifras que evidencian que, durante el año 2019, la ciudad recibió el 42% de sus alimentos de Cundinamarca, el 15% de Boyacá y el 12% del Meta (Arias, 2020). Esto subraya la necesidad de abordar los desafíos que enfrentan, las ciudades, a su vez que esos espacios rurales proveedores de la ciudad, como la tenencia de la tierra, la asistencia técnica, entre otros (Arias, 2020).

En el caso específico de Cali, la situación presenta características particulares que agravan esta problemática. Como tercera ciudad más poblada de Colombia con aproximadamente 2.5 millones

de habitantes, Cali enfrenta desafíos únicos en términos de seguridad alimentaria. Según el Perfil del Sistema Alimentario de Cali (Rankin et al., 2021), la ciudad depende significativamente de otras regiones para su abastecimiento alimentario, con solo el 10% de los alimentos consumidos producidos en el Valle del Cauca. Esta dependencia se ve agravada por factores como la expansión urbana que ha reducido las áreas agrícolas periurbanas, la vulnerabilidad ante disrupciones en las cadenas de suministro, y las condiciones socioeconómicas donde más del 70% de la población pertenece a estratos 1, 2 y 3, limitando su acceso a alimentos nutritivos. Adicionalmente, las condiciones climáticas tropicales de Cali, con temperaturas entre 19°C y 30°C y alta humedad, presentan tanto oportunidades como desafíos para la implementación de sistemas de agricultura controlada.

Las Granjas Verticales y las Plant Factories han surgido como alternativas prometedoras para aumentar la producción local de alimentos en las ciudades de manera sostenible, en respuesta a esta problemática (Benis and Ferrão, 2018; Thomaier et al., 2015). Sin embargo, la implementación de estas soluciones novedosas presenta diversas dificultades en países en desarrollo como Colombia, como políticas públicas insuficientes, escaso acceso a financiamiento, falta de capacitación técnica y una falta de investigación local (Sotomayor et al., 2021). Esto ha obstaculizado el desarrollo de la agricultura vertical urbana, a pesar de su gran potencial para mejorar la seguridad alimentaria en las ciudades.

De acuerdo con lo anterior, en este trabajo se pretende dar respuesta a la siguiente pregunta de investigación: ¿Qué estrategias de implementación permitirían acelerar la adopción de sistemas de agricultura vertical inteligente en ciudades colombianas, de forma que se promueva la seguridad alimentaria urbana, la sostenibilidad ambiental y el desarrollo económico inclusivo?

1.2.Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Proponer estrategias viables de implementación de un modelo de agricultura vertical para la ciudad de Cali, fundamentadas en el diseño técnico apropiado a las condiciones locales, que permitan acelerar la adopción de esta tecnología en ciudades colombianas de forma sostenible, contribuyendo a la seguridad alimentaria y el desarrollo económico inclusivo.

1.2.2. Objetivos específicos

El objetivo general se pretende alcanzar cuando se desarrollen los siguientes objetivos específicos:

- OE1: Determinar los requerimientos técnicos, agronómicos y legales, mediante un benchmarking con diversos modelos internacionales implementados de agricultura vertical y análisis de casos locales relevantes, de tal forma que se consoliden las condiciones y especificaciones de base para el desarrollo del modelo técnico-productivo viable en el contexto local.
- OE2: Establecer un predimensionamiento técnico para Cali como ciudad piloto, mediante una simulación multiparamétrica garantizando niveles óptimos de eficiencia energética, uso de recursos hídricos y rendimiento de cultivos, así como un análisis comparativo frente a modelos convencionales.
- OE3: Evaluar mediante enfoque sistémico multicriterio aspectos técnicos, financieros, sociales y ambientales del diseño propuesto para la ciudad piloto, realizando los ajustes que permitan garantizar su viabilidad, sostenibilidad y escalabilidad.

1.3. Justificación y Alcance

La agricultura vertical, caracterizada por su innovador aprovechamiento tecnológico, representa una solución estratégica y prometedora frente a los retos de la seguridad alimentaria en las zonas urbanas de Colombia. En este contexto, el gran potencial de la agricultura vertical impulsada y basada en tecnología, es una solución prometedora para mejorar la seguridad alimentaria en las ciudades colombianas. Permite optimizar recursos como espacio, agua y energía, reduciendo la huella ambiental respecto a métodos convencionales. Además, al ubicarse más cerca de los centros de consumo, disminuye costos logísticos y desperdicio. Sin embargo, a pesar de las bondades y de casos exitosos a nivel mundial, la adopción en la región ha sido lenta.

Ante este panorama, el presente trabajo se propuso explorar los desafíos específicos al contexto colombiano e identificar estrategias realistas que faciliten la integración acelerada de la agricultura vertical inteligente en el tejido urbano del país. Este estudio enfatiza la necesidad de adaptar un modelo de agricultura vertical escalable y tecnificado, diseñado para alinearse con las

particularidades locales, promoviendo así un uso racional de los recursos y la generación de ventajas ambientales, sociales y económicas.

Igualmente, el análisis elaborado genera recomendaciones específicas en materia de políticas públicas, esquemas de financiación, programas de formación e investigación aplicada, buscando establecer un ambiente favorable al respaldo de la expansión de la agricultura vertical en Colombia. Este esfuerzo contribuye a reforzar la seguridad alimentaria, la sostenibilidad urbana y el surgimiento de nuevas oportunidades económicas para las comunidades urbanas del país.

El enfoque de este estudio abarca el análisis de requerimientos específicos al contexto colombiano, la modelización de la productividad y el diseño de una propuesta detallada para la implementación de la agricultura vertical inteligente en el país. Esta propuesta se centra especialmente en un diseño técnico funcional ajustado a las condiciones locales de Cali. Mediante la revisión de literatura y el análisis de casos tanto nacionales como internacionales, se determinaron las particularidades locales necesarias para concebir un modelo ajustado a la realidad colombiana. Subsecuentemente, se desarrolló una propuesta que detalla los aspectos técnicos, económicos, regulatorios y la participación de los actores clave.

Como resultado, se presenta un conjunto de estrategias prácticas y efectivas para acelerar la adopción de esta innovadora tecnología en Cali, fomentando la sostenibilidad y la resiliencia de los sistemas alimentarios urbanos.

1.4.Antecedentes

La creciente urbanización global y los desafíos asociados con la seguridad alimentaria y la sostenibilidad ambiental han catalizado el interés en la Agricultura Vertical. Esta aproximación emergente promete redefinir los sistemas alimentarios urbanos, ofreciendo una producción de alimentos más resiliente, eficiente y menos dependiente de las fluctuaciones climáticas y las distancias de transporte. A nivel mundial, la investigación y práctica este método de agricultura se ha expandido significativamente, abordando aspectos clave como la digitalización de la agricultura, la optimización del uso de recursos y la minimización del impacto ambiental de la producción de alimentos.

La tesis doctoral de Baumont de Oliveira (2022), desarrolla un marco innovador que facilita la planificación empresarial con conciencia de riesgo para los agricultores verticales. Esta contribución es especialmente relevante ya que aborda directamente los desafíos de viabilidad y escalabilidad que enfrentan los proyectos de cultivo vertical, ofreciendo soluciones concretas a problemas largamente reconocidos en este campo emergente. A través de la construcción de un modelo probabilístico que evalúa el riesgo financiero de proyectos de cultivo vertical, el trabajo de Baumont de Oliveira destaca por su capacidad para manejar la incertidumbre y las variables múltiples que afectan a estos sistemas agrícolas innovadores. Al integrar datos de 19 proyectos diferentes de Japón y Reino Unido, proporciona una visión amplia de los retos y oportunidades en el cultivo vertical, desde la perspectiva tanto operacional como estratégica.

Primordialmente, se identificó una comprensión deficiente por parte de muchos practicantes sobre aspectos esenciales relacionados con la seguridad alimentaria. La implementación de prácticas de seguridad alimentaria, la identificación de los factores limitantes para el cultivo, el flujo de procesos, las recetas para el crecimiento de los cultivos y la estandarización de los datos son todos elementos que demandan una investigación más profunda. La falta de directrices claras y estandarizadas para estos aspectos resulta en esfuerzos duplicativos por parte de muchas granjas, los cuales restan eficiencia a la producción comercial. Además, el estudio concluye que la funcionalidad de soporte colaborativo de decisiones necesita una exploración adicional para comprender su valor real para los agricultores. Existe poca evidencia de que las aplicaciones web que permiten compartir datos comunitarios brinden beneficios tangibles a sus usuarios. Esta conclusión sugiere entonces, la necesidad de evaluar más detalladamente cómo las herramientas de soporte de decisiones y las plataformas de intercambio de información pueden ser diseñadas o mejoradas para proporcionar ventajas prácticas y operativas significativas a los operadores de granjas verticales (Baumont de Oliveira, 2022).

Abbasi, Martínez y Ahmad (2022), han realizado una revisión exhaustiva de cómo las tecnologías digitales están transformando la agricultura hacia la llamada Agricultura 4.0. Su trabajo analiza tendencias emergentes, el uso de tecnologías digitales en el sector agrícola, e identifica desafíos y oportunidades para el desarrollo de la agricultura inteligente y automatizada, proporcionando con ello un marco valioso que subraya la importancia de las tecnologías digitales para avanzar hacia

sistemas de agricultura más sostenibles, eficientes y resilientes, como la agricultura vertical. Sus aportes más significativos se presentan en la Tabla 1.

Adopción de Tecnologías Digitales en Agricultura:
• Existe evidencia de un creciente interés y aplicación de tecnologías digitales como sistemas robóticos autónomos, Internet de las Cosas (IoT), y aprendizaje automático en la agricultura. Estas tecnologías se exploran significativamente en granjas al aire libre y algo menos en granjas interiores.
Desafíos Técnicos y Socioeconómicos:
• La revisión identifica desafíos técnicos y socioeconómicos para la digitalización del sector agrícola, tales como la necesidad de estándares de interoperabilidad, preocupaciones sobre la seguridad de datos y la falta de infraestructura adecuada.
Potencial de la Agricultura Vertical:
• Las prácticas de agricultura inteligente, como la agricultura vertical, tienen el potencial comprobado de superar problemas de seguridad alimentaria al mejorar la eficiencia y efectividad de la producción agrícola.
Oportunidades de Innovación y Desarrollo:
• Aunque existen casos de uso de tecnologías digitales en la agricultura, muchos están aún en fase prototipo. Esto indica una gran oportunidad para la investigación, innovación y desarrollo de sistemas de agricultura vertical inteligente que fomente colaboraciones entre instituciones académicas, el sector privado, y el gobierno.
Contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible:
• La integración de tecnologías digitales en la agricultura puede contribuir a objetivos más amplios de desarrollo sostenible, incluida la producción de alimentos sostenibles y la mitigación del cambio climático.

Tabla 1: Transformación de la agricultura hacia la llamada Agricultura 4.0 por las tecnologías digitales. Fuente: Abbasi, Martínez y Ahmad (2022)

Kalantari y Otros (2017), tras una revisión de literatura de 62 fuentes distintas de Europa, Asia y América producidas entre 2007 y 2016, presentan una visión optimista y estratégica sobre el papel del cultivo vertical como una solución innovadora y sostenible para los retos agrícolas que enfrenta la humanidad, particularmente en el contexto de un crecimiento demográfico sostenido y la necesidad imperante de vivir en armonía con el resto de los organismos vivos del planeta. Reconocen que, aunque las tecnologías disponibles para reducir el impacto de la agricultura en la tierra y los océanos son limitadas, el cultivo vertical se destaca como uno de los pocos caminos nuevos que vale la pena explorar detenidamente en las próximas dos décadas, especialmente si el objetivo es coexistir de manera balanceada y sostenible con otras formas de vida sin poner en peligro su existencia ni la nuestra.

Desde su análisis, para que esta tecnología alcance su pleno potencial y contribuya significativamente a la sustentabilidad global, es imperativo que cumpla con ciertos criterios esenciales: debe ser económico y accesible, resistente y seguro en su operación, y no depender de subsidios financieros ni de apoyos externos. Bajo estas condiciones, y a través de programas de investigación dinámicos e inclusivos, el cultivo vertical en las ciudades podría proveer alimentos para el 60% de la población urbana para el año 2030 (Kalantari et al., 2017).

Oliveira, Moreira y Silva (2021) ofrecen por su parte, una visión comprehensiva de los avances técnicos y científicos a través de un análisis sistemático de los sistemas robóticos agrícolas. Su estudio recopila y analiza las características predominantes y el estado actual de los sistemas robóticos en la agricultura, a la vez que identifica áreas clave para futuras investigaciones y mejoras, basándose en las ventajas, limitaciones y errores comunes observados en las obras existentes. A través de su revisión sistemática, los autores descubrieron que una proporción significativa de los sistemas robóticos agrícolas se encuentra aún en la etapa de investigación, con un predominio de sistemas sin brazo robótico y una minoría dedicada a tareas específicas como el deshierbe.

También notaron una variabilidad geográfica en el desarrollo de estos sistemas, destacando el papel de investigadores y empresas australianas y europeas. Entre las características observadas, resaltaron la escasa utilización de conceptos como el de productos comerciales estándar, el paralelismo, la formación de enjambres de robots, algoritmos de visión por computadora simples

y eficientes, y plataformas multipropósito que se adaptan de manera adecuada al tipo de cultivo estudiado.

Para mejorar los sistemas robóticos agrícolas actuales, proponen entonces cuatro áreas principales de investigación futura: sistemas de locomoción, sensores, algoritmos de visión por computadora y agricultura inteligente basada en IoT. Su análisis cubrió alrededor de 62 sistemas robóticos agrícolas, observando un incremento del 22.98% en la tasa de éxito promedio de la cosecha y una reducción del 42.78% en el ciclo promedio de los robots de cosecha entre 2014 y 2021. Estos hallazgos subrayan el potencial de mejora y la importancia de continuar el desarrollo de sistemas robóticos agrícolas para aumentar su eficiencia y robustez (Oliveira et al., 2021).

El Big Data puede desempeñar entonces un papel transformador en la agricultura vertical, mejorando la comprensión y el manejo de los sistemas complejos de producción de alimentos en entornos controlados.

Volumen:	• La agricultura vertical genera grandes cantidades de datos procedentes de sensores ambientales, sistemas de control climático, cámaras y otros dispositivos de monitoreo. • Manejar el volumen de datos es esencial para optimizar las condiciones de crecimiento, realizar seguimiento de la salud de las plantas y gestionar recursos como agua y nutrientes de manera efectiva.
Velocidad:	• En la agricultura vertical, los datos deben procesarse rápidamente para tomar decisiones en tiempo real. Por ejemplo, los cambios en la humedad o temperatura deben ajustarse de inmediato para mantener las condiciones óptimas de crecimiento. • La velocidad en el procesamiento de datos asegura que las operaciones sean ágiles y que las respuestas a las condiciones cambiantes sean inmediatas.
Variedad:	• En un sistema de agricultura vertical, se recopilan diversos tipos de datos, desde imágenes que permiten identificar enfermedades de las plantas hasta niveles de pH y conductividad eléctrica del agua. • Integrar y analizar diferentes tipos de datos ayuda a entender mejor el sistema y realizar ajustes precisos para mejorar la producción.
Veracidad:	• La precisión y confiabilidad de los datos en la agricultura vertical son cruciales para garantizar resultados confiables. • Datos inexactos pueden llevar a decisiones erróneas que afecten negativamente el crecimiento de las plantas o el uso de recursos. • La veracidad implica confianza en los datos recopilados y utilizados para la toma de decisiones.
Valor:	• El valor se refiere a la capacidad de transformar los datos recopilados en información útil y accionable. • En la agricultura vertical, el análisis de datos puede proporcionar conocimientos para mejorar los rendimientos, reducir los costes y minimizar el impacto ambiental, lo que agrega valor económico y sostenible al sistema.

Tabla 2: Cinco dimensiones del Big Data aplicadas a la agricultura vertical. Fuente: Abbasi, Martínez y Ahmad (2022)

Los datos precisos y bien gestionados impulsan la optimización de los procesos y la innovación, resultando en sistemas de agricultura vertical más productivos, eficientes y sostenibles. Las cinco dimensiones del Big Data aplicadas a la agricultura vertical tienen en este sentido y para estos autores, implicaciones profundas y pueden transformar significativamente la eficiencia, sostenibilidad y productividad de estas operaciones agrícolas (Abbasi et al., 2022), tal como se muestra en la Tabla 2.

El artículo de revisión de Maraveas y Bartzanas (2022) proporciona en otro orden, un análisis profundo y actualizado sobre el uso de sensores IoT (Internet de las Cosas) en la optimización de microclimas en invernaderos, resaltando tanto sus beneficios prácticos como sus limitaciones. Su trabajo se enfoca en cómo los avances tecnológicos en sensores avanzados permiten el monitoreo remoto en tiempo real de aspectos críticos como el contenido nutricional del suelo, la humedad, la temperatura y la fisiología vegetal, utilizando tecnologías innovadoras como Bragg, piezoeléctricas, electroquímicas, electromagnéticas y de fibra óptica. Destacan en ese contexto, el desarrollo de sensores hechos con materiales de vanguardia como el grafeno, y la implementación de biosensores de ARNr y chips de microfluidos, lo que evidencia el potencial para mejorar significativamente el rendimiento de los cultivos y la eficiencia en el uso de recursos. Sin embargo, también se señalan desafíos críticos como la variable precisión de los sensores y las dificultades asociadas con la comercialización de estas tecnologías, especialmente en países con infraestructura IoT limitada y baja conectividad a Internet, lo que puede restringir la implementación de sistemas IoT en invernaderos inteligentes a naciones desarrolladas con recursos avanzados (Maraveas and Bartzanas, 2022).

Shamshiri y colaboradores (2018) abordan el creciente interés y la necesidad de redefinir la agricultura en el contexto de la urbanización y el incremento de edificaciones de múltiples pisos, lo cual plantea nuevos desafíos para la seguridad alimentaria. Reconoce la probable disminución de la viabilidad económica de los invernaderos tradicionales frente a estos retos y destaca un cambio en la tendencia de investigación y práctica hacia la agricultura de ambiente controlado inteligente como respuesta a estas demandas. Este enfoque incluye desde el control de instrumentación y la interfaz hardware-software hasta la simulación de interacciones entre los parámetros microclimáticos y el crecimiento de las plantas, así como el desarrollo de modelos matemáticos complejos para minimizar los insumos energéticos y la búsqueda de soluciones innovadoras para reemplazar los invernaderos que consumen energía fósil por sistemas CEA neutrales en energía basados en solar y eólica.

Una de las principales áreas que requiere mejoras, según el estudio, son los algoritmos de planificación de tareas, que aún representan un desafío en términos de proporcionar un diseño y una estrategia de control adaptativos que optimicen la forma y el tiempo de las tareas para aumentar los beneficios y mantener la competitividad en el mercado. Además, aunque los sensores

biológicos, como aquellos que miden el estrés de las plantas, son cruciales para lograr altos niveles de automatización, su costo elevado o la falta de disponibilidad limitan su adopción por parte de los productores locales. El estudio también señala la importancia de los sistemas de soporte a la toma de decisiones basados en el conocimiento y aplicaciones informáticas basadas en modelos que evalúan el costo-beneficio de la tecnología de automatización propuesta. El artículo concluye que, antes del desarrollo comercial a gran escala, es necesario realizar un análisis económico más preciso y justificar los altos costos iniciales asociados con la agricultura vertical y las fábricas de plantas. Los modelos de simulación por computadora y el software de análisis adaptativo, ya disponibles hoy, podrían extenderse y modificarse para este propósito (Shamshiri et al., 2018).

En Bogotá, Torres Urrego y González Carreño (2020), reflejan un esfuerzo innovador para abordar los desafíos que enfrenta la agricultura urbana debido a las variaciones climáticas drásticas, el aumento de la población, y la expansión urbana en zonas suburbanas. La propuesta se centra en el desarrollo y la implementación de un prototipo de granja vertical automatizada, utilizando la metodología Design Thinking y la herramienta del lienzo de modelo de negocio Canvas. Este prototipo está diseñado para captar y monitorear remotamente variables físicas y ambientales cruciales para el crecimiento de los cultivos, como la temperatura, humedad relativa, humedad del suelo, luminosidad, y sistema de riego, a través de un enfoque de agricultura de ambiente controlado. La implementación del proyecto se llevó a cabo en tres fases principales: la construcción física del prototipo con adaptación de estanterías y ubicación estratégica de sensores y actuadores, el control y monitoreo de variables mediante el microcontrolador ESP32 que envía datos a un servidor Ubidots, y finalmente, la visualización gráfica de los datos a través de una API en una página web. Este enfoque permitió realizar pruebas unitarias y de integración que demostraron la funcionalidad y los beneficios del control automatizado de la granja vertical comparado con métodos de agricultura convencionales.

Además, el proyecto colaboró con expertos en ciencias atmosféricas para diseñar una máquina de estados que, junto con la calibración precisa de los sensores y la implementación de un sistema de riego eficaz, permitió un control óptimo de las condiciones edafoclimáticas necesarias para cada tipo de planta. La validación del sistema demostró la eficacia del prototipo en simular diferentes ambientes y ajustar el entorno a las necesidades específicas de los cultivos, aunque se identificaron áreas de mejora, especialmente en el sistema de calefacción. El proyecto también incluyó el

desarrollo de una aplicación web que ofrece información sobre el dispositivo y el modelo de negocio, así como la visualización en tiempo real de los datos ambientales capturados. Esto sugiere un paso hacia la posibilidad de ofrecer servicios personalizados a los clientes, potencialmente reduciendo los costos mediante la selección de proveedores más económicos y vendiendo partes individuales del sistema, como el riego o la iluminación, en lugar del dispositivo completo. La adaptabilidad de los actuadores según el clima local y las altitudes específicas, así como la reducción de costos a través de proveedores alternativos, son, no obstante, consideraciones clave para la expansión y adaptabilidad de este modelo a diferentes contextos y mercados (Torres and González, 2020).

Muy similar a esta en objetivos y resultados es la tesis de García Barragán, DF y Pérez Ramírez (2021), que ofrece un enfoque complementario que incorpora el análisis de imagen para un seguimiento más detallado del estado y desarrollo de los cultivos, además de enfatizar la simplificación de la programación y la reducción de costos para una mayor accesibilidad. Proponen a su vez, recomendaciones como la exploración de piezas más económicas para reducir los costos, la ampliación del prototipo a un sistema a escala real, y la adición de funcionalidades como alertas de optimización del crecimiento, lo que sugiere un enfoque más amplio hacia la accesibilidad y escalabilidad de la tecnología para beneficio de la población rural con acceso a internet.

El documento "Perspectivas de la Agricultura y del Desarrollo Rural en las Américas: una mirada hacia América Latina y el Caribe 2021-2022" brinda un panorama amplio sobre los retos y oportunidades para el sector agrícola y de desarrollo rural en el contexto latinoamericano, destacando aspectos críticos que pueden servir de marco antecedente para el impulso de la agricultura vertical en Colombia y en el continente. El contexto latinoamericano planteado en el documento destaca los desafíos críticos que enfrenta la región en términos de seguridad alimentaria, sostenibilidad y equidad, resumidos en la Tabla 3.

Estos desafíos, agravados por la pandemia de COVID-19, ofrecen desde entonces, una oportunidad única para repensar y transformar el sistema agroalimentario mediante la adopción de prácticas innovadoras como la agricultura vertical. Este enfoque no solo podría contribuir a abordar la

inseguridad alimentaria y los desafíos ambientales, sino también a promover un desarrollo agrícola más inclusivo y sostenible en América Latina y el Caribe (CEPAL-FAO-IICA, 2021).

Impacto de la Pandemia de COVID-19:

- La región de América Latina y el Caribe fue muy afectada por la pandemia, tanto en términos sanitarios como económicos. La crisis exacerbó los problemas existentes de inseguridad alimentaria, pobreza, y desigualdades, poniendo en relieve la vulnerabilidad del sistema agroalimentario y la necesidad de buscar soluciones sostenibles y resilientes como la agricultura vertical.

Desigualdades y Brechas Estructurales:

- Preexistentes brechas estructurales en la región, evidenciadas durante la pandemia de COVID expusieron la urgencia de abordar estas desigualdades a través de la innovación y la adopción de tecnologías agrícolas avanzadas, incluida la agricultura vertical, para mejorar la productividad y la sostenibilidad.

Tendencias de Consumo Durante la Pandemia:

- La pandemia implicó en su momento una modificación de los hábitos de consumo, con un aumento en la preferencia por alimentos saludables, seguros y producidos localmente. Este cambio se ofrece como una oportunidad para la agricultura vertical, la cual puede satisfacer la demanda de productos frescos y de alta calidad en áreas urbanas.

Vulnerabilidad Ambiental y Cambio Climático:

- Las crisiss resaltan la necesidad urgente de abordar la vulnerabilidad ambiental y el cambio climático. La agricultura vertical representa una estrategia de mitigación prometedora, al reducir la huella de carbono de la producción de alimentos y utilizar de manera más eficiente los recursos hídricos y terrestres.

Institucionalidad y Políticas de Apoyo:

- Para facilitar la adopción de la agricultura vertical, es crucial contar con un marco institucional y políticas públicas que promuevan la innovación, la investigación y el desarrollo, así como la inversión en infraestructuras sostenibles. Persiste por ello, una necesidad de renovación institucional y una nueva generación de políticas públicas enfocadas en la sostenibilidad y la equidad.

Digitalización de la Agricultura:

- Recientemente se ha acelerado la digitalización y la adopción de tecnologías en el sector agrícola. La agricultura vertical, que se beneficia significativamente de la tecnología y la automatización, puede desempeñar un papel clave en la transformación digital del sector agrícola en América Latina y el Caribe.

Tabla 3: Desafíos que enfrenta la región en términos de seguridad alimentaria, sostenibilidad y equidad. Fuente: CEPAL-FAO-IICA. (2021)

Otro trabajo realizado por Arredondo Caballero y Motta Jara (2022) en Lima, Perú, explora la viabilidad de un proyecto de cultivos aeropónicos en granjas verticales, identificando tanto las oportunidades como las dificultades de implementación. Esta investigación aporta al campo de la agricultura vertical mediante el análisis detallado de varios aspectos clave para el éxito de estos proyectos, desde la selección de productos basada en las preferencias del mercado hasta la definición de estrategias para la diferenciación de productos por su sabor, nutrición, inocuidad y beneficios ambientales. Una de las contribuciones significativas de este estudio es la evaluación minuciosa de la ubicación para el proyecto, eligiendo el distrito de Lurín en Lima Sur debido a condiciones favorables como las horas de sol, los factores meteorológicos y el precio de los terrenos. Sin embargo, identifican como un factor limitante de producción el tamaño del mercado, y reconocen la necesidad de importar tecnología especializada, dado que Perú carece de los sistemas aeropónicos necesarios para este tipo de agricultura.

A través del análisis de barreras y oportunidades del entorno, el estudio subraya el interés del público en productos que minimizan riesgos de salubridad de la agricultura tradicional, en línea con los objetivos de desarrollo sostenible del país y a la luz del impacto de la pandemia en la economía. Además, resaltan la eficiencia en el uso del agua y la necesidad de un equipo reducido de operarios debido a la naturaleza del tiempo de crecimiento de los cultivos como aspectos destacados del modelo de negocio. Para asegurar la viabilidad financiera y operativa del proyecto, recomiendan en todo caso, una proyección a largo plazo, considerando financiamiento externo para una parte de la inversión y una evaluación cuidadosa de los costos asociados con el terreno y la construcción. También sugieren la implementación de sistemas aeropónicos a menor escala en instituciones educativas para fomentar la investigación multidisciplinaria y el desarrollo de tecnologías adecuadas para optimizar los espacios de cultivo (Arrendondo and Motta, 2022).

El Perfil del Sistema Alimentario de Cali elaborado por Rankin y otros (2021), revela diversos aspectos críticos que podrían servir como antecedentes para definir un marco que impulse la agricultura vertical en Colombia, especialmente en contextos urbanos como Cali (Tabla 4).

Desafíos nutricionales y de salud:

- La población de Cali enfrenta desafíos significativos relacionados con la malnutrición, incluyendo desnutrición, obesidad y deficiencias de vitaminas y minerales.
- Estas condiciones de salud tienen una relación directa con los hábitos alimentarios no saludables y se traducen en costos elevados para el sistema de salud y la productividad de la ciudad.
- La agricultura vertical podría contribuir a mitigar estos problemas ofreciendo opciones más saludables y nutritivas, cultivadas localmente.

Inseguridad alimentaria:

- Más de la mitad de la población de Cali vive con inseguridad alimentaria.
- La agricultura vertical puede ofrecer una solución sostenible y resiliente a este problema, al aumentar la disponibilidad de alimentos frescos y de calidad en la ciudad, reduciendo la dependencia de las importaciones y de otras regiones.

Dependencia de importaciones y producción externa:

- Cali y su área metropolitana dependen significativamente de alimentos producidos en otras regiones e importaciones.
- La implementación de sistemas de agricultura vertical podría disminuir esta dependencia, fomentando la autosuficiencia alimentaria y la sostenibilidad del sistema alimentario local.

Pérdidas y desperdicios de alimentos:

- La ciudad enfrenta problemas significativos relacionados con el exceso de pérdidas y desperdicios de alimentos a lo largo de todas las etapas de la cadena alimentaria.
- La agricultura vertical, al optimizar el uso de recursos y reducir la distancia entre la producción y el consumo, podría disminuir estas pérdidas y contribuir a una mayor eficiencia en el sistema alimentario.

Cambios en los patrones de consumo:

- Los cambios en los patrones de consumo hacia alimentos listos para el consumo y ultraprocesados son evidentes.
- La agricultura vertical podría jugar un rol clave en promover una transición hacia dietas más saludables y sostenibles, mediante la producción local de alimentos frescos y la educación sobre nutrición.

Aspectos socioculturales y económicos:

- Los determinantes socioculturales y económicos en Cali influyen significativamente en el comportamiento del consumidor y en las preferencias alimentarias.
- La agricultura vertical puede ofrecer alternativas de alimentos frescos y accesibles económicamente, especialmente para poblaciones en estratos socioeconómicos bajos, potencialmente alterando positivamente las dinámicas de consumo en la ciudad.

Tabla 4: Perfil del Sistema Alimentario de Cali. Fuente: Rankin, S., Hurtado, L. B., Mosquera, E., & Lundy, M. (2021).

En síntesis, el impulso de la agricultura vertical en Cali, y por extensión en contextos urbanos similares en Colombia, se presenta como una oportunidad para abordar múltiples desafíos del sistema alimentario actual. Podría contribuir a la mejora de la seguridad alimentaria y nutricional, reducir la dependencia de importaciones, disminuir las pérdidas y desperdicios de alimentos, y fomentar patrones de consumo más saludables y sostenibles, alineándose con objetivos de desarrollo sostenible y fortalecimiento de la resiliencia local ante el cambio climático y otros factores adversos (Rankin et al., 2021).

La agricultura vertical se postula en todos estos trabajos recopilados como un enfoque vital para impulsar la resiliencia de los sistemas alimentarios urbanos en Colombia, abordando los desafíos presentados por el cambio climático, la urbanización y las necesidades nutricionales. El estado del arte en esta área está definido por un creciente cuerpo de investigación y práctica que demuestra el potencial de esta para contribuir a sistemas alimentarios urbanos más sostenibles, eficientes y resilientes.

Pero, por otro lado, la propuesta de la agricultura vertical inteligente y automatizada como solución para los desafíos que enfrentan los sistemas alimentarios urbanos en el contexto de América Latina, y en Colombia específicamente, es sin duda ambiciosa y es crucial también reconocer y abordar las barreras significativas que limitan su implementación, especialmente en países en vías de desarrollo. La literatura actual, incluidas las investigaciones llevadas a cabo en Perú y Colombia, presenta un panorama que, si bien es prometedor, está lleno de obstáculos sustanciales y complejos.

Los retos son, en efecto, inmensos. A pesar del potencial transformador de la Agricultura Vertical, se han identificado barreras técnicas, económicas, socioculturales y políticas que dificultan su adopción. En América Latina, estos obstáculos no son menores: desde la falta de infraestructura tecnológica y la inversión inicial elevada hasta la capacitación y la educación necesaria para operar y mantener sistemas agrícolas altamente tecnificados. Además, hay desafíos en la integración de estos sistemas en las cadenas de valor existentes, y en asegurar que los beneficios de esta sean accesibles a toda la población, no solo a los segmentos de mayor poder adquisitivo.

Uno de los desafíos más significativos radica en el origen interdisciplinario de las investigaciones sobre Agricultura Vertical. Si bien han surgido valiosos aportes desde la tecnología, la sociología y las ciencias políticas y económicas, se observa una notoria carencia de estudios provenientes directamente del campo agrícola. Esta desconexión sugiere una falta de diálogo entre la teoría y la práctica agronómica y los avances tecnológicos y sociales que esta representa.

La tesis que se propone tiene entonces el objetivo de colmar este vacío, centrando la atención en cómo los principios y prácticas agronómicas pueden integrarse y evolucionar dentro del paradigma de la Agricultura Vertical Inteligente y Automatizada. Es esencial, por lo tanto, que la investigación no solo contemple la agricultura vertical desde una perspectiva de ingeniería y automatización, sino que también considere las ciencias agrícolas, que son fundamentales para entender las necesidades biológicas y ambientales de los cultivos que serán gestionados en estos sistemas. Para llegar al siguiente nivel en América Latina, es necesario construir sobre las bases de la agronomía tradicional y adaptarlas a las posibilidades que la tecnología ofrece. Esta investigación debe ser por lo tanto pragmática y abordar las realidades socioeconómicas y culturales que caracterizan a la región. Este acercamiento permitirá desarrollar modelos de agricultura vertical que no solo sean tecnológicamente avanzados sino también viables, equitativos y adaptados a las condiciones locales.

2. Bases teóricas y revisión del conocimiento actual

2.1.Sostenibilidad y seguridad alimentaria en la Era de la arquitectura vertical inteligente

Para el año 2050, la demanda de alimentos aumentará un 60% respecto a los niveles de 2012, mientras que se estima que la producción agrícola solo crecerá un 2% hacia 2040. Para 2056, se espera que la población mundial alcance los 10.000 millones. A pesar de que solo el 2% del área terrestre del planeta está compuesta por megaciudades, estas consumen una cantidad desproporcionada de recursos, incluyendo el 75% de la madera y el 60% del agua, además de contribuir con el 80% de las emisiones de CO2 generadas por humanos. Las prácticas de quema de enormes áreas de ecosistemas y biomas naturales para ganar espacios de cultivo resultan perjudiciales para la tierra y el aire, y pueden provocar enfermedades en las personas. Ante el rápido crecimiento poblacional y la concentración de la población en grandes urbes, se hace necesaria la búsqueda de nuevas estrategias para la producción de alimentos en grandes escalas y de manera sostenible dentro de las ciudades (Alvarado and Moreno, 2019).

En este sentido, Nava Perdomo (2023) subraya la importancia de la Cuarta Revolución Industrial y su impacto en la transformación de las prácticas agrícolas. El aprovechamiento de tecnologías avanzadas como la Inteligencia Artificial, la robótica, y la geoestadística promete no solo duplicar la producción agrícola sino también hacerla más sostenible y rentable. Estos avances tecnológicos, integrados en el sector agropecuario, ofrecen un medio para alcanzar una producción más equitativa y consciente del entorno, especialmente en la gestión del recurso vital que es el agua (Nava Perdomo, 2023).

El concepto de Revolución Industrial está asociado con cambios en las tecnologías de producción a lo largo de la historia, donde el progreso tecnológico ha tenido un impacto significativo en las condiciones materiales y sociales de producción. Actualmente, se plantea el potencial beneficio del uso de estas tecnologías, destacando la necesidad de un mayor cuidado del entorno y de los recursos naturales (Nava Perdomo, 2023). La relación entre las revoluciones industriales y la agricultura ha generado a lo largo de la historia importantes contribuciones y desarrollos que han mejorado las condiciones de producción. Estos fenómenos económico-sociales transforman

profundamente a la humanidad, modificando las formas de producir bienes, las relaciones sociales y las visiones del mundo y de las personas.

Desde finales del siglo XVIII hasta la actualidad, la humanidad ha experimentado cuatro revoluciones industriales que han marcado hitos significativos en el desarrollo tecnológico y socioeconómico, como se ilustra en la Figura 1. Cada una de estas revoluciones ha introducido tecnologías disruptivas que han redefinido los paradigmas de producción, siendo la actual Industria 4.0 particularmente relevante para el desarrollo de sistemas de agricultura vertical inteligente.

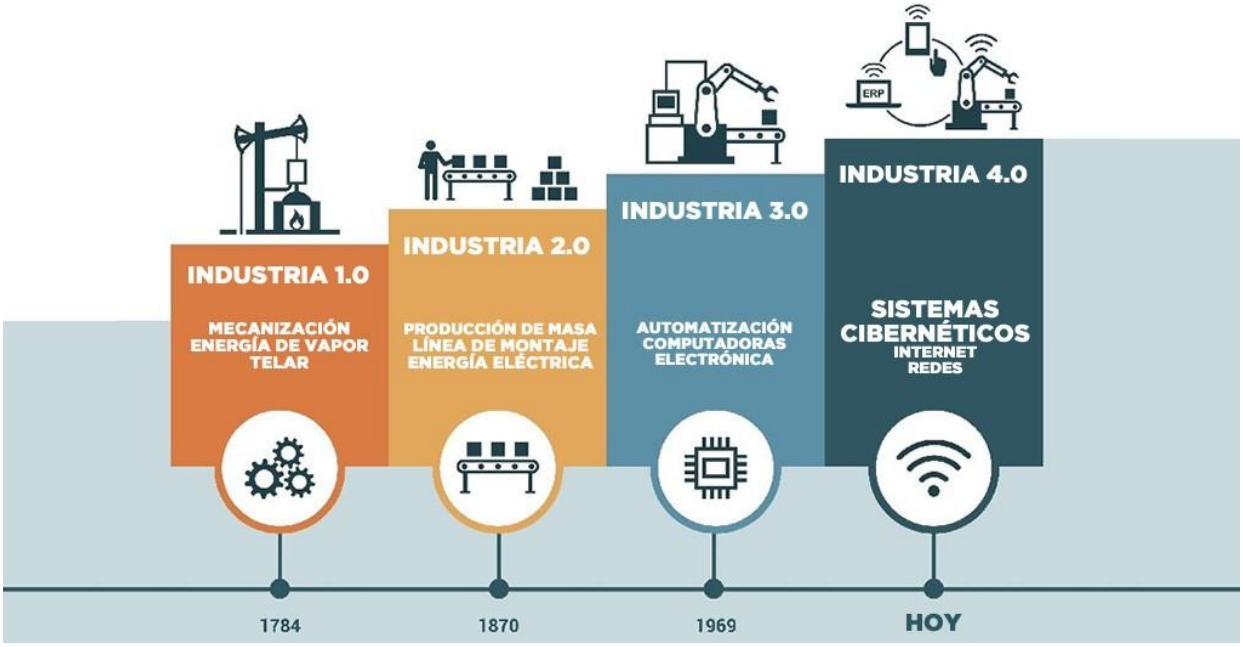


Figura 1: Las cuatro revoluciones. Tomada de: https://micomunidadvirtual.uexternado.edu.co/la-industria-4-0-y-la-educacion/

La agricultura ya había experimentado avances tecnológicos significativos, especialmente durante la primera revolución industrial, donde prácticas modernas como el riego, el uso de fertilizantes y pesticidas, y el desarrollo de nuevas variedades de cultivos permitieron aumentar los rendimientos de cereales de manera impresionante. En esa misma perspectiva, es crucial poder considerar hoy a las tecnologías derivadas de la cuarta revolución industrial como aliadas importantes en el sector agrícola y alimentario.

La cuarta revolución industrial, también conocida como industria 4.0, se define en todo caso, como la integración de tecnologías como el análisis de Big Data, servicios en la nube, impresión 3D,

ciberseguridad, robots autónomos, Internet de las cosas, realidad aumentada, simulación, integración horizontal y vertical, lo que conlleva cambios significativos en los modelos de negocio y procesos de fabricación. La Cuarta Revolución Industrial implica no obstante una fusión integral entre ciencia y tecnología de revoluciones anteriores, lo que dificulta su desvinculación en la producción industrializada y la sociedad contemporánea.

Aun así, el proceso de implementación de nuevas tecnologías está en marcha desde hace algún tiempo y se espera que se expandan de manera inevitable debido a los beneficios demostrados en términos de eficiencia, impacto ambiental y optimización de recursos, entre otros aspectos. La promesa de la Inteligencia Artificial (IA) en el sector agropecuario es duplicar la producción de manera sostenible y gestionar el negocio de manera más rentable. Se identifican así, áreas clave como la biotecnología, la robótica y tecnologías como la IA, el Big Data, la simulación y la geoestadística (Nava, 2023).

Según Alvarado y Moreno (2019), las granjas verticales emergen en ese contexto como soluciones prometedoras frente a la creciente demanda alimentaria global y la limitación de recursos hídricos y espaciales. Estas estructuras, que permiten un ahorro significativo en el consumo de agua hasta de un 97% en comparación con la agricultura tradicional, son esenciales en países como Colombia, donde la producción de alimentos representa una parte considerable de la extracción hídrica. La arquitectura vertical, conceptualizada inicialmente por el profesor Dickson Despoimmer, es una respuesta al desafío de garantizar la seguridad alimentaria dentro de los contextos urbanos densamente poblados (Alvarado and Moreno, 2019).

Conviviendo con los avances e innovaciones de estos tiempos, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) identifica concomitantemente la existencia de dificultades persistentes como el estrés hídrico y la degradación de la tierra como problemas clave en la actualidad. La Agricultura Inteligente, que aprovecha datos masivos y tecnologías IoT, surge a su vez como una estrategia vital para enfrentar estos desafíos, impulsando prácticas agrícolas que optimizan la productividad mientras protegen y conservan los recursos naturales (FAO, 2021).

El riego a nivel mundial actualmente representa aproximadamente el 70% del uso total de agua por parte del hombre en sus actividades personales y productivas. Se prevé que esta cantidad aumente en un 14% en los próximos treinta años, dado el incremento del 20% en la extensión de las áreas de riego. Para el año 2030, se estima que el 60% de las tierras potencialmente aptas para el riego estarán siendo utilizadas. De los 93 países en desarrollo analizados por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), diez ya están empleando el 40% de su agua dulce renovable para riego, umbral a partir del cual puede resultar difícil decidir entre la agricultura y otros usos del agua (Nava, 2023). La demanda mundial de alimentos espera en ese panorama, verse impulsada por varios factores:

- El crecimiento demográfico, con la proyección de más de 2,000 millones de nuevos habitantes, lo que elevaría la población mundial de 7,300 millones a 9,700 millones.
- El desarrollo económico, que generará una demanda por una dieta alimentaria más rica en calorías, con más de 2,000 millones de personas buscando una ingesta calórica diaria de entre 2,760 y 3,250 Kcal por persona.
- La necesidad de atender a sectores de la población que actualmente no tienen acceso suficiente a alimentos, con 815 millones de personas viviendo en condiciones de desnutrición, incluyendo 200 millones de niños.
- Los efectos del mercado, como las importaciones y exportaciones, que impactarán en la demanda y oferta de alimentos. Para satisfacer la demanda proyectada para el año 2050, la producción alimentaria deberá aumentar en un 60%.

Desde la perspectiva de Mogollón y Quimbaya (2019), la agricultura vertical contribuye en todo caso, de manera significativa a la seguridad alimentaria. Este enfoque no solo mejora la disponibilidad de alimentos frescos para consumidores urbanos, sino que también proporciona oportunidades laborales y ayuda a combatir la pobreza. Es fundamental reconocer la importancia de una distribución equitativa de ingresos y acceso a recursos para la seguridad alimentaria, la cual es afectada por una multitud de factores a nivel doméstico, local, nacional e internacional (Mogollón and Quimbay, 2019).

A lo largo de la historia, y en sintonía con las revoluciones industriales antes enunciadas, las sociedades humanas han experimentado a su vez, importantes transformaciones tecnológicas y

socioeconómicas, divididas en períodos o "revoluciones" agrícolas. La primera de estas revoluciones, conocida como la Revolución Neolítica, se remonta aproximadamente al año 10.000 a.C., marcando el inicio de comunidades humanas que practicaban la agricultura y la domesticación de animales. La segunda revolución comenzó con la introducción del motor de vapor en el siglo XVIII, lo que llevó a un aumento significativo en la productividad agrícola mediante la mecanización de tareas como el arado, la siembra y la cosecha. Posteriormente, con la segunda revolución industrial, se mejoró aún más la eficiencia con la creación del motor de combustión interna y la popularización del tractor, así como el uso extendido de fertilizantes y pesticidas químicos. La tercera revolución, conocida como la Revolución Verde, se produjo alrededor de 1950, introduciendo nuevas variedades de plantas genéticamente modificadas y tecnologías como el posicionamiento global y la aplicación variable de pesticidas, fertilizantes e irrigación, en contraste con los métodos anteriores de aplicación uniforme en toda el área cultivada. Finalmente, en el último período, se ha dado paso a lo que se conoce como Agricultura Inteligente, que utiliza tecnologías de la información, vehículos no tripulados, dispositivos IoT (Internet de las cosas) y almacenamiento y análisis de datos a gran escala para optimizar la producción agrícola y hacerla más eficiente y sostenible (Gallego, 2022).

La agricultura en el siglo XXI está fuertemente influenciada por nuevas herramientas científicas y tecnologías novedosas que han resultado en un conjunto de poderosas tecnologías con resultados aplicables en situaciones rurales y urbanas. La siguiente lista incluye según FAO, Rikolto y RUAF, (2022), algunas tecnologías innovadoras comunes:

- Agronomía y biotecnología agrícola para mejorar los insumos para la agricultura de cultivos y animales, como semillas, control de plagas, microbioma y salud animal.
- Mecanización, robótica y equipamiento como maquinaria pesada, automatización, drones guiados por sistemas de posicionamiento global o sistemas de información global, sensores ambientales y equipamiento para el cultivo.
- Software de gestión de granjas, "Internet de las Cosas" con sistemas de detección e intervención, que incluyen sensores inalámbricos, hardware de captura de decisiones, soporte de software, análisis de datos y aplicaciones portátiles miniaturizadas.

- Sistemas de cultivo innovadores como granjas interiores, fábricas de plantas con control ambiental, sistemas de acuicultura y facilidades de crecimiento para insectos, algas y microbios.

Según FAO, Rikolto y RUAF, (2022), cuando se trata de agricultura urbana y periurbana, una variedad de innovaciones puede resultar en una mejor producción, tales como:

- Innovación tecnológica incluyendo agricultura controlada ambientalmente; acuaponia, hidroponía, aeroponía, etc. Incluye un amplio espectro de tecnologías digitales utilizadas en la producción.
- Innovación de recursos (tierra, agua, etc.) incluyendo agricultura sin superficie de cultivo, reciclaje de aguas residuales.
- Innovación agronómica y en la agricultura que contiene un amplio rango de enfoques y métodos que están adaptados al contexto urbano y periurbano, incluyendo la agricultura orgánica y regenerativa y la agroecología.
- Innovación social incluyendo agricultura apoyada por la comunidad, horticultura social, jardines escolares, mercados de agricultores.

En el escenario actual que se configura dentro de esta etapa de vibrante despegue tecnológico la agricultura se enfrenta a otro desafío crítico: debe incrementar su productividad utilizando los recursos edáficos y acuáticos existentes. Pero de acuerdo con el último informe de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura sobre el estado de los recursos agrícolas globales, existe una reducción en el espacio disponible para expandir nuevas áreas cultivables, simultáneamente con un incremento en la presión sobre los sistemas hídricos (FAO, 2021). Este documento indica que el 98% de las calorías que se consumen a nivel mundial provienen de prácticas agrícolas basadas en un modelo de intensificación insostenible, lo que ha resultado en una degradación y explotación extrema de los sistemas de tierras y aguas (Figura 2).

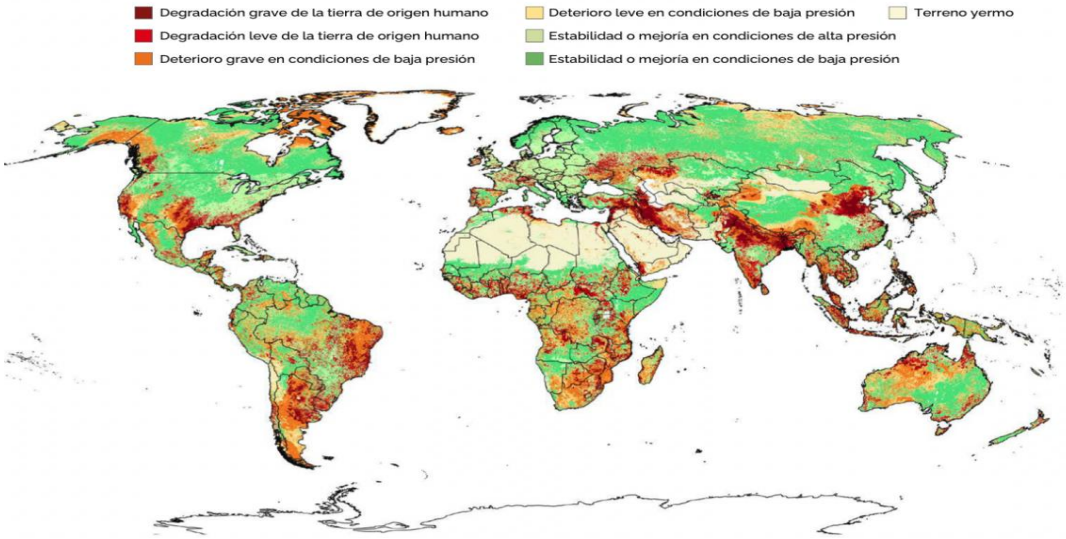


Figura 2: Degradación de la tierra (erosión del suelo, agotamiento de los nutrientes, aumento de la salinidad) según la gravedad de las presiones ejercidas por el ser humano, y las tendencias de deterioro. Fuente: (FAO, 2021)

Asimismo, se señala que el cambio climático incrementará los niveles de evapotranspiración y alterará la cantidad y distribución de las lluvias, intensificando los desafíos y presiones sobre la agricultura (Figura 2). En este entorno, la Agricultura Inteligente emerge como una estrategia prometedora para enfrentar y ofrecer soluciones a estos problemas actuales (FAO, 2021).

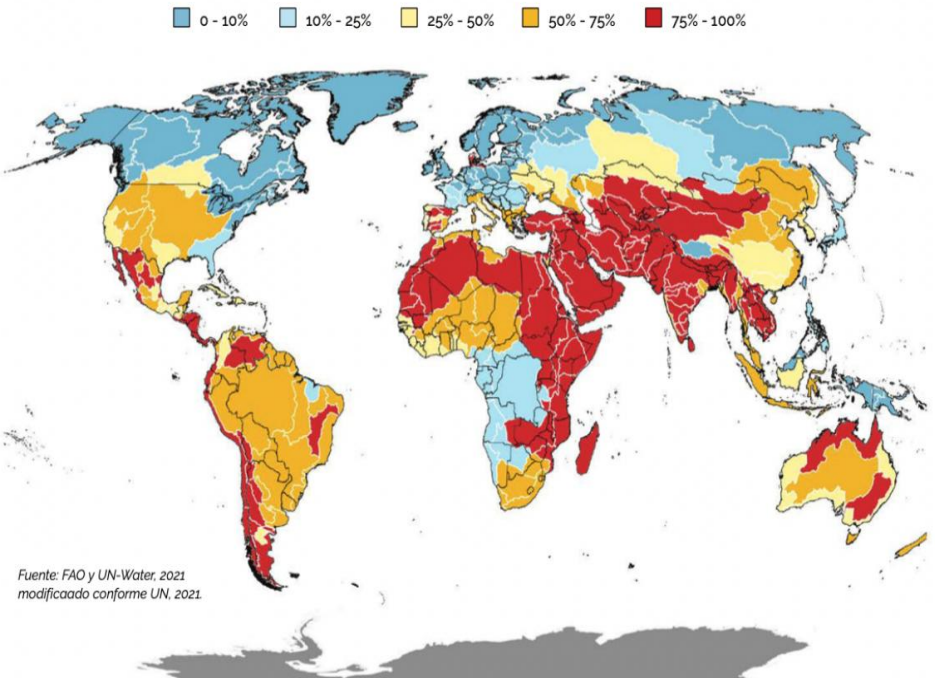


Figura 3: Nivel de estrés hídrico debido al sector agrícola, por cuenca. El indicador se define como la razón entre el total de agua dulce extraída y el total de recursos de agua dulce renovables, después de haber considerado las necesidades de caudal ambiental. Fuente: (FAO, 2021)

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) son en un contexto así, fundamentales debido a la urgente necesidad de frenar la tendencia destructiva hacia el aire, el agua, los bosques, la tierra y los recursos naturales. En la Cumbre de Naciones Unidas realizada en Nueva York en 2015, se estableció la Agenda 2030 que incluye 17 objetivos interconectados, con el propósito de erradicar la pobreza y promover un crecimiento económico equitativo y sostenible (Nava Perdomo, 2023). La implementación de tecnologías derivadas de la cuarta revolución industrial en el sector agrícola puede contribuir significativamente al logro de algunos de estos objetivos de desarrollo sostenible para América Latina, ver Tabla 5.

ODS 2: Poner fin al hambre, lograr la seguridad alimentaria y promover la agricultura sostenible.	• Incrementar la productividad agrícola y los ingresos de los productores, especialmente de grupos vulnerables. • Asegurar la sostenibilidad de los sistemas de producción de alimentos y promover prácticas agrícolas resilientes.
ODS 6: Garantizar la disponibilidad y gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos.	• Mejorar la eficiencia en el uso de los recursos hídricos y garantizar el acceso a agua potable. • Ampliar la cooperación internacional en proyectos relacionados con el agua y el saneamiento.
ODS 8: Promover el crecimiento económico sostenido, inclusivo y sostenible, y el empleo pleno y productivo para todos.	• Diversificar y modernizar la economía, centrándose en sectores de alto valor añadido. • Mejorar la producción y el consumo eficientes de recursos para desvincular el crecimiento económico de la degradación ambiental
ODS 9: Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización inclusiva y sostenible, y fomentar la innovación.	• Desarrollar infraestructuras fiables y sostenibles para apoyar el desarrollo económico y el bienestar humano. • Modernizar la infraestructura e industrias para promover prácticas sostenibles y adoptar tecnologías limpias.
ODS 12: Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles.	• Promover la gestión sostenible y el uso eficiente de los recursos naturales. • Reducir el desperdicio de alimentos y las pérdidas en la cadena de producción y suministro.
ODS 17: Fortalecer los medios de implementación y revitalizar la alianza mundial para el desarrollo sostenible.	• Mejorar la cooperación regional e internacional en ciencia, tecnología e innovación. • Facilitar la transferencia de tecnologías sostenibles a países en desarrollo en condiciones favorables.

Tabla 5: ODS consecuentes con la implementación de tecnologías derivadas de la cuarta revolución industrial en el sector agrícola. Fuente: Nava Perdomo (2023)

El cumplimiento de estos objetivos requiere una acción coordinada y una alianza global para abordar los desafíos ambientales y sociales, promoviendo un desarrollo sostenible para las generaciones presentes y futuras.

En las ciudades, donde los recursos como el suelo y el agua están restringidos y compartidos entre distintos intereses, es esencial adoptar sistemas de producción y procedimientos que no solo sean eficientes, sino que también hagan uso eficaz de recursos limitados. La agricultura urbana y periurbana se distingue por tener que navegar la inestabilidad en la posesión de la tierra y la falta de espacio. Estas dificultades a menudo generan tensiones que demandan la regulación gubernamental para garantizar un equilibrio entre la propiedad y el desarrollo de actividades económicas sustentables. Las autoridades regionales y locales no siempre reconocen la importancia de estos temas, lo que puede explicar por qué la integración de la agricultura en la planificación de las ciudades no es siempre exitosa (FAO et al., 2022).

Para maximizar los recursos en la agricultura de las zonas urbanas y aledañas, se han adoptado enfoques novedosos que complementan la agricultura urbana y periurbana. Estos enfoques se centran en la eficiencia del uso de insumos esenciales como el suelo, el agua, la energía y los insumos de producción. Además, estos enfoques están alineados con los principios de la economía circular, buscando reducir el desperdicio y la contaminación, manteniendo los materiales en uso y favoreciendo la regeneración de los ecosistemas. Técnicas de producción que apoyan la sustentabilidad y los sistemas alimentarios locales y descentralizados son ejemplos claros de prácticas que se alinean bien con el objetivo de incorporar la agricultura urbana y periurbana en el esquema de planificación urbana (FAO et al., 2022).

El término resiliencia hace referencia a la capacidad colectiva e individual para lidiar con desafíos y cambios de manera proactiva y efectiva, asegurando la continuidad de operaciones y el bienestar, sin sacrificar el futuro desarrollo sostenible ni los estándares de vida y seguridad actuales. En relación con los sistemas alimentarios, este concepto implica la habilidad persistente para gestionar y superar perturbaciones, garantizando la provisión constante de alimentos que sean suficientes y accesibles. Esta capacidad es un pilar fundamental para la viabilidad a largo plazo de estos sistemas (FAO et al., 2022).

Un enfoque agroalimentario integrado que abarca las zonas rurales, periurbanas y urbanas puede catalizar por lo tanto un avance hacia mayor sostenibilidad y resiliencia. Este sistema amplía el acceso a una alimentación nutritiva y segura y fortalece la identidad cultural local. Al mismo tiempo, promueve la creación de empleo y fuentes de ingresos, beneficiando a todos los eslabones

de la cadena de suministro y reduciendo la dependencia de importaciones alimentarias. Asimismo, este sistema favorece la conexión entre lo rural y lo urbano, permitiendo que desechos urbanos sean reciclados mediante compostaje y que las aguas residuales se transformen en recursos útiles. También apoya la inclusión social de colectivos vulnerables dentro de la cadena de valor y disminuye el impacto ambiental al reducir los tiempos y distancias necesarios para la distribución de alimentos. Además, contribuye a una mejor gobernanza a lo largo de toda la cadena de producción y suministro alimentario (Carranza et al., 2021).

En Colombia, la agricultura urbana se manifiesta por ahora de dos maneras predominantes: como una actividad en barrios marginales, surgida para mantener el vínculo cultural de campesinos que migraron a ciudades y para producir y comercializar excedentes alimentarios, y como una iniciativa promovida por administraciones de ciudades, tal es el caso de Medellín y Bogotá. Se fortalece así, el propósito de fomentar la inclusión y el sentido comunitario a través de la producción y el intercambio de alimentos, tanto como establecer canales de comercialización entre los que pueden estar los mercados locales y cada vez más, plataformas digitales gestionadas por organizaciones sociales o gobiernos locales. También se promueven cada vez más y mejor, rutas agroecológicas que incentivan la comercialización y motivan a los agricultores a mantener sus prácticas agrícolas (Carranza et al., 2021).

La agricultura vertical inteligente se perfila, por lo tanto, como un elemento crucial para la sostenibilidad y la seguridad alimentaria. Este enfoque no solo busca satisfacer la creciente demanda alimentaria, sino que también se alinea con los objetivos de desarrollo sostenible, promoviendo prácticas agrícolas que respetan y valoran los recursos naturales y el bienestar social.

2.2. Benchmarking y análisis comparativo en modelos agronómicos con enfoque en la automatización

El benchmarking y el análisis comparativo en modelos agronómicos con enfoque en la automatización representan áreas de investigación y práctica esenciales para la optimización y sostenibilidad de la agricultura moderna. La integración de tecnologías avanzadas como la inteligencia artificial (IA), el aprendizaje automático (ML) y la automatización de procesos

agrícolas vienen permitiendo una gestión más eficiente y precisa de los recursos, así como una mejora significativa en el rendimiento de los cultivos.

La revolución digital ofrece una oportunidad significativa para aumentar la productividad y la sofisticación del sector agrícola. Las tecnologías digitales pueden ayudar a los agricultores a producir de manera más eficiente y a desarrollar soluciones sostenibles frente al cambio climático. Por ejemplo, la integración de sensores en las máquinas agrícolas convencionales, como tractores, pulverizadoras y cosechadoras, permite convertirlas en redes de dispositivos inteligentes equipados con monitores de rendimiento, pilotos automáticos y sensores para la distribución de semillas y pulverización. El uso de analítica avanzada permitiría procesar la información generada por los sensores y satélites para optimizar los procesos de producción y el uso de aplicaciones activadas por el Sistema de Posicionamiento Global (GPS). La incorporación de vehículos autónomos o semiautónomos reduciría los costos operativos y el consumo de energía, además de aumentar la seguridad y precisión. Las tecnologías digitales tienen un gran potencial a lo largo de toda la cadena de producción, desde la compra de insumos hasta la comercialización de los bienes (CEPAL et al., 2021).

El benchmarking es una herramienta estratégica utilizada para medir y comparar el desempeño de diferentes prácticas, procesos o tecnologías en un campo específico, con el fin de identificar mejores prácticas y fomentar la mejora continua (Espinoza and Gallegos, 2019). En el contexto agrícola, el benchmarking permite a los agricultores y gestores agrícolas evaluar el rendimiento de sus operaciones en comparación con estándares establecidos o con los resultados obtenidos por otros productores (Rodríguez et al., 2005). Según Camp (1989), el benchmarking se define como "la búsqueda continua de las mejores prácticas que conducen a un desempeño superior". En el ámbito agrícola, esto puede incluir la comparación de rendimientos de cultivos, la eficiencia en el uso de recursos como el agua y los fertilizantes, y la adopción de tecnologías innovadoras.

El análisis comparativo en modelos agronómicos implica por su parte, la evaluación de diferentes modelos de simulación y predicción utilizados para optimizar la gestión agrícola. Estos modelos permiten a los agricultores prever el rendimiento de los cultivos, optimizar el uso de insumos y gestionar mejor los riesgos asociados con factores climáticos y ambientales. Los modelos agronómicos se basan en datos históricos y actuales para simular el comportamiento de los

sistemas agrícolas bajo diversas condiciones (Hernández et al., 2009). Los principales tipos de modelos incluyen modelos determinísticos, que utilizan ecuaciones matemáticas para representar relaciones causa-efecto específicas en sistemas agrícolas; modelos estocásticos, que incorporan la variabilidad y la incertidumbre inherente en los sistemas agrícolas utilizando métodos probabilísticos para prever diferentes escenarios posibles; y modelos basados en agentes, que simulan las interacciones entre diferentes agentes (plantas, animales, seres humanos) en un sistema agrícola, permitiendo una comprensión más detallada de las dinámicas complejas en estos sistemas (Candelaria et al., 2011).

La automatización en la agricultura implica el uso de tecnologías avanzadas para realizar tareas agrícolas con mínima intervención humana. La integración de sistemas automatizados en la agricultura ha demostrado ser fundamental para aumentar la eficiencia, reducir costos y minimizar el impacto ambiental. La automatización incluye el uso de drones para la vigilancia de cultivos, sensores para monitorear la salud de las plantas y el suelo, y maquinaria autónoma para la siembra, el riego y la cosecha. La inteligencia artificial y el aprendizaje automático juegan un papel crucial en la automatización agrícola, permitiendo el análisis y la interpretación de grandes volúmenes de datos agrícolas para tomar decisiones informadas (FAO, 2022).

La automatización puede abarcar cualquiera de las tres fases: diagnóstico, ejecución o toma de decisiones, o una combinación de estas fases interconectadas. Por ejemplo, los sensores pueden realizar el diagnóstico, mientras que la toma de decisiones y la ejecución recaen completamente en los seres humanos. Alternativamente, tanto el diagnóstico como la toma de decisiones pueden ser llevados a cabo mediante tecnologías digitales, mientras que la ejecución la realizan los humanos. Un ejemplo de un sistema completamente automatizado, donde las tres fases están automatizadas, es el robot pulverizador autónomo: el sistema primero recolecta datos sobre la fertilidad del suelo, luego determina la zona de operación y la dosis de aplicación, y finalmente aplica el fertilizante de acuerdo con esa dosis variable (FAO, 2022).

2.2.1. Innovación tecnológica y agronomía para la agricultura vertical

La agricultura vertical se ha convertido en una solución innovadora para enfrentar los desafíos de la producción agrícola en un mundo con limitaciones espaciales y una población en crecimiento.

Este enfoque se basa en el cultivo de plantas en capas apiladas verticalmente, utilizando estructuras como edificios o contenedores modulares. La combinación de tecnologías avanzadas, como la inteligencia artificial (IA), el aprendizaje automático (ML) y la automatización, juega un papel crucial en la optimización de este sistema agrícola, ofreciendo oportunidades significativas para mejorar la eficiencia, la sostenibilidad y la rentabilidad de la producción agrícola (Burrows, 2023).

La agricultura vertical es un método de cultivo que maximiza el uso del espacio vertical, permitiendo la producción de alimentos en áreas urbanas y otras zonas con limitaciones de tierra. Este sistema no solo aprovecha mejor el espacio, sino que también reduce la necesidad de suelo agrícola tradicional, minimizando el impacto ambiental. La agricultura vertical utiliza sistemas hidropónicos, aeropónicos y acuapónicos, que permiten un control preciso del entorno de crecimiento, optimizando factores como la luz, el agua y los nutrientes (Burrows, 2023).

La integración de tecnologías avanzadas es fundamental para el éxito de la agricultura vertical. La digitalización, la automatización y la IA son componentes clave de este enfoque. La digitalización permite el monitoreo y la gestión precisa de los cultivos mediante sensores y sistemas de control ambiental, que recopilan datos en tiempo real sobre las condiciones de crecimiento. Estos datos se analizan mediante algoritmos de ML, proporcionando información valiosa para la toma de decisiones y la optimización de los recursos (Santos Valle and Kienzle, 2021).

La automatización en la agricultura vertical implica el uso de robots y sistemas automatizados para realizar tareas agrícolas con mínima intervención humana. Los robots pueden encargarse de la siembra, el riego, la fertilización y la cosecha, mejorando la eficiencia y reduciendo los costos operativos. Según Santos Valle y Kienzle (2021), la robótica agrícola y los equipos automatizados son esenciales para la producción agrícola sostenible, permitiendo un control preciso de malezas y plagas, así como una gestión eficiente de los nutrientes y el agua.

La IA y el ML juegan un papel crucial en la agricultura vertical, proporcionando herramientas para el análisis avanzado de datos y la predicción de resultados. Estas tecnologías pueden identificar patrones en los datos de los sensores, permitiendo ajustes en tiempo real para optimizar el crecimiento de las plantas. Además, los sistemas basados en IA pueden predecir problemas

potenciales, como plagas o enfermedades, antes de que se conviertan en amenazas significativas, permitiendo una intervención temprana y efectiva (Santos Valle and Kienzle, 2021).

La implementación de tecnologías avanzadas en la agricultura vertical ofrece numerosos beneficios. Estos incluyen una mayor eficiencia en el uso de recursos, una producción más constante y predecible, y la capacidad de cultivar alimentos en áreas urbanas, reduciendo la dependencia de las importaciones y disminuyendo la huella de carbono asociada al transporte de alimentos. Sin embargo, también existen desafíos significativos, como el alto costo inicial de instalación y la necesidad de conocimientos técnicos avanzados para operar y mantener estos sistemas (Burrows, 2023).

Un ejemplo destacado de innovación en la agricultura vertical es el uso de sensores avanzados y tecnología de IA para el control ambiental. Estos sistemas permiten ajustar automáticamente la iluminación, la temperatura y los niveles de humedad en función de las necesidades específicas de cada cultivo. Otro ejemplo es la integración de robots para la siembra y la cosecha, como los descritos por Santos Valle y Kienzle (2021), que pueden operar de manera autónoma, aumentando la eficiencia y reduciendo la necesidad de mano de obra.

La agricultura vertical representa en todo caso, una solución prometedora para abordar los desafíos de la producción agrícola en un mundo con limitaciones espaciales y una creciente demanda de alimentos. La integración de tecnologías avanzadas, como la IA, el ML y la automatización, es fundamental para maximizar la eficiencia y la sostenibilidad de estos sistemas (Burrows, 2023).

En entornos urbanos, donde el espacio es limitado y costoso, la agricultura vertical permite el cultivo de alimentos en espacios reducidos, como edificios abandonados, contenedores de envío, o incluso rascacielos diseñados específicamente para este propósito. Al apilar las plantas en niveles, se puede producir una mayor cantidad de alimentos en un área mucho más pequeña en comparación con la agricultura tradicional. Esto no solo aumenta la producción total, sino que también facilita el cultivo de alimentos más cerca de los centros de consumo, reduciendo la necesidad de transporte y su impacto ambiental (MinTIC, 2022).

La integración de IA y ML en la agricultura vertical permite una gestión precisa y eficiente de los cultivos. Estos sistemas pueden analizar grandes cantidades de datos provenientes de sensores y cámaras para monitorear las condiciones de crecimiento en tiempo real, optimizando variables como la luz, la temperatura, la humedad y los nutrientes. Por ejemplo, la IA puede ajustar automáticamente la iluminación LED para imitar las condiciones óptimas de luz solar, mejorando el crecimiento de las plantas y reduciendo el consumo de energía (Gomstyn and Jonker, 2023).

La automatización es otro componente crucial en la agricultura vertical. Los sistemas automatizados pueden encargarse de tareas como la siembra, el riego, la aplicación de nutrientes y la cosecha, lo que reduce la necesidad de mano de obra y minimiza los errores humanos. Además, la automatización permite el funcionamiento continuo de las granjas verticales, asegurando una producción constante de alimentos durante todo el año, independientemente de las condiciones climáticas externas (FAO, 2022).

El uso de sensores y tecnologías de Internet de las Cosas (IoT) permite la recopilación de datos en tiempo real sobre las condiciones del suelo, el clima y el crecimiento de las plantas. Estos datos son esenciales para realizar ajustes inmediatos y precisos en el entorno de cultivo, lo que maximiza el rendimiento y la calidad de los productos agrícolas. Por ejemplo, los sensores de humedad del suelo pueden activar sistemas de riego automatizados solo cuando es necesario, conservando agua y evitando el desperdicio (Verma, 2019).

La agricultura vertical no solo optimiza en todo caso, el uso del espacio y los recursos, sino que también promueve la sostenibilidad. Al utilizar técnicas como la hidroponía y la aeroponía, se elimina la necesidad de suelo y se reduce el uso de agua en comparación con la agricultura tradicional. Además, al cultivar alimentos en entornos controlados, se minimiza el uso de pesticidas y herbicidas, lo que resulta en productos más saludables y un menor impacto ambiental. La proximidad de las granjas verticales a los consumidores también reduce las emisiones de carbono asociadas con el transporte de alimentos (Gomstyn and Jonker, 2023).

2.2.2. Legislación y políticas públicas internacionales y nacionales que fomentan la agricultura vertical inteligente

Para que la agricultura vertical prospere y se integre efectivamente en los sistemas agrícolas existentes, es crucial contar con un marco regulatorio y políticas públicas que la apoyen. A nivel internacional, varias organizaciones y acuerdos promueven la sostenibilidad agrícola y la innovación tecnológica en la agricultura, lo que incluye la agricultura vertical inteligente. Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas, particularmente el ODS 2 (Hambre Cero) y el ODS 12 (Producción y Consumo Responsables), destacan la necesidad de innovaciones agrícolas sostenibles. Estos objetivos promueven la adopción de tecnologías avanzadas para aumentar la productividad y eficiencia de los sistemas agrícolas[1].

Organizaciones como la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) apoyan la investigación y el desarrollo en tecnologías agrícolas sostenibles, incluyendo la agricultura vertical. La FAO, por ejemplo, ha publicado informes y guías sobre el uso de tecnologías avanzadas en la agricultura, subrayando la importancia de políticas que faciliten la adopción de estas tecnologías. El informe "Growing Greener Cities in Latin America and the Caribbean"[2], destaca la importancia de la agricultura urbana y periurbana en América Latina y el Caribe, y aunque no se centra exclusivamente en la agricultura vertical, sí aborda la necesidad de prácticas agrícolas innovadoras y sostenibles en las ciudades. Este informe relata que, en octubre de 2009, representantes de gobiernos, institutos de investigación, ONG y organizaciones internacionales de 12 países de América Latina y el Caribe se reunieron en Medellín, Colombia, para desarrollar estrategias destinadas a erradicar las altas tasas de pobreza urbana e inseguridad alimentaria en la región.

Se reunieron en un momento en que muchos países emergían lentamente de los efectos de la inflación global de precios de combustibles y alimentos, lo que había elevado el costo de vida más allá de los recursos de muchos de los 160 millones de pobres urbanos de la región. Los más afectados fueron las familias urbanas en los países del Caribe con una alta dependencia de las

[1] https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/
[2] https://www.fao.org/family-farming/detail/en/c/273735/

importaciones de alimentos, y aquellos en países con altos niveles de pobreza urbana extrema, donde las compras de alimentos representaban la mayor parte del gasto de los hogares de bajos ingresos.

La reunión de Medellín propuso una transición urbana hacia la inclusión social, la equidad y la sostenibilidad. Su Declaración de Medellín[3], instó a los gobiernos nacionales, estatales y locales a incorporar la agricultura urbana y periurbana (UPA) en sus programas para erradicar el hambre y la pobreza, garantizar la seguridad alimentaria y nutricional, promover el desarrollo local y mejorar el entorno urbano. En ese momento, la UPA proporcionaba una red de seguridad para muchas familias de bajos ingresos. Un análisis de la FAO de encuestas nacionales de hogares, recopiladas entre 2003 y 2008, mostró que 1.4 millones de habitantes urbanos en Nicaragua y Guatemala también eran productores de alimentos. Los ahorros en las compras de alimentos, junto con las ventas de productos, representaban más de una quinta parte de los ingresos de sus hogares.

Cinco años después, dicho informe evaluó el progreso hacia la realización de la visión de Medellín de "ciudades más verdes" en América Latina y el Caribe, donde la UPA es reconocida por las políticas públicas, incluida en las estrategias de desarrollo urbano y planificación del uso del suelo, apoyada por la investigación y extensión agrícola, y vinculada a fuentes de innovación tecnológica, inversión y crédito, así como a mercados y consumidores urbanos.

Muchos países han implementado políticas de incentivos para fomentar la adopción de la agricultura vertical inteligente. Estos incentivos pueden incluir subvenciones, créditos fiscales y programas de financiamiento para agricultores y empresas que invierten en tecnologías agrícolas avanzadas. Países como Singapur y los Países Bajos han liderado estos esfuerzos, ofreciendo incentivos significativos para promover la agricultura urbana y vertical. El establecimiento de marcos regulatorios claros y favorables es crucial para el desarrollo de la agricultura vertical inteligente. Estos marcos incluyen regulaciones sobre el uso de tierras urbanas, estándares de construcción para instalaciones de agricultura vertical, y normas de seguridad alimentaria. Por ejemplo, Japón[4] ha desarrollado regulaciones específicas que facilitan la instalación y operación

[3] https://unhabitat.org/sites/default/files/2014/04/Declaration-Medellin_WUF7_Advisory-Board_ESP.pdf
[4] https://www.affrc.maff.go.jp/docs/smart_agri_pro/smart_agri_pro.htm [en japonés]

de granjas verticales en áreas urbanas, abordando cuestiones como el uso de energía y la gestión de residuos.

Las políticas de innovación y tecnología juegan un papel vital en la promoción de la agricultura vertical inteligente. Estas políticas incluyen programas de investigación y desarrollo financiados por el gobierno, asociaciones público-privadas, y la creación de centros de innovación agrícola. En los Estados Unidos, por ejemplo, el Departamento de Agricultura[5] (USDA) apoya proyectos de investigación en tecnologías agrícolas avanzadas y fomenta la colaboración entre instituciones académicas, empresas tecnológicas y agricultores.

Singapur ha implementado diversas políticas para promover la agricultura urbana y vertical, incluyendo el "Plan Maestro de Alimentos" que establece directrices para el desarrollo sostenible de la agricultura urbana. Además, el gobierno ofrece subsidios y financiamiento a proyectos de agricultura vertical que utilizan tecnologías avanzadas para mejorar la seguridad alimentaria del país.

Los productos agrícolas son los más consumidos en la ciudad-estado de Singapur, constituyendo una gran parte de la dieta de su población. La importancia dada a la salud y la buena nutrición, junto con los programas e iniciativas del Estado para promoverlos, ha sido política de estado fundamental para posicionar a Singapur en el octavo lugar del Bloomberg Global Health Index en el año 2020. Este índice clasifica a 163 países considerando factores como los ambientales, la dieta y los riesgos para la salud, entre otras variables. En él, Singapur se destaca como uno de los países más saludables del mundo, y esto se debe en gran medida a sus patrones alimentarios (Fernández, 2022).

La producción agrícola en Singapur es limitada, lo que obliga al país a importar casi la totalidad de sus necesidades alimenticias. En 2018, Singapur contaba con 78 huertos vegetales y 6 parques agro-tecnológicos, que incluían más de 200 granjas dedicadas a la producción de carne, huevos, leche, frutas, verduras y pescado. Sin embargo, solo se pudo cubrir el 13% de las verduras consumidas en 2018, y la producción local de frutas fue prácticamente inexistente, con apenas 12

[5] https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/production.pdf

toneladas anuales en comparación con las 422,000 toneladas consumidas en 2017. Esto refleja a pesar del esfuerzo invertido, una capacidad de autoabastecimiento muy limitada. En cuanto a la producción de vegetales, en 2019 Singapur alcanzó un total de 12,684 toneladas, cubriendo el 14% de las necesidades de consumo anual del país (Fernández, 2022).

Los Países Bajos son un líder mundial en la agricultura vertical e inteligente, con políticas que apoyan la investigación y la implementación de tecnologías avanzadas en la agricultura. El gobierno holandés[6] colabora estrechamente con universidades y empresas para desarrollar soluciones innovadoras que optimicen la producción agrícola en entornos controlados. En los Estados Unidos, el Farm Bill[7], legislación integral que aborda una amplia gama de políticas relacionadas con la agricultura, la alimentación y los recursos naturales- incluye provisiones que apoyan la investigación y el desarrollo de tecnologías agrícolas avanzadas, incluyendo la agricultura vertical. Este conjunto de leyes se renueva aproximadamente cada cinco años y tiene un impacto significativo en la producción agrícola, el medio ambiente y la nutrición en el país. Además, diversas iniciativas estatales y locales promueven la agricultura urbana y vertical a través de incentivos fiscales y programas de apoyo financiero.

A pesar de los avances, existen varios desafíos en la implementación de políticas efectivas para la agricultura vertical inteligente. Estos incluyen la necesidad de marcos regulatorios actualizados, la integración de nuevas tecnologías en sistemas agrícolas tradicionales, y la resistencia al cambio por parte de algunos agricultores y comunidades. Además, la inversión inicial en tecnologías avanzadas puede ser alta, lo que requiere políticas de financiamiento adecuadas.

La creciente urbanización y la demanda de alimentos sostenibles presentan una oportunidad significativa para la expansión de la agricultura vertical inteligente. Las políticas públicas pueden desempeñar un papel crucial en la promoción de estas tecnologías, facilitando el acceso a financiamiento, apoyo técnico y capacitación para los agricultores. Además, la cooperación internacional y el intercambio de conocimientos pueden acelerar la adopción de estas prácticas innovadoras a nivel global (FAO, 2022).

[6] https://www.government.nl/documents/policy-notes/2019/11/30/plan-of-action---supporting-transition-to-circular-agriculture
[7] https://sgp.fas.org/crs/misc/R45525.pdf

En Colombia, el desarrollo y adopción de la agricultura vertical y la agricultura 4.0 están comenzando a ser impulsados por diversas políticas y programas que buscan integrar tecnologías avanzadas en el sector agrícola. La ley 1876 de 2017 establece el Sistema Nacional de Innovación Agropecuaria (SNIA)[8] , que tiene como objetivo promover la investigación, desarrollo e innovación en el sector agropecuario. El SNIA facilita la implementación de nuevas tecnologías, incluyendo aquellas relacionadas con la agricultura 4.0 y la agricultura vertical, mediante la creación de alianzas entre el gobierno, las universidades y el sector privado.

El Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026- PND[9], incluye varias iniciativas dirigidas a modernizar el sector agrícola colombiano. Se enfatiza en la digitalización y el uso de tecnologías avanzadas para mejorar la productividad y sostenibilidad. Esto incluye la promoción de tecnologías de la información y comunicación (TIC) y la automatización en la agricultura. El programa Agro 4.0[10], busca por su parte, integrar tecnologías como el Internet de las Cosas (IoT), la inteligencia artificial (IA), y el big data en la producción agrícola. Este programa se centra en la capacitación de agricultores en el uso de estas tecnologías y en la creación de infraestructuras necesarias para su implementación, como la instalación de sensores y sistemas de monitoreo en tiempo real (MinTIC, 2022).

Colombia es parte observadora a su vez de la Red Iberoamericana de Digitalización de la Agricultura y la Ganadería (RIDAG)[11] . Esta red que busca fomentar la adopción de tecnologías digitales en la agricultura a nivel regional. RIDAG promueve el intercambio de conocimientos y mejores prácticas entre los países miembros y facilita la colaboración en proyectos de innovación agrícola. El Observatorio de la Agricultura Digital[12] de Naciones Unidas para América Latina, del cual Colombia forma parte, monitorea los avances y desafíos en la adopción de tecnologías digitales en la agricultura. Este observatorio genera informes y estudios que ayudan a guiar las políticas públicas y las decisiones estratégicas en el sector agropecuario.

[8] https://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?ruta=Leyes/30034416
[9] https://www.cnp.gov.co/Documents/Concepto%20CNP%20BASES%20PND%202022%202026_compressed.pdf
[10] https://gobiernodigital.mintic.gov.co/692/articles-238508_recurso_2.pdf
[11] https://ridag.net/
[12] https://agriculturadigital.cepal.org/es

A pesar de los esfuerzos, la adopción de tecnologías avanzadas en la agricultura colombiana enfrenta varios desafíos. Las brechas en habilidades digitales, la falta de infraestructura adecuada y los costos iniciales altos son obstáculos significativos. Además, existe una necesidad de mejorar la disponibilidad de información sobre los beneficios y el costo/beneficio de estas tecnologías para los pequeños agricultores. Las políticas públicas y los programas de apoyo representan, por lo tanto, una oportunidad para transformar el sector agrícola colombiano. La implementación de tecnologías de la agricultura 4.0 puede mejorar significativamente la eficiencia en el uso de recursos, aumentar la productividad y promover prácticas agrícolas más sostenibles. Además, la digitalización del sector puede abrir nuevas oportunidades para el emprendimiento rural y la creación de empleos tecnológicos en el ámbito agrícola.

2.3.Simulación paramétrica y diseño sostenible aplicados a sistemas automatizados

La simulación paramétrica y el diseño sostenible son dos enfoques innovadores que están revolucionando la agricultura vertical automatizada. Este marco teórico explora estos conceptos, su interrelación y su aplicación en la creación de sistemas de agricultura vertical que no solo optimizan la producción de alimentos, sino que también promueven la sostenibilidad ambiental.

La simulación paramétrica es una metodología de diseño que utiliza variables y parámetros específicos para modelar y predecir el comportamiento de sistemas complejos. Para Guerrero Salinas (2022), el diseño paramétrico se distingue por el uso de algoritmos y parámetros, lo que permite a los diseñadores explorar una infinita variedad de posibilidades. Este concepto ha encontrado sus aplicaciones principalmente en la ingeniería, la arquitectura y el diseño industrial, entre otros campos. Los sistemas complejos se basan en la idea de un sistema dinámico y cambiante que se organiza de manera autónoma a través de su interacción con el entorno. En diversos ámbitos como la ingeniería, la arquitectura y el diseño en general, se han utilizado algoritmos para crear formas que se generan y construyen a sí mismas mediante un proceso de autogeneración que evoluciona y cambia constantemente, situándose entre lo orgánico y lo lógico-matemático.

Desde hace varias décadas, el diseño generativo o paramétrico ha ido ganando terreno gracias a los avances tecnológicos y al desarrollo de nuevos materiales que han posibilitado su crecimiento. El término "paramétrico" tiene sus raíces en las matemáticas, y los lenguajes de programación, esencialmente utilizados para resolver problemas de lógica, estructura y organización, se emplean cotidianamente para modelar y representar datos, así como para generar simulaciones. Aunque el código puede parecer poco atractivo para el diseño y la creatividad, en manos de profesionales del diseño, los lenguajes de programación han encontrado aplicaciones radicalmente diferentes (Guerrero, 2022).

El diseño paramétrico, visto desde la perspectiva de los Sistemas Complejos Adaptativos, implica que los componentes que lo integran actúan como agentes que interactúan al igual que un organismo vivo. Esto convierte al diseño paramétrico en un proceso dinámico y cambiante que se adapta continuamente a las condiciones de su entorno. Así, el desarrollo del diseño paramétrico no sigue un proceso lineal; aunque comienza con un problema o necesidad, continúa con la definición de una idea, seguida por la determinación de variables y parámetros. Para modelar el comportamiento de estas variables y parámetros, se utilizan reglas y algoritmos, que permiten la generación de múltiples soluciones. Es crucial destacar que cualquier modificación en las variables, parámetros, reglas o algoritmos alterará las soluciones, debido a la relación de codependencia entre los elementos que configuran el diseño paramétrico (Guerrero, 2022).

En el contexto de la agricultura vertical, esta técnica permite ajustar y optimizar diversos factores como la luz, el agua, los nutrientes y la temperatura para maximizar el crecimiento de las plantas. Se entiende por simulación al proceso de crear un modelo computacional que representa un sistema real para estudiar su comportamiento bajo diferentes condiciones. Cuando un modelo matemático se implementa de forma ejecutable en una computadora, las simulaciones pueden realizarse a través de experimentos numéricos o computados, incluso en casos no numéricos. Esta metodología proporciona una manera sencilla y segura de llevar a cabo experimentos, con la ventaja adicional de que todas las variables del modelo pueden ser observadas y controladas. No obstante, el valor de los resultados de la simulación depende completamente de la precisión con la que el modelo representa el sistema real en relación con las preguntas que la simulación pretende responder (Fritzson, 2011).

Existen varias razones justificadas para realizar simulaciones en lugar de experimentos con sistemas reales:

- Los experimentos pueden ser demasiado costosos, peligrosos o el sistema que se desea investigar aún no existe.
- La escala temporal de la dinámica del sistema puede no ser compatible con la del experimentador. Por ejemplo, observar pequeños cambios en el desarrollo del universo llevaría millones de años, mientras que una simulación computacional puede hacerlo rápidamente.
- Algunas variables pueden ser inaccesibles en el sistema real, pero en una simulación todas las variables pueden ser estudiadas y controladas.
- Los modelos pueden ser manipulados fácilmente en simulaciones, permitiendo cambios en parámetros fuera del rango admisible de un sistema físico. Por ejemplo, la masa de un cuerpo puede aumentarse de 40 a 500 kg con solo pulsar una tecla en un modelo de simulación computacional.
- En una simulación, es posible suprimir perturbaciones inevitables en las mediciones del sistema real, lo que permite aislar efectos específicos y mejorar la comprensión de estos.

Las simulaciones permiten en todo caso, suprimir efectos de segundo orden, como pequeñas no linealidades o detalles menores de ciertos componentes del sistema, lo que facilita una mejor comprensión de los efectos principales (Fritzson, 2011). La simulación paramétrica se aplica en la agricultura vertical para:

- Optimización de Recursos: Ajustar el uso de agua y nutrientes basándose en las necesidades específicas de cada tipo de planta.
- Control Ambiental: Simular diferentes condiciones de temperatura y humedad para encontrar los entornos óptimos para el cultivo.
- Diseño de Estructuras: Crear y evaluar diseños de estructuras que maximicen el uso del espacio y la luz.

El diseño sostenible representa una filosofía de desarrollo que busca minimizar el impacto ambiental y optimizar el uso de recursos, integrando consideraciones sociales y económicas en un enfoque holístico de creación de productos y sistemas (Vidal, 2024). Para la agricultura vertical, esta aproximación es particularmente relevante, ya que permite desarrollar sistemas productivos que reducen significativamente el consumo de energía y recursos naturales comparados con métodos convencionales. La Figura 4 presenta los tres principios esenciales que sustentan la aplicación del diseño sostenible en agricultura vertical, estableciendo el marco conceptual para el desarrollo de sistemas verdaderamente sostenibles (Al-Chalabi, 2015).

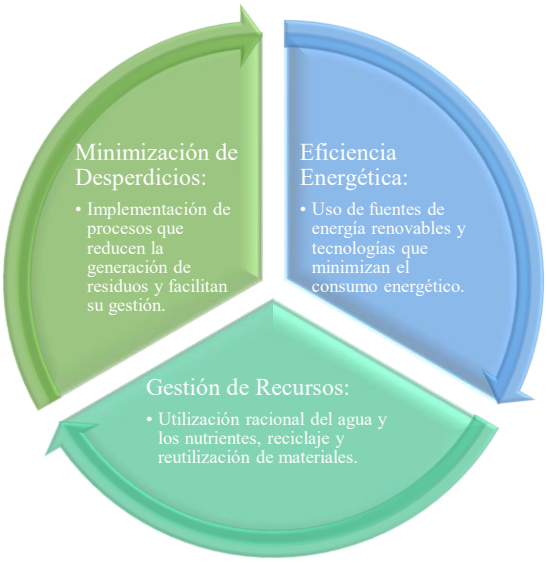


Figura 4: Principios de la agricultura sostenible. Fuente: (Al-Chalabi, 2015)

Según Al-Chalabi, la agricultura vertical aporta en este sentido los siguientes beneficios, cuando es concebida usando los principios antes enunciados:

- Reducción del Impacto Ambiental: Menor uso de pesticidas y fertilizantes químicos, lo que disminuye la contaminación del suelo y el agua.
- Ahorro de Recursos: Sistemas de riego eficientes y técnicas de cultivo que minimizan el desperdicio de agua.
- Producción Local: Reducción de la huella de carbono al acercar la producción de alimentos a los centros urbanos.

La integración de la simulación paramétrica con el diseño sostenible en sistemas de agricultura vertical automatizados permite la creación de entornos de cultivo altamente eficientes y ecológicos. Mediante la parametrización, se pueden realizar ajustes precisos en tiempo real, optimizando el uso de recursos y minimizando el impacto ambiental (Guerrero, 2022). La combinación de simulación paramétrica y diseño sostenible en la agricultura vertical automatizada representa una sinergia poderosa para enfrentar los desafíos de la producción de alimentos en un mundo con recursos limitados. La capacidad de simular y ajustar parámetros en tiempo real permite crear sistemas agrícolas que son no solo eficientes y productivos, sino también responsables con el medio ambiente (Al-Chalabi, 2015). Esta aproximación interdisciplinaria es esencial para desarrollar soluciones innovadoras que promuevan la sostenibilidad y la seguridad alimentaria a nivel global.

2.3.1. Agronomía de precisión en la agricultura vertical

La agronomía de precisión ha emergido como una revolución en las prácticas agrícolas modernas, permitiendo una gestión más eficiente y exacta de los cultivos mediante el uso de tecnologías avanzadas. La integración de estas técnicas en la agricultura vertical representa un avance significativo en la maximización de la producción de alimentos en espacios reducidos y urbanos (Castro, 2023).

La agronomía de precisión se define como el manejo de la variabilidad de los cultivos dentro de un campo agrícola mediante la utilización de tecnologías de información y comunicación, sensores y sistemas de gestión de datos. Su objetivo es optimizar el rendimiento y la calidad de los cultivos, al mismo tiempo que se minimizan los costos y el impacto ambiental. Entre las tecnologías más relevantes se encuentran los sistemas de información geográfica (GIS) y el posicionamiento global (GPS), que permiten una gestión detallada y específica de las parcelas agrícolas. Los sensores, por su parte, miden variables ambientales y del suelo como la humedad, temperatura, nutrientes y niveles de luz, proporcionando datos cruciales para la toma de decisiones (García and Flego, 2008).

La recolección y análisis de grandes volúmenes de datos (Big Data) son fundamentales en la agronomía de precisión. Estos datos permiten identificar patrones y tendencias, predecir problemas y optimizar el rendimiento de los cultivos. Además, la automatización y control mediante sistemas

avanzados facilitan la gestión de riego, fertilización y control climático, ajustándose en tiempo real a las necesidades específicas de cada cultivo (Fieldview, 2021). En la medida que la agricultura vertical implica el cultivo de plantas en capas apiladas verticalmente, en un ambiente controlado, esta técnica es especialmente útil en áreas urbanas donde el espacio para la agricultura tradicional es limitado. Utiliza, por lo tanto, tecnologías de cultivo en interiores como hidroponía, aeroponía y acuaponía (Castro, 2023).

La hidroponía se refiere al cultivo de plantas sin suelo, utilizando soluciones minerales en agua. El término hidroponía proviene del griego hydro, que significa agua, y ponos, que se traduce como trabajo o actividad, es decir, 'trabajo del agua' o 'actividad del agua'. También se conoce como cultivo sin suelo, nutricultura, quimiocultura, cultivo artificial o agricultura sin suelo. La hidroponía se originó en el siglo XIX a partir de estudios sobre las vías de absorción de nutrientes en las plantas realizados por fisiólogos como Woodward y De Saussure. A finales de la década de 1920, el doctor William Gericke, de la Universidad de California, adaptó las técnicas de laboratorio para métodos prácticos de producción de alimentos. Posteriormente, estos conocimientos fueron aprovechados por soldados británicos y estadounidenses durante la Segunda Guerra Mundial, quienes mantuvieron cultivos hidropónicos en sus bases militares. Desde entonces, la técnica se ha difundido globalmente, se practica en numerosos países y algunas compañías transnacionales la emplean para una producción intensiva (Zarate, 2015).

La aeroponía, por su parte, cultiva plantas en un entorno aéreo o de niebla, es por lo tanto una técnica de cultivo en la que las raíces de las plantas crecen suspendidas en el aire dentro de cajas cerradas y son alimentadas mediante una solución nutritiva que se nebuliza y recircula. El primer sistema aeropónico fue desarrollado en 1920 por el Dr. Franco Massantini en la Universidad de Pisa, Italia. Este desarrollo permitió la creación de las "columnas de cultivo". Una columna de cultivo es un cilindro, colocado verticalmente y con perforaciones en sus paredes laterales. Las plantas se insertan en estas perforaciones durante el trasplante, permitiendo que las raíces crezcan en la oscuridad y permanezcan mayormente expuestas al aire, lo que da origen al nombre de aeroponía (Ezquivel, 2017).

La acuaponía combina la acuicultura (cría de peces) con la hidroponía. En la acuaponía, los efluentes de la acuicultura son redirigidos hacia las camas de cultivo de plantas sin ser liberados

al ambiente, proporcionando nutrientes a las plantas a partir de fuentes sostenibles, de bajo costo y libres de químicos. Esta integración elimina varios de los factores no sostenibles asociados con el mantenimiento de sistemas de acuicultura e hidroponía por separado (Somerville et al., 2022).

La integración de la agronomía de precisión en la agricultura vertical permite un manejo altamente eficiente y sostenible de los cultivos, optimizando el uso de recursos y maximizando la producción. Los sensores juegan un papel crucial en el monitoreo de las condiciones ambientales y de crecimiento, ajustando las condiciones de cultivo en tiempo real para optimizar el crecimiento de las plantas. Los sistemas automatizados de riego y fertilización, control de clima y luz LED ajustable son esenciales para mantener condiciones óptimas de cultivo. Estos sistemas pueden ser controlados y ajustados mediante datos en tiempo real recolectados por los sensores (Chartuni and Magdalena, 2014).

La recolección y análisis de datos permiten la toma de decisiones informadas sobre la gestión de los cultivos. Los datos pueden ser utilizados para identificar patrones y tendencias, predecir problemas y optimizar el rendimiento de los cultivos. Esta integración de tecnologías y datos no solo mejora la eficiencia de los recursos utilizados, sino que también contribuye a la sostenibilidad y productividad de los sistemas de agricultura vertical (Chartuni and Magdalena, 2014).

La agronomía de precisión en la agricultura vertical ofrece numerosos beneficios, entre ellos la eficiencia de recursos, que permite un uso más racional del agua, nutrientes y energía, reduciendo el desperdicio y el costo operativo. Además, maximiza el uso del espacio, produciendo más alimentos en menos área, y promueve la sostenibilidad al optimizar el uso de recursos y reducir los insumos químicos. El control preciso de las condiciones de crecimiento puede aumentar la productividad y mejorar la calidad de los cultivos (Chartuni and Magdalena, 2014).

No obstante, existen desafíos asociados con la implementación de la agronomía de precisión en la agricultura vertical. El costo inicial de la implementación de tecnologías de precisión y sistemas automatizados puede ser elevado. Además, estos sistemas de alta tecnología requieren mantenimiento regular y actualizaciones para asegurar su eficiencia y precisión. La capacitación de agricultores y técnicos es esencial para operar y mantener estos sistemas avanzados (Ciavaldini, 2022).

A pesar de estos desafíos, las oportunidades son significativas. El continuo desarrollo de tecnologías más asequibles y eficientes puede reducir los costos y aumentar la adopción de estas prácticas. La agricultura vertical de precisión puede contribuir a la sostenibilidad de las ciudades, proporcionando alimentos frescos y reduciendo la dependencia de la agricultura tradicional (Castro, 2023).

2.4. Análisis multicriterio y enfoque sistémico en el desarrollo de agricultura vertical inteligente

El análisis multicriterio (AMC) es una metodología utilizada para evaluar y priorizar diferentes opciones o soluciones basándose en múltiples criterios. Esta técnica es particularmente útil en contextos donde las decisiones deben considerar una variedad de factores económicos, ambientales, sociales y técnicos. En la agricultura vertical inteligente, el AMC permite evaluar las tecnologías, prácticas y diseños más adecuados para maximizar el rendimiento y minimizar los impactos negativos (Murillo et al., 2021). El AMC involucra la identificación de criterios relevantes, la asignación de pesos a cada criterio según su importancia relativa y la evaluación de alternativas basándose en estos criterios ponderados. Los métodos comunes de AMC incluyen el Proceso de Jerarquía Analítica (AHP), el Método de Preferencia por Ordenación de la Similaridad con la Solución Ideal (TOPSIS), entre otras (Gomez et al., 2008); (Lopez and Sanchez, 2017); Dentro del marco de la agricultura vertical inteligente, el AMC se traduce en tres aplicaciones fundamentales, como se detalla en la Tabla 6.

Selección de Tecnologías:
• Evaluar y priorizar tecnologías como sistemas de iluminación LED, sistemas de riego automatizados y sensores ambientales basándose en criterios como eficiencia energética, costo, impacto ambiental y facilidad de integración.
Diseño de Estructuras:
• Analizar diferentes diseños estructurales de las granjas verticales para maximizar el uso del espacio y la luz natural, mientras se minimizan los costos de construcción y mantenimiento.
Gestión de Recursos:
• Optimizar el uso de agua, nutrientes y energía mediante la evaluación de prácticas de manejo y tecnologías de eficiencia.

Tabla 6: Aplicaciones básicas del análisis multicriterio. Fuente: Elaboración propia.

El enfoque sistémico es por su parte, una metodología holística que considera un sistema como un conjunto de componentes interrelacionados que funcionan como un todo. En la agricultura vertical inteligente, este enfoque implica la consideración de todos los elementos del sistema agrícola (plantas, tecnología, infraestructura, recursos humanos y medio ambiente) y sus interacciones para lograr un funcionamiento eficiente y sostenible.

El enfoque sistémico es un marco conceptual que enfatiza la comprensión holística de los sistemas complejos y sus interconexiones (Cabrera et al., 2008). Se basa en principios como el pensamiento holístico, las interrelaciones, la retroalimentación y la resiliencia. Permite identificar las sinergias y compromisos entre los diferentes componentes del sistema, facilitando la toma de decisiones que optimizan el desempeño global del sistema en lugar de centrarse en componentes individuales (Cabrera et al., 2008). En la agricultura vertical inteligente, el enfoque sistémico se aplica para:

- Diseño Integrado de Sistemas: Desarrollar diseños que integren de manera óptima todos los componentes del sistema agrícola vertical, desde las plantas y el sustrato hasta los sistemas de iluminación, riego y control climático.
- Gestión Adaptativa: Implementar sistemas de gestión que se adapten a las condiciones cambiantes y a las retroalimentaciones del sistema, permitiendo ajustes en tiempo real para optimizar el rendimiento y la sostenibilidad.
- Evaluación de Impactos: Analizar los impactos de las decisiones y prácticas agrícolas en todo el sistema, considerando aspectos económicos, ambientales y sociales.

La combinación del AMC y el enfoque sistémico proporciona un marco robusto para el desarrollo de la agricultura vertical inteligente. El AMC permite la evaluación detallada y la priorización de opciones basándose en múltiples criterios, mientras que el enfoque sistémico asegura que las decisiones tomadas se integren de manera coherente y eficiente dentro del sistema global.

Por ejemplo, en la selección de tecnologías para una granja vertical, el AMC puede ayudar a identificar las mejores opciones basadas en criterios específicos. Luego, el enfoque sistémico puede evaluar cómo estas tecnologías se integran y afectan al sistema en su conjunto, considerando las interacciones y retroalimentaciones entre diferentes componentes.

La implementación del AMC y el enfoque sistémico en la agricultura vertical inteligente enfrenta varios desafíos. La recopilación y análisis de datos precisos y relevantes puede ser compleja y costosa. Además, la integración de múltiples tecnologías y prácticas requiere conocimientos especializados y coordinación efectiva entre diferentes disciplinas y actores.

A pesar de estos desafíos, las oportunidades son significativas. El desarrollo de tecnologías más avanzadas y accesibles, así como la creciente disponibilidad de datos, facilita la aplicación de estos enfoques. La adopción de AMC y el enfoque sistémico puede conducir a sistemas agrícolas más eficientes, sostenibles y resilientes, contribuyendo a la seguridad alimentaria en entornos urbanos.

2.5.Economía circular y valoración de servicios ecosistémicos en sistemas automatizados

La creciente preocupación por la sostenibilidad ha impulsado la adopción de la economía circular y la valoración de los servicios ecosistémicos como enfoques fundamentales para la gestión ambiental. En el contexto de los sistemas automatizados, estas prácticas permiten una gestión más eficiente de los recursos y la minimización del impacto ambiental.

La economía circular es un modelo económico que busca reducir al mínimo los residuos y hacer un uso eficiente de los recursos mediante la reutilización, reparación, renovación y reciclaje de materiales y productos existentes. A diferencia del modelo económico lineal tradicional, que se basa en la extracción, uso y desecho de recursos, la economía circular promueve la creación de un ciclo continuo de reutilización de materiales, reduciendo la dependencia de recursos naturales finitos y minimizando el impacto ambiental. Este enfoque se fundamenta en principios como la regeneración de sistemas naturales, el diseño de productos para su durabilidad y la maximización del uso de recursos a lo largo de su ciclo de vida (de Miguel et al. 2021).

En los sistemas automatizados, la economía circular se puede implementar de diversas maneras. La automatización de procesos de reciclaje y recuperación de materiales permite una gestión más eficiente de los residuos y la optimización del uso de recursos. Por ejemplo, sistemas de clasificación automatizada de residuos pueden mejorar significativamente la eficiencia del reciclaje, separando materiales con mayor precisión y reduciendo la contaminación cruzada. Además, la automatización facilita la reparación y renovación de productos, prolongando su vida

útil y reduciendo la necesidad de nuevos recursos. La integración de tecnologías avanzadas, como la inteligencia artificial y el internet de las cosas (IoT), en los sistemas de gestión de residuos y recursos permite una monitorización y control en tiempo real, mejorando la eficiencia y sostenibilidad de las operaciones (Pennisi et al., 2019).

Los servicios ecosistémicos son los beneficios que los seres humanos obtienen de los ecosistemas naturales, que incluyen servicios de provisión, regulación, soporte y culturales. La valoración de estos servicios implica la cuantificación y monetización de los beneficios proporcionados por los ecosistemas, permitiendo una mejor integración de la biodiversidad y los valores ecológicos en la toma de decisiones económicas y de gestión. Este enfoque reconoce la interdependencia entre el bienestar humano y los ecosistemas saludables, promoviendo prácticas que mantengan y mejoren la funcionalidad de los ecosistemas (Corredor et al., 2012).

En el contexto de los sistemas automatizados, la valoración de los servicios ecosistémicos puede desempeñar un papel crucial en la planificación y gestión sostenible. La automatización de la monitorización ambiental mediante sensores y tecnologías de teledetección permite la recopilación de datos precisos y en tiempo real sobre el estado de los ecosistemas. Esta información puede ser utilizada para evaluar el impacto de las actividades humanas y las intervenciones tecnológicas en los servicios ecosistémicos, facilitando la toma de decisiones informadas y basadas en datos. Por ejemplo, sistemas automatizados de monitorización del agua pueden medir la calidad y disponibilidad de recursos hídricos, permitiendo una gestión más eficiente y sostenible del agua en actividades industriales y agrícolas. Asimismo, la valoración económica de los servicios ecosistémicos puede incentivar la adopción de prácticas más sostenibles y la inversión en tecnologías que minimicen el impacto ambiental y mejoren la resiliencia de los ecosistemas (Paruelo et al., 2010).

La integración de la economía circular y la valoración de servicios ecosistémicos en sistemas automatizados representa una sinergia poderosa para promover la sostenibilidad y la eficiencia en la gestión de recursos. La economía circular proporciona un marco para la reutilización y reciclaje de materiales, reduciendo la extracción de recursos naturales y la generación de residuos. Al mismo tiempo, la valoración de servicios ecosistémicos destaca la importancia de los beneficios

proporcionados por los ecosistemas naturales y la necesidad de mantener su funcionalidad y salud (INECC, 2020).

Los sistemas automatizados pueden facilitar la implementación de estos enfoques al proporcionar tecnologías avanzadas para la monitorización, gestión y optimización de recursos. La automatización permite una gestión más precisa y eficiente de los procesos de reciclaje y recuperación de materiales, así como la monitorización continua de los ecosistemas y la evaluación de los servicios que proporcionan.

La implementación de la economía circular y la valoración de servicios ecosistémicos en sistemas automatizados enfrenta varios desafíos. La recopilación y análisis de datos precisos y relevantes puede ser compleja y costosa, y la integración de múltiples tecnologías y prácticas requiere conocimientos especializados y coordinación efectiva entre diferentes disciplinas y actores. Además, la valoración económica de los servicios ecosistémicos puede ser difícil debido a la naturaleza intangible de muchos de estos servicios y la falta de métodos estandarizados para su cuantificación y monetización.

A pesar de estos desafíos, las oportunidades son significativas. El desarrollo de tecnologías más avanzadas y accesibles, así como la creciente disponibilidad de datos, facilita la aplicación de estos enfoques. La adopción de la economía circular y la valoración de servicios ecosistémicos puede conducir a sistemas de gestión de recursos más eficientes, sostenibles y resilientes, contribuyendo a la sostenibilidad ambiental y el bienestar humano. Además, la integración de estos enfoques en sistemas automatizados puede proporcionar una base sólida para la innovación y el desarrollo de nuevas tecnologías y prácticas que promuevan la sostenibilidad y la eficiencia en la gestión de recursos.

2.6.Contexto de aplicación: Cali, Colombia

El desarrollo de la agricultura vertical en Colombia representa una oportunidad significativa para abordar diversos desafíos actuales, incluyendo la seguridad alimentaria, la optimización del uso de recursos y el crecimiento económico en un entorno urbano crecientemente poblado. El análisis

de las tendencias actuales y las necesidades del país proporciona una base sólida para evaluar la viabilidad y los requerimientos para la implementación de este modelo de agricultura innovador.

2.6.1. Contexto demográfico y socioeconómico de Colombia

Según los datos de 2019 del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), para 2020, Colombia tendrá una población de 50 millones de personas distribuidas en 32 departamentos, con un crecimiento anual de la población del 1,06%. Actualmente, el centro poblado más grande es Bogotá DC, la capital del país y principal ciudad del departamento de Cundinamarca, concentrando el 16,5% de la población, aproximadamente 8,4 millones de personas. Le sigue el departamento de Antioquia con el 13,4% de la población, equivalente a 6,8 millones de habitantes, siendo Medellín su ciudad principal con 2,6 millones de personas. En Colombia, el 33% de la población vive en una de las seis ciudades más grandes: Bogotá, Medellín, Cali, Barranquilla, Cartagena y Villavicencio (Figura 5).

El país está en medio de una transición demográfica debido a la constante disminución de sus tasas de fertilidad, mortalidad y crecimiento poblacional. La tasa de natalidad ha caído de más de 6 hijos por mujer en la década de 1960 a poco más del nivel de reemplazo hoy en día, como resultado del aumento de la alfabetización, los servicios de planificación familiar y la urbanización. Sin embargo, la desigualdad de ingresos es una de las peores del mundo y más de un tercio de la población vive por debajo del umbral de pobreza (van Dooren et al., 2020).

Según van Dooren y otros (2020), hoy Colombia enfrenta el desafío de alimentar a su población urbana en rápido crecimiento, con más del 90% residiendo en ciudades y un aumento esperado en los próximos años. Una proporción significativa, más del 70%, de la población urbana en las seis ciudades más grandes del país pertenece a los estratos socioeconómicos más bajos (estratos 1, 2 y 3). Estos consumidores típicamente compran productos agrícolas básicos como papas, zanahorias, tomates y cebollas en lugar de productos agrícolas certificados (van Dooren et al., 2020). Por otro lado, en ciudades como Medellín y Barranquilla, que tienen los porcentajes más altos de población en los estratos altos (4, 5 y 6) con 24% y 22% respectivamente, existe una mayor capacidad de compra. En estos estratos se consume una mayor variedad de productos vegetales como diferentes

tipos de lechuga, tomates cherry, calabacines, pepinos y verduras certificadas y orgánicas (van Dooren et al., 2020).

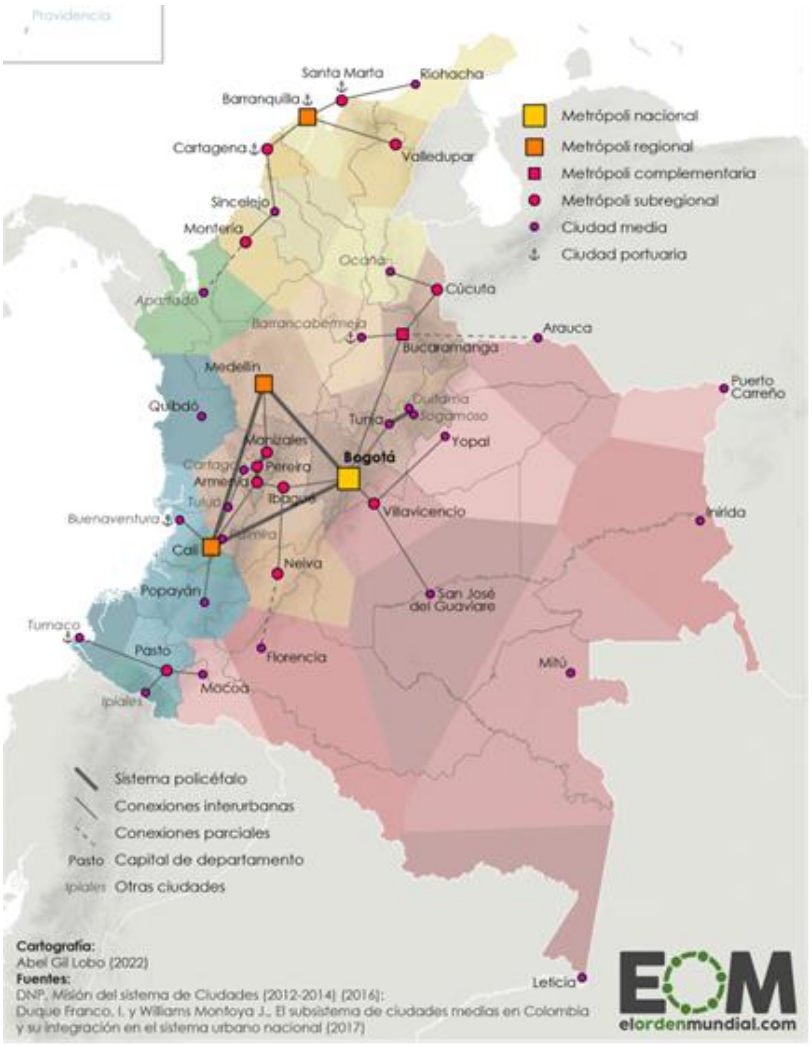


Figura 5: La red urbana de Colombia. Fuente: EOM, 2022.

2.6.2. Análisis del consumo agroalimentario de Colombia

La ingesta diaria promedio de frutas y verduras para los colombianos de entre 5 y 64 años es de solo 133 gramos, lo cual está significativamente por debajo de la cantidad recomendada. De esto, las verduras representan solo 45,8 gramos. Hay, sin embargo, una elasticidad en el consumo de frutas y verduras basada en los niveles de ingresos; a medida que aumenta el ingreso, también lo

hace el consumo. Sin embargo, la demanda general de calidad y seguridad en los alimentos es baja, lo que obstaculiza el desarrollo competitivo del sector de las verduras (van Dooren et al., 2020).

En la Encuesta de Situación Nutricional en Colombia de 2005, se reportó que un 27.9% de la población no incluía verduras en su dieta diaria, y no se observaron diferencias significativas en el consumo entre los diferentes departamentos, destacando la limitada variedad de verduras en la dieta cotidiana. A nivel nacional, la mediana del consumo diario de verduras fue de 45,75 gramos, y la moda fue de 14,5 gramos, indicando un bajo consumo general. En cuanto al consumo por departamento, Norte de Santander, Santander, Bogotá D.C., Huila y Meta fueron los que registraron un mayor consumo diario. En particular, Huila mostró un alto porcentaje de consumidores de verduras, con una mediana de consumo considerablemente alta (MinSalud, 2013).

En relación con las verduras más consumidas, el tomate fue la principal, aunque en cantidades modestas. La cebolla de bulbo, la zanahoria, la cebolla larga, la arveja verde, la habichuela y el repollo también fueron comunes, pero su consumo medio diario no superó los 28 gramos. Estos alimentos generalmente no constituyen el plato principal, sino que se utilizan como complementos en diversas preparaciones. Por otro lado, el análisis detallado mostró que, aunque existe una diversidad de verduras disponibles, el consumo de estas es menor en comparación con las frutas, y las verduras más consumidas no necesariamente son las que se consumen en mayor cantidad (MinSalud, 2013).

Además, se observó que verduras como el pepino cohombro y la ahuyama, a pesar de su bajo costo por gramo, tenían una baja frecuencia de consumo mensual. Esto sugiere que el precio no siempre influye significativamente en la cantidad de verduras consumidas. Por otro lado, las frutas tendían a tener un costo por gramo menor comparado con las verduras, lo cual podría explicar su mayor consumo (MinSalud, 2013).

Según la Encuesta Nacional de Presupuestos de Hogares (EPNH) realizada por el DANE a nivel nacional entre 2016 y 2017, en Colombia hay aproximadamente 14 millones de hogares, lo que representa alrededor de tres millones más que en el periodo entre 2006 y 2007. Estos hogares tienen un ingreso mensual promedio de 1.773.000 pesos colombianos (aproximadamente a 430

euros), lo que representa un 17% más que el ingreso promedio registrado en la última medición realizada diez años antes (entre 2006 y 2007). La misma encuesta estima que 12 millones de hogares en Colombia consumen verduras, gastando un total de 572.260 millones de pesos colombianos mensualmente. En promedio, cada hogar gasta 44.000 pesos colombianos al mes en la compra de estas verduras, lo que equivale a aproximadamente 10,05 euros.

En general, los niveles de consumo en Colombia están por debajo de las recomendaciones de organizaciones como la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la FAO, las cuales sugieren que un individuo entre 5 y 64 años debería consumir un promedio de 400 gramos de frutas y verduras diariamente (van Dooren et al., 2020).

Según el Ministerio de Salud y Protección Social y la FAO (2013), los principales factores que influyen en estos bajos niveles de consumo incluyen los precios de los alimentos, cambios sociodemográficos, servicios de alimentación, preferencias y creencias individuales, tradiciones culturales, factores geográficos, ambientales y el ingreso. Respecto a este último, se ha identificado una relación positiva entre el ingreso de los hogares y el consumo de verduras; es decir, a medida que aumenta el ingreso de las familias colombianas, también lo hace su consumo de verduras (van Dooren et al., 2020).

Los agricultores entretanto reciben asistencia técnica limitada, predominantemente proporcionada por compañías que importan y distribuyen semillas, agroquímicos y fertilizantes, aunque las entidades gubernamentales afirman llegar a los pequeños productores. Los productos se destinan principalmente a mercados locales y mayoristas, y debido a un alto nivel de intermediación, los precios están determinados por la dinámica de oferta y demanda del mercado (van Dooren et al., 2020).

Los productores que abastecen a las cadenas de tiendas garantizan el volumen, pero a menudo utilizan métodos de producción tradicionales con inversiones a largo plazo mínimas. Tecnologías avanzadas como invernaderos y sistemas de riego se han integrado lentamente, particularmente en el cultivo de tomates durante los últimos 12 años. Sin embargo, la transición de los cultivos de campo abierto a la producción en invernadero se ve obstaculizada por los altos costos iniciales y la falta de conocimiento sobre los beneficios y la gestión agronómica necesaria para la producción

en invernadero. Esta situación se ve agravada por la reticencia de los agricultores a tomar préstamos bancarios debido a la volatilidad de los precios en el sector (van Dooren et al., 2020).

En términos de tecnología, el Tercer Censo Nacional Agropecuario (3er CNA) realizado por el DANE en 2016 reveló que las unidades de producción agrícola (que producen productos agrícolas, forestales, ganaderos o acuícolas) cuentan con tecnologías en sus unidades de producción, tal como lo muestra la tabla 7.

- Infraestructura:
  - Solo el 16,4% de las unidades de producción agrícola cuentan con las infraestructuras necesarias como almacenes, estanques, canales de riego y áreas administrativas, mientras que el 83,6% no dispone de estas facilidades.
- Sistemas de riego:
  - El 33,3% de las unidades posee sistemas de riego. De estas, el 54,6% utiliza aspersores aéreos, el 53,8% con motobomba, el 46,8% sistemas de riego por gravedad, el 7,5% por goteo y el 7,9% sistemas de riego manuales.
- Asistencia técnica:
  - Solo el 16,5% de las unidades reciben asistencia técnica. De estas, el 87,2% implementa prácticas de buenas prácticas agrícolas, el 12,6% manejo del medio ambiente, el 12,4% manejo del suelo, y el 11,4% buenas prácticas ganaderas.
- Maquinaria:
  - El 16,4% de las unidades tienen maquinaria propia. Dentro de este grupo, el 19,3% se utiliza para la cosecha, el 0,7% para postcosecha, el 11,3% para la preparación y siembra, y el 8,6% para la gestión.
- Acceso a crédito:
  - Solo el 10,7% de las unidades han accedido a préstamos. El uso de estos créditos se distribuye de la siguiente manera: 50,2% para la compra de insumos, 21,3% para el pago de mano de obra, 20,8% para la compra de animales, 15,9% para instalación de cultivos, 9,3% para otros destinos, 6% para la compra de maquinaria agrícola, 4,1% para mantenimiento de obras e infraestructura, 3,5% para la compra de tierras y 1,1% para procesos de postcosecha.

Tabla 7: Tecnología disponible en las unidades de producción colombianas. Fuente: Tercer Censo Nacional Agropecuario (3er CNA). DANE (2016)

Toda la literatura revisada coincide en resaltar una falta significativa de infraestructura y tecnología avanzada en el sector agrícola. Aunque algunos productores han comenzado a adoptar tecnologías modernas, como invernaderos y sistemas de riego avanzados, aún hay un gran camino por recorrer para actualizar y expandir esta adopción a una escala más amplia. La agricultura vertical requiere inversiones iniciales en infraestructura de alta tecnología que pueda controlar de manera eficiente los factores ambientales, lo cual es un desafío dado el alto costo y la necesidad de conocimiento especializado.

Es así como, aunque existe cierta adopción de tecnologías y prácticas modernas en el sector agrícola de Colombia, la mayoría de las unidades de producción aún carecen de acceso a infraestructura básica, sistemas de riego avanzados, maquinaria y asistencia técnica, lo que puede limitar significativamente su productividad y desarrollo. En el sector agrícola en Colombia los cultivos de verduras solo representan el 4,2% del área total cosechada, pero son más intensivos en producción, uso de la tierra y generación de empleos (van Dooren et al., 2020).

El productor hortícola está sujeto a los precios basados en la oferta y la demanda, determinados por el intermediario. La falta de infraestructura de postcosecha obliga al cultivador a cosechar el producto sin madurez fisiológica. Los productos cosechados son seleccionados por tamaño y empacados en sacos de 50 kilos, por ejemplo, zanahorias, cebollas y repollo o cajas de plástico de 20 kilos para, tomates y pimentones (van Dooren et al., 2020).

La producción hortícola en Colombia es una economía de agricultores y está destinada a satisfacer el mercado doméstico. El productor hortícola generalmente es un pequeño productor, donde el 75% de las granjas tiene un área de menos de 3,0 hectáreas y el 40% tiene menos de 1,0 hectárea. La producción de verduras en Colombia consta de más de 30 tipos de cultivos y, según el CNA – 2016, se lleva a cabo en todo el país y en más de 1.000 municipios. Las áreas más grandes cosechadas son para guisantes, tomates, cebollas, zanahorias, calabaza (‘ahuyama’) y cebollas. El mayor volumen de producción se encuentra en los cultivos de tomate. Los rendimientos más altos en kilogramos por hectárea se obtienen de la producción de tomate bajo cubierta (invernadero) (van Dooren et al., 2020).

Se pueden identificar entonces hoy en Colombia, tres tipos de productores, agrupados según el nivel de tecnología, pero no hay información que permita cuantificar el porcentaje de cada uno de estos grupos. Según las entrevistas realizadas para el estudio, entre el 10% y el 15% de los productores de verduras son lo que se denomina productores profesionales. Estos incluyen Agricultor de alimentos, Productor de alimentos; y Productor profesional. Se pueden identificar a su vez, dos modelos predominantes de producción entre los agricultores de alimentos, de productores individuales y de asociaciones, resumido en la Tabla 8.

Productor individual:	•Los agricultores con un área no mayor que la Unidad Agrícola Familiar (UAF), obtienen sus propias semillas y materiales agrícolas y venden a un intermediario que se ofrece a recoger el producto sin recargo por logística.
Asociación:	•Establecen alianzas con un inversor (generalmente un vendedor o un gran productor) que proporciona las semillas y suministros necesarios, mientras que el agricultor asume los costos laborales. En este modelo, la intermediación disminuye y, generalmente, los ingresos se dividen entre ambos socios.

Tabla 8: Modelos predominantes de producción agrícola en Colombia. Fuente: Tercer Censo Nacional Agropecuario (3er CNA). DANE (2016)

Los productores de alimentos, por otro lado, suelen ser aquellos que abastecen a las principales cadenas de tiendas y garantizan un suministro constante de volumen a sus clientes. Algunos productores gestionan toda la cadena (producción, logística y entrega) para garantizar la calidad de sus productos, utilizando sistemas de producción tradicionales como coberturas plásticas y sistemas de riego sin alta tecnología, sin grandes inversiones a largo plazo (van Dooren et al., 2020).

Los productores profesionales en cambio son agricultores que invierten en tecnología, algunos con sistemas hidropónicos, manejo de sustratos, sistemas de riego técnicos, invernaderos, asistencia técnica y tienen certificaciones de Buenas Prácticas Agrícolas certificadas por el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA). Estos productores se caracterizan por producir productos diferenciados como tomate cherry, diferentes variedades de lechuga (lechuga crujiente, rúcula y

lechuga iceberg), pimientos baby y verduras orgánicas, vendiendo en mercados de alta gama y cadenas de tiendas (van Dooren et al., 2020).

Es así como, la mayoría de los invernaderos utilizados en Colombia no cuentan con sistemas activos de control climático. Esta limitación para controlar los factores climáticos contrasta con los objetivos de la agricultura protegida, donde uno de los principios es aumentar el grado de control sobre los procesos biológicos (van Dooren et al., 2020).

Hoy en Colombia, aproximadamente 5.500 hectáreas están cubiertas por estructuras de invernadero, de las cuales el 85% se dedica al cultivo de flores, el 14% a verduras y el 1% a hierbas aromáticas frescas. El sector florícola ocupa la mayor área de invernaderos en el país. La infraestructura utilizada en estos cultivos también se ha implementado en otros, aunque frecuentemente los trabajadores que realizan el mantenimiento de invernaderos en el sector de flores ornamentales migran para construir invernaderos a menor costo en el sector hortícola alimentario, sin el conocimiento técnico suficiente.

Los productores argumentan que es difícil cambiar de cultivos en campo abierto a la producción bajo invernadero debido a la alta inversión inicial y a la inviabilidad de obtener préstamos por la incertidumbre de los precios de mercado. Además, carecen del conocimiento necesario para cultivar adecuadamente en invernaderos y sobre los impactos positivos que estos sistemas pueden tener en el aumento de la productividad y la reducción del uso de agroquímicos (van Dooren et al., 2020).

Adicionalmente, la Unidad de Planificación Rural Agropecuaria (UPRA) informa que el 54% de las propiedades rurales son informales, lo que genera inseguridad jurídica y limita el acceso a ofertas institucionales y a créditos bancarios. En cuanto a la capacitación, el sector muestra un bajo conocimiento técnico y una gran necesidad de formación técnica en aspectos productivos, manejo de invernaderos, fertirrigación, manejo integrado de plagas y enfermedades, postcosecha y logística. La mayoría de los productores reciben asistencia técnica de distribuidores comerciales de agroquímicos y semillas, centrada principalmente en la compra o venta de insumos (van Dooren et al., 2020).

Puede decirse también que hay una falta de conocimiento especializado en horticultura por parte de los agrónomos en el país, donde aún no hay suficiente información para el manejo de cultivos bajo condiciones controladas en invernaderos y el manejo de riego y fertiirrigación. Actualmente, hay varios programas educativos disponibles en el país, ofreciendo carreras de estudios profesionales y técnicos (van Dooren et al., 2020).

Las resoluciones 2155 de 2012, 14712 de 1984 y 3709 de 2015 forman parte del marco normativo de seguridad alimentaria en Colombia para el sector de verduras frescas y en su conjunto buscan cuidar de la seguridad alimentaria y el cumplimiento de estándares de calidad en el mercado de verduras en Colombia, como se ve en la Tabla 9.

RESOLUCIÓN 2155 de 2012:
• Esta resolución establece la regulación técnica sobre los requisitos sanitarios que deben cumplir las verduras que son procesadas, empaquetadas, transportadas, importadas y comercializadas en el territorio nacional.
RESOLUCIÓN 14712 de 1984:
• Especifica las normas técnicas relacionadas con productos como frutas y verduras.
RESOLUCIÓN 3709 de 2015:
• Establece los niveles máximos de contaminantes en alimentos destinados al consumo humano con el fin de proteger la salud de las personas.

Tabla 9: Regulaciones sobre seguridad alimentaria aplicables al sector de verduras frescas en Colombia. Fuente: elaboración propia según marcos normativos vigentes

Si bien la agricultura vertical tiene como mayor ventaja la independencia del clima, el suelo y otros factores, el agua será siempre un condicionador importante para la escala de los emprendimientos que se desee lograr, sobre todo si estos están ubicados al interior de las urbes. Es así como, otra de las grandes dificultades en el panorama, es el acceso al agua, el cual sigue siendo en todo caso un gran desafío, especialmente en áreas rurales y para hogares de bajos ingresos. Aun así, la agricultura vertical puede contribuir positivamente a la sostenibilidad del agua mediante sistemas de recirculación que reducen el consumo total de agua en comparación con la agricultura tradicional. Esto es particularmente relevante en Colombia, donde el manejo eficiente del agua es

crucial debido a la variabilidad climática y la frecuencia de eventos extremos relacionados con el clima.

Según los datos de la Encuesta Integrada de Hogares del DANE entre enero y octubre de 2022, el 91,5% de los hogares informaron tener acceso a fuentes de agua mejorada. Sin embargo, esto deja a aproximadamente 1.4 millones de hogares, principalmente en zonas rurales, con acceso deficiente a agua de calidad, representando alrededor del 8,5% del total (WASH Colombia and iMMAP, 2023).

La situación es particularmente grave en áreas rurales, donde sólo el 66,6% de los hogares tienen acceso a fuentes de agua mejorada, y en departamentos como Chocó, La Guajira, Córdoba y Caquetá, donde una gran proporción de hogares depende de fuentes de agua no mejoradas (WASH Colombia and iMMAP, 2023).

El análisis de riesgo sanitario llevado a cabo por el Instituto Nacional de Salud (INS) refleja que, a nivel nacional, muchos municipios enfrentan un alto riesgo sanitario en relación con la calidad del agua. En 2022, el 42,2% de los municipios evaluados se encontraba en un nivel de riesgo alto, y el 21,5% estaba clasificado como inviable sanitariamente, indicando una calidad de agua muy baja y un riesgo significativo para la salud pública. El Índice de Riesgo de Calidad del Agua (IRCA) promedio para los municipios en Colombia fue de 41,6 en 2022, lo que se clasifica como alto riesgo. Esto sugiere que una proporción considerable de la población está expuesta a agua que podría no cumplir con los estándares físicos, químicos y microbiológicos necesarios para el consumo humano seguro (WASH Colombia and iMMAP, 2023).

Aunque un segmento significativo de la población colombiana tiene acceso a agua mejorada, la calidad del agua y la seguridad sanitaria siguen siendo en todo caso, preocupantes, especialmente en áreas rurales y para hogares de bajos ingresos, lo que requiere atención urgente y mejoras en las políticas y la infraestructura de agua.

En el ámbito profesional, las universidades colombianas han empezado a producir un importante caudal de investigaciones donde la agricultura urbana y los sistemas verticales de producción alimentaria son abordados desde las más diversas ramas.

García y Pérez (2021) abordaron la implementación y efectividad de un prototipo automatizado en la agricultura vertical, enfocándose en la importancia de una planificación y diseño detallados para evitar pérdidas económicas y de tiempo. Resaltaron que, aunque la inversión inicial es alta, la automatización de variables clave, como el crecimiento anormal de las plantas, es crucial para resolver problemas a tiempo y evitar pérdidas significativas de cosechas. Además, señalaron que la recirculación de agua contribuye a un cultivo más sostenible y eficiente, no solo en el aspecto ambiental, sino también en los rendimientos y la economía del recurso hídrico. Este enfoque técnico se complementa con el uso de OpenCV y Python para optimizar la programación y permitir el monitoreo en tiempo real de las variables del cultivo (Garcia and Perez, 2021).

Por otro lado, Torres y González (2020) presentaron un modelo de negocio para una granja vertical automatizada que cultiva hortalizas como lechugas y rábanos, destacando la utilidad del lienzo Canvas para estructurar claramente la idea de negocio y el uso del microcontrolador ESP32 para recoger datos ambientales y físicos cruciales. El diseño de la granja se realizó mediante software CAD, permitiendo un control eficiente del ambiente de cultivo a través de la automatización de variables críticas como temperatura, humedad, riego y luminosidad. Además, sugirieron áreas de mejora para el sistema de calefacción y exploraron la implementación de inteligencia artificial y control difuso para optimizar aún más el rendimiento del proyecto. Este modelo destaca la importancia de una interfaz de usuario eficaz que facilite la visualización de datos y la gestión de la granja mediante aplicaciones web (Torres and Gonzalez, 2020).

Lara (2008) investigó cómo la Agricultura Urbana (AU) puede influir en la construcción de una ciudad sostenible en Bogotá, poniendo énfasis en la participación de la ciudadanía, la comunidad y la organización. Su estudio reveló que la AU en Bogotá es diversa y profundamente enraizada en las dinámicas locales, y que las organizaciones comunitarias han sido clave desde 2004 para promover la institucionalización de la AU. Lara subrayó la necesidad de mejorar la participación comunitaria en la formulación de políticas públicas para asegurar que la AU genere beneficios reales y tangibles para las comunidades, reconociendo que, aunque es una herramienta válida para fomentar la sostenibilidad urbana, no es una solución definitiva a problemas como el hambre y la inseguridad alimentaria (Lara, 2008).

Finalmente, Cuta (2021) examinó la viabilidad de un proyecto agroindustrial en el contexto de una recesión económica y alta tasa de desempleo, destacando la necesidad de incentivar la creación de nuevas empresas para fomentar la reactivación económica. El estudio identificó una demanda insatisfecha y oportunidades crecientes para el consumo de productos saludables y la exportación de cebolla. Aunque el análisis mostró que la mayoría de los cultivadores emplean métodos tradicionales y dependen de las condiciones climáticas, concluyó que el proyecto es viable económicamente, con un punto de equilibrio favorable y una TIR del 41%, lo que sugiere que es una inversión a largo plazo viable (Cuta, 2021). Para avanzar hacia la implementación de la agricultura vertical en Colombia, se recomienda entonces:

- Incentivar Inversiones: Fomentar la inversión en tecnología agrícola moderna y sostenible a través de incentivos fiscales y subvenciones.
- Capacitación y Educación: Desarrollar programas de formación para agricultores y técnicos en técnicas de agricultura vertical y gestión de recursos.
- Fomentar la Investigación y Desarrollo: Apoyar la investigación en tecnologías de agricultura vertical y su adaptación a las condiciones locales.
- Políticas de Apoyo: Crear políticas que apoyen la integración de la agricultura vertical en la planificación urbana y rural.
- Desarrollar Infraestructura: Invertir en la infraestructura necesaria para soportar la agricultura vertical, incluyendo tecnología de control climático avanzada y sistemas de riego eficientes.

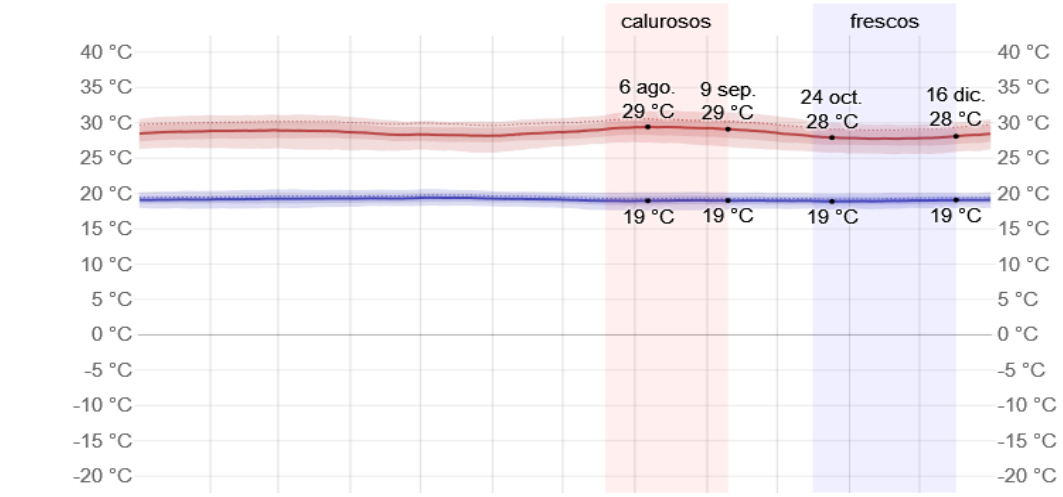
Al abordar estos aspectos, Colombia puede liderar la transformación hacia sistemas agrícolas más sostenibles y eficientes, adecuados para las crecientes necesidades de su población urbana.

2.6.3. Condiciones climáticas de Cali

Para adaptar el modelo de agricultura vertical a las condiciones específicas de Cali, es crucial realizar un análisis detallado de las variables climatológicas locales que influirán significativamente en el rendimiento de los sistemas de cultivo controlados y en los costos operativos asociados. El clima tropical de Cali presenta tanto oportunidades como desafíos para la

implementación de agricultura vertical, requiriendo un diseño de sistema que aproveche las condiciones favorables mientras mitiga los factores limitantes.

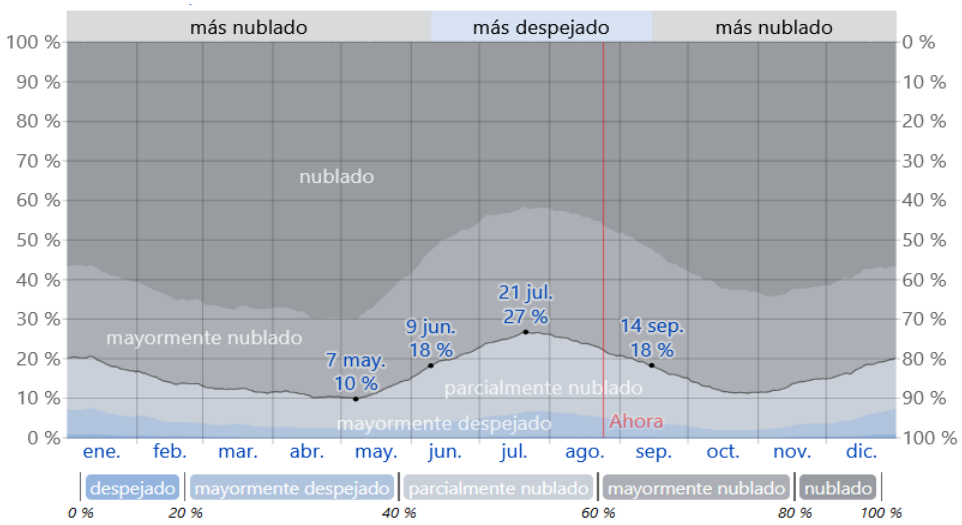
Análisis de temperatura y control térmico: Cali presenta un clima tropical monzónico caracterizado por temperaturas relativamente estables a lo largo del año. Como se observa en la Figura 6, las temperaturas máximas oscilan entre 28°C y 32°C, mientras que las mínimas se mantienen entre 18°C y 22°C, con una temperatura media que fluctúa entre 19°C y 30°C. Esta estabilidad térmica representa una ventaja significativa para los sistemas de agricultura vertical, ya que reduce los requerimientos de calefacción y refrigeración comparado con climas más variables. Sin embargo, la alta humedad relativa característica de la región (típicamente entre 60-80%) debe ser considerada en el diseño de sistemas de ventilación y deshumidificación para prevenir problemas fitosanitarios.



Promedio	ene.	feb.	mar.	abr.	may.	jun.	jul.	ago.	sep.	oct.	nov.	dic.
Máxima	29 °C	29 °C	29 °C	28 °C	28 °C	28 °C	29 °C	29 °C	29 °C	28 °C	28 °C	28 °C
Temp.	23 °C	23 °C	23 °C	23 °C	23 °C	23 °C	23 °C	24 °C	23 °C	23 °C	23 °C	23 °C
Mínima	19 °C	19 °C	19 °C	19 °C	19 °C	19 °C	19 °C	19 °C	19 °C	19 °C	19 °C	19 °C

Figura 6: Temperaturas máximas y mínimas promedio en Cali. Fuente: © WeatherSpark.com

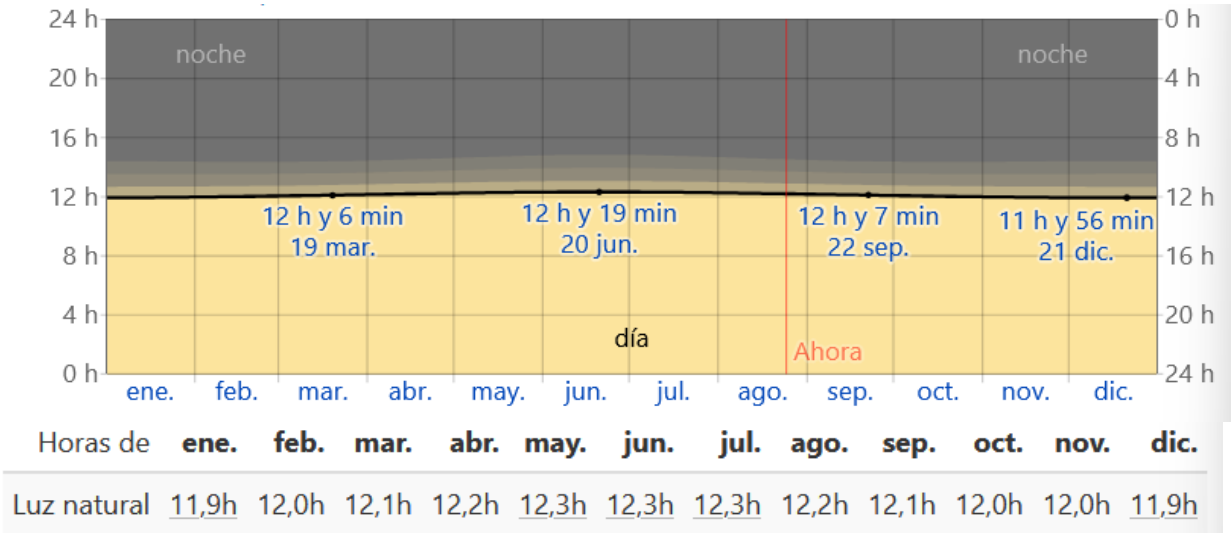
Radiación solar y estrategias de iluminación: La disponibilidad y calidad de la radiación solar en Cali presenta patrones específicos que impactan directamente las estrategias de iluminación artificial del sistema. La Figura 7 muestra las categorías de nubosidad a lo largo del año, evidenciando períodos de mayor y menor disponibilidad de luz solar natural. Esta variabilidad estacional en la nubosidad influye en la eficiencia de sistemas fotovoltaicos y en los requerimientos de iluminación suplementaria, aspectos críticos para la viabilidad económica del proyecto.



Fracción	ene.	feb.	mar.	abr.	may.	jun.	jul.	ago.	sep.	oct.	nov.	dic.
Más nublado	81 %	85 %	88 %	89 %	88 %	81 %	75 %	76 %	82 %	88 %	87 %	82 %
Más despejado	19 %	15 %	12 %	11 %	12 %	19 %	25 %	24 %	18 %	12 %	13 %	18 %

Figura 7: Categorías de nubosidad en Cali. Fuente: © WeatherSpark.com

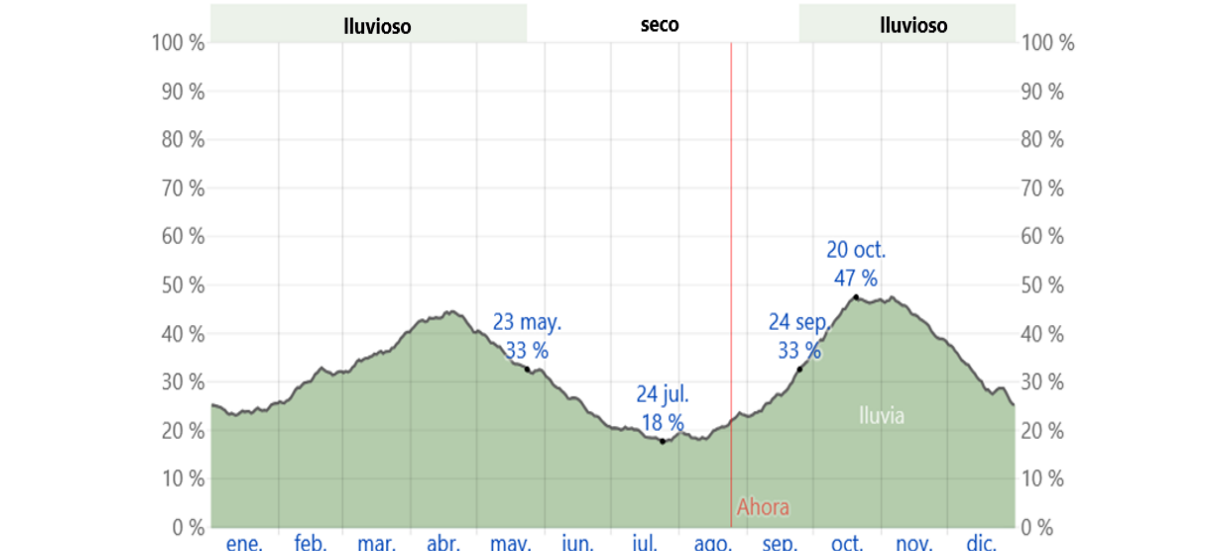
La Figura 8 complementa este análisis presentando las horas de luz natural disponibles en Cali. Se observa que la duración del día se mantiene relativamente constante debido a la proximidad al ecuador, con variaciones mínimas entre los solsticios y equinoccios. En los equinoccios de marzo y septiembre, la duración del día es cercana a 12 horas, mientras que en el solsticio de junio alcanza su máximo con aproximadamente 12 horas y 19 minutos, y en el solsticio de diciembre su mínimo con alrededor de 11 horas y 56 minutos. Esta estabilidad en las horas de luz influye en el diseño de los fotoperiodos artificiales y permite una planificación más predecible de los ciclos de cultivo.



Horas de	ene.	feb.	mar.	abr.	may.	jun.	jul.	ago.	sep.	oct.	nov.	dic.
Luz natural	11,9h	12,0h	12,1h	12,2h	12,3h	12,3h	12,3h	12,2h	12,1h	12,0h	12,0h	11,9h

Figura 8: Horas de luz natural en Cali. © WeatherSpark.com

Gestión hídrica y precipitaciones: El patrón de precipitaciones en Cali, ilustrado en la Figura 9, muestra una marcada estacionalidad que debe ser considerada en la estrategia de gestión hídrica del sistema. La ciudad experimenta una estación lluviosa prominente que podría influir en la estrategia de captación de agua lluvia y en la gestión de la humedad ambiental dentro de las instalaciones. Esta variabilidad estacional en las precipitaciones también afecta la humedad relativa del aire exterior, lo que tiene implicaciones directas para los sistemas de ventilación y control climático del invernadero vertical.



Días de	ene.	feb.	mar.	abr.	may.	jun.	jul.	ago.	sep.	oct.	nov.	dic.
Lluvia	7,5dd.	8,7dd.	11,1dd.	12,8dd.	11,0dd.	7,7dd.	6,0dd.	6,3dd.	8,5dd.	13,6dd.	13,0dd.	9,6dd.

Figura 9: Probabilidad diaria de precipitación en Cali. Fuente: © WeatherSpark.com

Optimización de ciclos de cultivo mediante análisis térmico: La Figura 10 presenta el modelamiento de los Grados Día de Crecimiento (GDC) en Cali, una herramienta fundamental para la optimización de los ciclos de cultivo en el sistema propuesto. Los GDC representan la acumulación de calor anual utilizada para predecir el desarrollo de las plantas y se definen como la integral térmica por encima de una temperatura base, descartando el exceso por encima de una temperatura máxima. Este análisis revela que Cali mantiene una acumulación térmica relativamente estable a lo largo del año, lo que facilita la planificación de ciclos de cultivo continuos y predecibles.

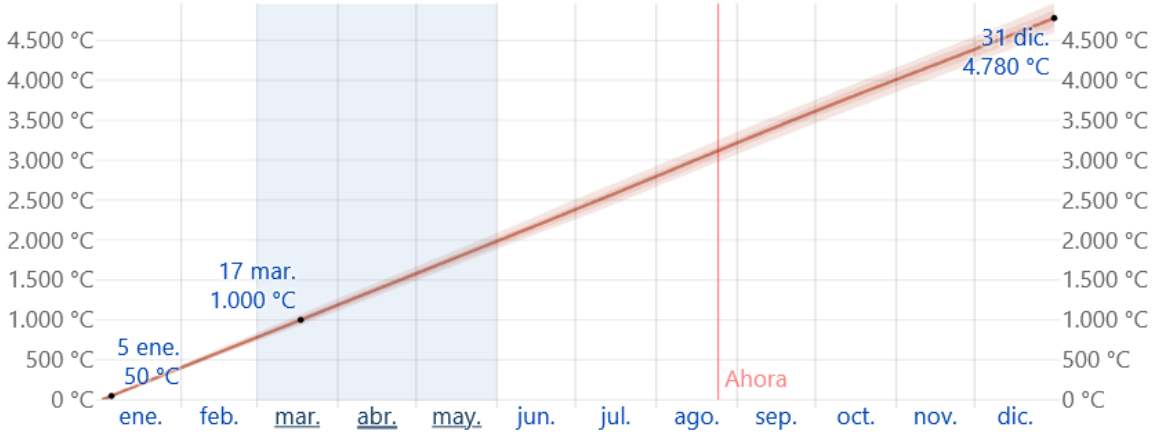


Figura 10: Modelamiento de los Grados día de crecimiento en Cali[13] Fuente: © WeatherSpark.com

Los datos de GDC son particularmente valiosos para determinar qué tipos de cultivos son más adecuados para el sistema de agricultura vertical propuesto, basándose en sus requerimientos térmicos específicos. Aunque la gráfica muestra una tendencia estable, la monitorización continua de los GDC puede alertar sobre desviaciones que podrían indicar condiciones climáticas extremas, permitiendo ajustes proactivos en el sistema de control ambiental.

[13] Los grados día de crecimiento son una medida de la acumulación de calor anual que se usan para predecir el desarrollo de las plantas y los animales y se define como la integral térmica por encima de una temperatura base, descartando el exceso por encima de una temperatura máxima. Los GDC pueden ayudar a determinar qué tipos de cultivos son más adecuados para crecer en un sistema de agricultura vertical en Cali, basándose en sus requerimientos térmicos y aunque la gráfica muestra una tendencia estable, la monitorización continua de los GDC puede alertar sobre desviaciones que podrían indicar condiciones climáticas extremas.

El análisis integral de estas variables climatológicas permite identificar las siguientes adaptaciones clave para el modelo de agricultura vertical en Cali:

- **Sistemas de control térmico:** La estabilidad térmica reduce la complejidad de los sistemas de calefacción/refrigeración, pero requiere atención especial a la deshumidificación debido a la alta humedad relativa.
- **Estrategia energética híbrida:** La variabilidad en nubosidad sugiere la conveniencia de sistemas híbridos que combinen energía solar con conexión a red eléctrica para garantizar suministro constante.
- **Aprovechamiento de precipitaciones:** Los patrones de lluvia estacional pueden ser aprovechados mediante sistemas de captación y almacenamiento de agua lluvia, reduciendo la dependencia de agua potable.
- **Optimización de ciclos productivos:** Los datos de GDC permiten planificar ciclos de cultivo optimizados que aprovechen las condiciones térmicas naturales, reduciendo costos energéticos de climatización.

2.7.Fundamentos de los modelos matemáticos aplicados

La agricultura vertical requiere un enfoque riguroso y científico para maximizar la eficiencia y rentabilidad de los sistemas de producción. En este contexto, los modelos matemáticos se erigen como herramientas fundamentales para comprender, predecir y optimizar los procesos biológicos, energéticos y económicos involucrados. Esta sección establece los principios teóricos que fundamentan los modelos específicos empleados en este estudio, abarcando desde conceptos generales hasta el modelo concreto implementado.

Para facilitar su comprensión y seguimiento, se incluyen a continuación la tabla 10 con la nomenclatura utilizada, en la que se especifican los símbolos matemáticos, su descripción y las unidades de medida correspondientes.

Símbolo	Descripción	Unidades
η_{tot}	Eficiencia fotosintética total	Adimensional
η_{int}	Eficiencia de intercepción de la luz	Adimensional
η_{conv}	Eficiencia de conversión fotoquímica	Adimensional
η_{photo}	Eficiencia fotosintética bruta	Adimensional
η_{resp}	Eficiencia respiratoria	Adimensional
η_{ph}	Eficacia fotónica	$\mu mol \cdot J^{-1}$
B_m	Producción de biomasa seca	kg
I_{PAR}	Intensidad de radiación fotosintéticamente activa	$\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
t	Tiempo de exposición	horas
C_{fix}	Carbono fijado en biomasa seca	mol $C \cdot mol^{-1}$ fotones
α_{capt}	Proporción de fotones capturados por hojas	Adimensional
Φ_{resp}	Rendimiento cuántico	mol $C \cdot mol^{-1}$ fotones
β_{harv}	Índice de cosecha	Adimensional
B_{mol}	Biomasa seca generada por mol de fotones	$g \cdot mol^{-1}$
γ_C	Proporción de carbono en biomasa seca	Adimensional
ω_W	Contenido de agua en biomasa cosechada	Adimensional
Y_C	Biomasa seca generada por mol de carbono	$g \cdot mol^{-1}$
Φ_{out}	Flujo de fotones emitido	$\mu mol \cdot s^{-1}$
P_{in}	Potencia eléctrica de entrada	W
C_{phot}	Costo por mol de fotones	$COP \cdot mol^{-1}$
C_e	Costo por kWh de electricidad	$COP \cdot kWh^{-1}$
Y_{phot}	Rendimiento en moles de fotones por kWh	$mol \cdot kWh^{-1}$
EB_{dry}	Consumo eléctrico por kg de biomasa seca	$kWh \cdot kg^{-1}$

$\mathbf{EB}_{fresh}$	Consumo eléctrico por kg de biomasa cosechada	kWh·kg^{-1}
$\mathbf{CB}_{fresh}$	Costo de electricidad por kg de biomasa cosechada	COP·kg^{-1}
$\mathbf{CB}_{dry}$	Costo de electricidad por kg de biomasa seca	COP·kg^{-1}

Tabla 10: Nomenclatura para modelos matemáticos utilizados. Fuente: Elaboración propia.

Unidades de medida utilizadas:

- **Unidades de energía**:
  - Watt (W): unidad de potencia, equivalente a 1 julio por segundo (J·s^{-1})
  - Kilowatt-hora (kWh): unidad de energía, equivalente a 3.6 millones de julios
- **Unidades para fotones**:
  - µmol: micromol, 10^{-6} moles de fotones
  - µmol·s^{-1}: flujo de fotones por segundo
  - µmol·m^{-2}·s^{-1}: densidad de flujo de fotones por unidad de área y tiempo
- **Unidades de masa**:
  - g: gramos
  - kg: kilogramos (1,000 gramos)
- **Unidades económicas**:
  - COP: Pesos colombianos
- **Adimensionales**: Proporciones, eficiencias y rendimientos que no tienen unidades asociadas.

Esta nomenclatura estandarizada se utiliza consistentemente a lo largo del documento, facilitando la comprensión de los modelos matemáticos y sus interrelaciones.

2.7.1 Teoría de la eficiencia fotosintética y conversión energética

La fotosíntesis es el proceso fundamental mediante el cual las plantas convierten la energía lumínica en energía química, siendo la base de la productividad agrícola. En sistemas de agricultura vertical, donde la iluminación artificial representa uno de los principales insumos

energéticos, comprender la eficiencia fotosintética resulta crucial para optimizar el rendimiento y consumo energético (Kozai et al., 2016).

Los primeros modelos de eficiencia fotosintética fueron desarrollados por científicos como Monteith (1977), quien estableció la relación fundamental entre la radiación interceptada y la producción de biomasa. Posteriormente, autores como Bugbee y Salisbury (1988) refinaron estos modelos, introduciendo conceptos como la eficiencia en el uso de la radiación (RUE) y la respuesta cuántica, definida como la cantidad de carbono fijado por mol de fotones absorbidos.

La eficiencia fotosintética puede ser modelada considerando diversas etapas de conversión energética. Según Bugbee y Monje (1992), esta eficiencia puede ser expresada como el producto de una serie de eficiencias parciales:

$$\eta_{tot} = \eta_{int} * \eta_{conv} * \eta_{photo} * \eta_{resp} \quad (1)$$

Donde:

- η_{tot} es la eficiencia fotosintética total
- η_{int} es la eficiencia de intercepción de la luz por el dosel vegetal
- η_{conv} es la eficiencia de conversión fotoquímica
- η_{photo} es la eficiencia fotosintética bruta
- η_{resp} es la eficiencia respiratoria (biomasa neta/biomasa bruta)

La ecuación (1) permite calcular la eficiencia teórica máxima de conversión de la energía luminosa en biomasa. Sin embargo, en condiciones prácticas, la eficiencia se ve afectada por factores como la calidad espectral de la luz, la intensidad lumínica, la temperatura, la disponibilidad de CO_2 y la respuesta fisiológica específica de cada especie vegetal (Nelson y Bugbee, 2014).

A lo largo de las décadas, diversos investigadores han profundizado en estos conceptos. Evans (1993) estableció que la eficiencia máxima teórica de conversión de energía lumínica en biomasa

se sitúa entre 4.6% para plantas C3[14] y 6.0% para plantas C4[15]. Sin embargo, las eficiencias reales observadas en sistemas agrícolas son considerablemente menores, situándose típicamente entre 0.1% y 2.0% (Zhu et al., 2008).

En sistemas de agricultura vertical, donde el ambiente es altamente controlable, existe el potencial para optimizar la eficiencia fotosintética mediante el manejo preciso de variables como el espectro e intensidad de luz, la concentración de CO_2, la temperatura y la humedad. Kozai et al. (2016) demostraron que en estos sistemas cerrados es posible acercarse considerablemente a las eficiencias teóricas máximas, especialmente mediante el enriquecimiento con CO_2 y la optimización del espectro luminoso.

Partiendo de estos fundamentos generales, el profesor Luis Manuel Navas de la Universidad de Valladolid desarrolló un modelo adaptado que permite estimar la producción de biomasa en sistemas de agricultura vertical. Este modelo, basado en los trabajos previos de Bugbee y Monje (1992), considera específicamente las condiciones de cultivo en ambientes controlados con iluminación artificial, donde la eficiencia fotosintética puede ser optimizada.

2.7.2. Bases teóricas de los modelos de rendimiento en biomasa

Los modelos de rendimiento en biomasa han evolucionado considerablemente desde los primeros trabajos de De Wit (1965), quien estableció relaciones lineales entre la radiación solar interceptada y la producción de materia seca. Posteriormente, el desarrollo de modelos más sofisticados por parte de investigadores como Thornley y Johnson (1990) permitió incorporar aspectos fisiológicos detallados, incluyendo la distribución de asimilados entre los diferentes órganos de la planta.

En su forma más básica, la productividad de biomasa puede expresarse como:

$$B_m = \eta_{conv} * I_{PAR} * t \quad (2)$$

[14] Plantas C3: Son las más comunes y llevan a cabo la fotosíntesis a través del ciclo de Calvin sin ninguna modificación especial para conservar CO_2. La primera molécula que producen al fijar el carbono es un compuesto de tres carbonos (3-fosfoglicerato, de ahí el nombre C3).

[15] Plantas C4: Han desarrollado un mecanismo especial para evitar la fotorrespiración, utilizando una vía adicional antes del ciclo de Calvin. La primera molécula que producen tiene cuatro carbonos (malato o aspartato, de ahí el nombre C4).

Donde:

- B_m es la producción de biomasa
- η_{conv} es la eficiencia de conversión de la luz en biomasa
- I_{PAR} es la intensidad de la radiación fotosintéticamente activa (PAR)
- t es el tiempo de exposición

Este modelo básico representado en la ecuación (2) ha sido refinado por numerosos investigadores para considerar factores adicionales como la arquitectura del dosel vegetal, la eficiencia de intercepción, y factores limitantes como el estrés hídrico o nutricional. Así, Goudriaan y Van Laar (1994) desarrollaron modelos que incorporaban el índice de área foliar (LAI) para cuantificar la capacidad de intercepción de radiación del cultivo.

Para el contexto específico de la agricultura vertical, las ecuaciones (3) y (4) representan el modelo adaptado de Navas, que permite calcular la cantidad de carbono fijado en biomasa seca a partir de los fotones absorbidos por las plantas. Este enfoque es particularmente relevante en sistemas de cultivo con iluminación artificial, donde es posible cuantificar con precisión la cantidad de fotones suministrados al cultivo.

El modelo de Navas considera cuatro elementos clave en la conversión de energía lumínica a biomasa:

$$C_{fix} = \alpha_{capt} * \Phi_q * \eta_{resp} * \beta_{harv} \quad (3)$$

Donde:

- C_{fix} es la cantidad de carbono fijado en biomasa seca (mol C por mol de fotones)
- α_{capt} es la proporción de fotones fotosintéticos capturados por las hojas
- Φ_q es el rendimiento cuántico (mol de carbono fijado por mol de fotones absorbidos)
- η_{resp} es la eficiencia de conversión en la respiración de la planta
- β_{harv} es el índice de cosecha (proporción de biomasa cosechable)

Para estimar la cantidad de biomasa seca producida, el modelo considera la composición elemental de la materia vegetal, específicamente el contenido de carbono en la biomasa seca:

$$B_{mol} = C_{fix} * \frac{F}{\gamma_C} \quad (4)$$

Donde:

- B_{mol} es la biomasa seca generada por mol de fotones
- F es la masa de carbono por mol (12 g/mol)
- γ_C es la proporción de carbono en la biomasa seca (aproximadamente 42%)

Este modelo tiene la ventaja de ser relativamente simple en su aplicación mientras captura los procesos biofísicos fundamentales que determinan la producción de biomasa en sistemas controlados.

2.7.3. Modelado de costos energéticos en sistemas agrícolas controlados

El modelado de costos energéticos en sistemas agrícolas ha sido objeto de estudio desde la década de 1970, cuando la crisis energética impulsó investigaciones sobre la eficiencia energética en la agricultura. Pimentel et al. (1973) establecieron algunos de los primeros análisis sistemáticos de los flujos energéticos en sistemas agrícolas, destacando la relación entre los insumos energéticos y la producción de alimentos.

Con el desarrollo de los sistemas de cultivo en ambientes controlados, el análisis energético cobró una relevancia aún mayor. En invernaderos tradicionales, Stanghellini et al. (2003) analizaron los componentes energéticos principales, identificando la calefacción, iluminación y ventilación como los mayores consumidores de energía.

El caso específico de la agricultura vertical presenta un perfil energético distinto al de los sistemas convencionales o incluso al de los invernaderos. Como señalan Graamans et al. (2018), en estos sistemas la iluminación artificial puede representar entre el 45-75% del consumo energético total, lo que convierte a este componente en el factor crítico para la viabilidad económica del sistema.

Los primeros modelos de costos energéticos para agricultura vertical fueron propuestos por Kozai y Niu (2016), quienes establecieron relaciones entre la energía consumida y la biomasa producida. Estos modelos consideraban aspectos como la eficacia de las fuentes de iluminación (μmol·J^{-1}), la densidad del flujo de fotones fotosintéticos (PPFD) y el fotoperiodo.

El desarrollo de fuentes de iluminación más eficientes, particularmente la tecnología LED, ha permitido mejorar significativamente la eficiencia energética de estos sistemas. Según Pattison et al. (2018), la eficacia de los sistemas LED ha evolucionado desde 0.9 μmol·J^{-1} en 2009 hasta más de 3.0 μmol·J^{-1} en 2020, con proyecciones para alcanzar eficacias superiores a 4.0 μmol·J^{-1} en los próximos años.

Partiendo de estos avances, el modelo para el cálculo de costos energéticos utilizado en el presente estudio se basa en la relación entre la eficacia fotónica de los sistemas de iluminación y el costo de la electricidad. Este modelo, adaptado por el profesor Navas, permite estimar el costo energético por unidad de biomasa producida.

El costo de la electricidad por mol de fotones fotosintéticos se calcula como:

$$C_{phot} = \frac{C_e}{Y_{phot}} \tag{5}$$

Donde:

- C_{phot} es el costo de electricidad por mol de fotones fotosintéticos
- C_e es el costo por kWh de electricidad
- Y_{phot} es el rendimiento en moles de fotones por kWh

El valor de Y_{phot} se determina a partir de la eficacia fotónica del sistema de iluminación mediante:

$$Y_{phot} = \frac{\Phi_{out} * 3600 * 10^{-6}}{P_{in} * 10^{-3}} \tag{6}$$

Donde:

- Φ_{out} es el output de fotones (μmol·s⁻¹)
- P_{in} es el input de energía eléctrica (W)
- 3600 es el factor de conversión de segundos a horas
- 10^{-6} es el factor de conversión de μmol a mol
- 10^{-3} es el factor de conversión de W a kW

Finalmente, el costo energético por kilogramo de biomasa seca producida se calcula como:

$$CB_{dry} = C_e * \frac{1000}{B_{mol} * Y_{phot}} \quad (7)$$

Donde:

- CB_{dry} es el costo de electricidad por kilogramo de biomasa seca
- 1000 es el factor de conversión de gramos a kilogramos
- B_{mol} es la biomasa seca producida por mol de fotones

Utilizando las ecuaciones (5), (6) y (7), es posible estimar el costo energético asociado a la producción de biomasa en sistemas de agricultura vertical con iluminación artificial, lo que proporciona una base para evaluar la viabilidad económica de estos sistemas, permitiendo analizar diferentes escenarios y optimizar variables clave para maximizar la rentabilidad.

3. Diseño metodológico y procedimientos de investigación

3.1.Diseño del estudio

Para abordar la metodología de esta tesis de maestría en el contexto de la implementación de modelos de agricultura vertical en ciudades colombianas, se planteó un diseño de estudio mixto que combinó enfoques cualitativos y cuantitativos. Este diseño permitió recopilar, analizar y contrastar datos de diversas fuentes para alcanzar los objetivos específicos planteados. La combinación de estos enfoques proporcionó una visión holística sobre los factores técnicos, económicos, ambientales y sociales que inciden en la viabilidad de la agricultura vertical en Cali, permitiendo generar un modelo de análisis fundamentado tanto en datos empíricos como en el conocimiento experto.

3.2.Técnicas e instrumentos

Se llevó a cabo una revisión sistemática de literatura en la que se consultaron bases de datos académicas y científicas con el fin de recopilar estudios relevantes sobre agricultura vertical, automatización e inteligencia artificial aplicada al control de cultivos, eficiencia fotosintética y costos energéticos en sistemas de producción controlada. Para asegurar la pertinencia y calidad de la información, se establecieron criterios de inclusión y exclusión claros (Anexo 1), priorizando estudios recientes y artículos indexados en revistas de alto impacto.

Entre las bases de datos utilizadas se encuentran Scopus, Web of Science, Google Scholar y ScienceDirect, además de motores de búsqueda académicos especializados en ciencias agronómicas y tecnología aplicada a la agricultura. Se incluyeron también documentos oficiales, reportes de proyectos y estudios de caso que detallaban experiencias previas de implementación de agricultura vertical tanto en Colombia como en países con condiciones climáticas y socioeconómicas similares.

Este análisis documental se complementó con entrevistas semiestructuradas a expertos en agricultura urbana, con el objetivo de obtener información cualitativa sobre los requisitos técnicos, legales y agronómicos necesarios para la implementación exitosa de sistemas de agricultura

vertical en entornos urbanos. La guía de entrevista del Anexo 2 incluye preguntas enfocadas en identificar desafíos, oportunidades y mejores prácticas en el campo de la agricultura vertical. Los entrevistados fueron seleccionados con base en su experiencia en proyectos de innovación agrícola y tecnología aplicada al sector, lo que permitió enriquecer el análisis con conocimientos especializados y perspectivas prácticas.

Además, se recopilaron y analizaron datos secundarios provenientes de instituciones gubernamentales y organizaciones internacionales, relacionados con las condiciones agroclimáticas, demográficas y socioeconómicas de Cali como ciudad piloto. Estos datos fueron fundamentales para contextualizar la viabilidad del modelo en función de factores ambientales y urbanos específicos.

En cuanto al análisis de modelos, se emplearon hojas de cálculo y herramientas de procesamiento de datos para evaluar las condiciones físico-espaciales y los requerimientos de sistemas de agricultura vertical. Este proceso incluyó el análisis de parámetros ambientales clave, como la disponibilidad de luz, la eficiencia energética, el uso de recursos hídricos y el rendimiento de los cultivos, basado en modelos matemáticos y datos de referencia. Se realizó un análisis comparativo entre diversos diseños técnicos prototípicos documentados en experiencias internacionales y locales, utilizando matrices de comparación para evaluar la aplicabilidad de diferentes prácticas y tecnologías en el contexto colombiano.

Finalmente, se elaboró y aplicó una matriz de evaluación multicriterio para analizar el modelo de agricultura vertical propuesto desde diferentes dimensiones: técnica, financiera, ambiental, social y legal. Se definieron indicadores específicos para cada una de estas dimensiones, lo que permitió evaluar de manera integral la viabilidad, sostenibilidad y escalabilidad del sistema propuesto. Este enfoque multicriterio resultó clave para identificar áreas de mejora y optimizar el diseño antes de su posible implementación en entornos urbanos.

3.3.Proceso de análisis de datos

El análisis de datos siguió un enfoque estructurado para procesar la información recopilada a través de las diversas fuentes consultadas. Para los datos cualitativos obtenidos de las entrevistas a

expertos y la revisión documental, se empleó un análisis de contenido temático que permitió identificar patrones, tendencias y puntos de consenso relevantes para la evaluación de viabilidad de la agricultura vertical en Cali.

El proceso consistió en la transcripción y categorización de las entrevistas realizadas a expertos, clasificando las respuestas según áreas temáticas asociadas a los objetivos específicos del estudio: requerimientos técnicos y agronómicos, viabilidad económica, sostenibilidad ambiental e integración urbana. Este análisis permitió extraer elementos clave como desafíos identificados, factores críticos de éxito y requisitos técnicos específicos para el contexto colombiano.

Para el análisis de los datos cuantitativos relacionados con la eficiencia fotosintética y los costos energéticos, se aplicaron los modelos matemáticos descritos en la sección 2.7, empleando hojas de cálculo para estimar rendimientos potenciales de biomasa y costos energéticos asociados. Los resultados de estos cálculos fueron organizados sistemáticamente para facilitar la evaluación de la viabilidad económica del modelo propuesto.

Los datos secundarios sobre condiciones agroclimáticas, características socioeconómicas y patrones de consumo en Cali fueron analizados para establecer parámetros de referencia que permitieran evaluar la adaptabilidad del modelo a las condiciones locales. Este análisis contextual fue fundamental para la definición de los requerimientos técnicos y operativos del sistema de agricultura vertical propuesto.

La integración de los análisis cualitativos y cuantitativos permitió generar una lista estructurada de requerimientos necesarios para un modelo funcional de agricultura vertical en Cali, abarcando aspectos como sistemas de control ambiental, iluminación, riego, monitoreo y gestión operativa. Esta aproximación proporcionó una base sólida para la evaluación de la viabilidad técnica y económica del modelo propuesto.

3.4.Selección y aplicación de modelos matemáticos

El desarrollo del modelo matemático se fundamentó en la simulación de condiciones físico-espaciales óptimas para sistemas de agricultura vertical en entornos urbanos, con un enfoque en la

eficiencia fotosintética y el consumo energético. Se aplicaron ecuaciones que permitieron estimar el rendimiento en biomasa seca por mol de fotones fotosintéticos absorbidos, considerando factores como la proporción de fotones capturados por las hojas, el rendimiento cuántico, la eficiencia de conversión en la respiración de la planta y el índice de cosecha. Este enfoque permitió calcular la biomasa seca generada en función de la cantidad de luz absorbida y utilizada en la fotosíntesis, proporcionando una base científica para optimizar la eficiencia de producción en sistemas controlados.

Para complementar este modelo, se incorporó un análisis de costos energéticos con el objetivo de evaluar la sostenibilidad económica del sistema. Se estimó el costo de la electricidad necesaria para la irradiación artificial, tomando en cuenta la eficacia fotónica y el rendimiento energético de los sistemas de iluminación empleados en cultivos verticales. Con ello, se determinó el costo energético por kilogramo de biomasa producida y se proyectó el costo anual total de producción en un modelo de cultivo automatizado.

La elección de estos modelos matemáticos se justificó en función de su aplicabilidad en estudios previos de agricultura en ambientes controlados. La fotosíntesis es un proceso determinante en la producción de biomasa, y su eficiencia impacta directamente la viabilidad de cualquier sistema agrícola en entornos urbanos. Asimismo, el cálculo de costos energéticos resultó esencial para comprender la sostenibilidad económica de la agricultura vertical y su potencial adopción en Cali.

3.5.Procedimiento de cálculo

El proceso de modelización incluyó varias etapas. Primero, se recopiló información sobre la eficiencia fotosintética de diversas especies de cultivos y se seleccionaron aquellas más adecuadas para la producción en sistemas verticales. Luego, se aplicaron ecuaciones para estimar la conversión de energía lumínica en biomasa seca y se integraron estos cálculos en un análisis de costos energéticos, considerando el consumo eléctrico de los sistemas de iluminación artificial. Posteriormente, se estimaron los costos de producción por kilogramo de biomasa y se proyectaron los costos anuales de producción para una instalación de mediana escala. Finalmente, se realizaron simulaciones para ajustar las condiciones óptimas de cultivo y reducir los costos asociados a la producción de biomasa en entornos controlados.

3.6.Limitaciones y supuestos del estudio

Las limitaciones de la metodología empleada incluyen la dependencia de datos experimentales preexistentes para la modelización de la fotosíntesis, lo que implica que las estimaciones podrían no reflejar con exactitud todas las variables de un entorno real de producción agrícola. Asimismo, se asumió que los sistemas de iluminación operaban con una eficiencia constante, sin considerar posibles variaciones en el rendimiento energético a lo largo del tiempo.

Otro supuesto fundamental es que los cultivos seleccionados mantienen tasas de crecimiento estables bajo condiciones controladas, lo que en la práctica puede verse afectado por factores biológicos y ambientales no contemplados en el modelo. Además, el análisis económico se basó en costos energéticos proyectados, los cuales pueden fluctuar en función de las tarifas eléctricas y la disponibilidad de tecnologías más eficientes en el futuro.

A pesar de estas limitaciones, los modelos aplicados ofrecen el marco necesario para la evaluación de la viabilidad económica y energética de la agricultura vertical en entornos urbanos. El enfoque adoptado proporciona información clave para la optimización de estos sistemas en el contexto colombiano y permite generar directrices para su futura implementación en ciudades como Cali.

3.7.Proceso de validación de resultados

La validación de los resultados obtenidos se realizó mediante un enfoque que priorizó la consistencia interna y la validez conceptual, dadas las limitaciones para realizar implementaciones piloto o simulaciones avanzadas. El proceso contempló varias estrategias complementarias para asegurar la fiabilidad de los hallazgos y recomendaciones.

En primer lugar, se implementó una validación por triangulación de fuentes, contrastando los resultados del análisis económico y los requerimientos técnicos identificados con la literatura científica actualizada y las experiencias documentadas en contextos similares. Esta aproximación permitió verificar la coherencia de las estimaciones realizadas con los parámetros reportados en estudios previos.

Un segundo nivel de validación consistió en la revisión de los resultados del modelo matemático y la lista de requerimientos por parte de expertos en agricultura urbana y sistemas energéticos. Este proceso de validación por juicio experto permitió refinar las estimaciones y ajustar los requisitos técnicos para mejorar su aplicabilidad en el contexto de Cali.

Adicionalmente, se realizó un análisis comparativo entre el modelo propuesto y casos documentados de implementación de agricultura vertical en contextos urbanos de países en desarrollo, identificando similitudes, diferencias y factores críticos de éxito que podrían incidir en la viabilidad del modelo para Cali.

La validación también incluyó un análisis crítico de las limitaciones del estudio, reconociendo explícitamente los supuestos adoptados y su potencial impacto en la aplicabilidad de los resultados. Este ejercicio de reflexión metodológica permitió establecer el alcance de las conclusiones y delimitar las condiciones bajo las cuales serían válidas las recomendaciones propuestas.

Finalmente, se establecieron indicadores de referencia para una eventual implementación futura, los cuales incluyen parámetros de eficiencia energética, productividad esperada y umbrales de rentabilidad. Estos indicadores proporcionan un marco objetivo para evaluar la factibilidad de implementación del modelo propuesto y orientar futuras investigaciones en este campo.

4. Resultados y análisis: Evaluación del modelo de agricultura vertical para Cali

El presente capítulo documenta la implementación del diseño metodológico descrito en el capítulo anterior y presenta los resultados obtenidos. Durante el período de investigación comprendido, se ejecutaron sistemáticamente todos los componentes metodológicos propuestos: se realizaron entrevistas en profundidad con expertos del sector siguiendo el protocolo semiestructurado del Anexo 2; se implementaron los modelos matemáticos de eficiencia fotosintética y análisis de costos mediante hojas de cálculo parametrizadas; y se construyó la matriz de evaluación multicriterio integrando los hallazgos cualitativos y cuantitativos. Los resultados de esta implementación, que se presentan a continuación organizados en tres secciones principales, permitieron evaluar integralmente la viabilidad de la agricultura vertical inteligente para la ciudad de Cali.

4.1.Análisis de las entrevistas a expertos

El análisis de las entrevistas a expertos permitió identificar puntos de consenso y discrepancias en torno a la implementación de la agricultura vertical en Cali. Si bien todos los entrevistados coincidieron en los beneficios de la automatización y la optimización del uso de recursos, hubo diferencias en cuanto a las estrategias específicas de implementación y la selección de tecnologías. Asimismo, se identificaron retos pendientes significativos, como el alto costo inicial y la necesidad de capacitación técnica, los cuales requieren ser abordados para garantizar la viabilidad de estos sistemas en el contexto colombiano.

4.1.1. Integración de tecnologías en la agricultura vertical

Uno de los temas más recurrentes en las entrevistas fue la importancia de la automatización y la inteligencia artificial (IA) en la agricultura vertical. Todos los expertos consultados coincidieron en que la optimización de los recursos hídricos y energéticos requiere la implementación de sistemas automatizados que permitan un monitoreo preciso y un control eficiente de las variables ambientales. Un entrevistado destacó en este sentido que "*el uso de Arduino para el control del riego basado en la humedad del suelo ha permitido reducir significativamente el desperdicio de*

agua", mientras que otro experto mencionó que en su proyecto se utilizan sensores gestionados por un microcontrolador ESP32 para controlar temperatura y humedad de manera remota.

Además, varios expertos resaltaron la importancia del Internet de las Cosas (IoT) para la recolección y análisis de datos en tiempo real, lo que permite mejorar la eficiencia y sostenibilidad de los cultivos en espacios reducidos. Fue así como uno de los entrevistados explicó que "*en el cultivo vertical de fresas, el uso de IoT ha sido clave para garantizar una producción estable y predecible*", mientras que otros subrayaron que la inteligencia artificial aplicada en modelos de simulación está optimizando cada vez más la producción de banano en condiciones climáticas variables.

4.1.2. Componentes tecnológicos y su integración

Los expertos entrevistados detallaron los principales componentes tecnológicos necesarios para la implementación de un sistema de agricultura vertical automatizado, coincidiendo en la importancia de contar con microcontroladores y sensores de alta precisión. Entre los dispositivos mencionados destacan la Raspberry Pi Model 3B, utilizada como centro de procesamiento de datos, y sensores de temperatura y humedad como el AM2320, que permiten ajustar las condiciones climáticas del entorno de cultivo.

Un experto señaló que "*sin un sistema de control centralizado, sería difícil lograr una integración eficiente de todos los sensores*", mientras que otro resaltó que "*el uso de sensores de pH y oxígeno disuelto en el agua es fundamental para optimizar la nutrición de los cultivos hidropónicos*". La elección de estos componentes refleja en todo caso la tendencia hacia sistemas modulares y escalables, capaces de adaptarse a distintas configuraciones y necesidades productivas.

4.1.3. Selección de cultivos para sistemas de producción vertical

Todos los entrevistados coincidieron en que la selección de cultivos es un aspecto crucial para garantizar el éxito de la agricultura vertical. Se mencionó la necesidad de priorizar especies de alta densidad de siembra, resistencia a condiciones controladas y buena respuesta a la iluminación artificial, destacando cultivos como la lechuga, la espinaca y las fresas. Un experto explicó que

"*los cultivos de hoja verde son los más viables en estos sistemas debido a su rápido crecimiento y alta rentabilidad*", mientras que otro mencionó que "*la producción de fresas en ambientes controlados ha demostrado ser una alternativa rentable en el contexto urbano*".

También se discutieron los retos pendientes para poder adaptar otros cultivos a la agricultura vertical, especialmente en el caso de especies con mayores requerimientos de espacio o sistemas radiculares extensos. Un entrevistado comentó que "*el banano en agricultura vertical sigue siendo un reto, pero la simulación con inteligencia artificial parece estar permitiendo que surjan avances en su viabilidad*".

4.1.4. Beneficios de la agricultura vertical en entornos urbanos

Los expertos identificaron varios beneficios clave de la agricultura vertical, destacando su capacidad para maximizar el uso del espacio urbano y reducir el impacto ambiental. Un entrevistado subrayó que "*estos sistemas permiten cultivar en espacios reducidos, como azoteas o interiores, disminuyendo la necesidad de expansión agrícola*", mientras que otro señaló que "*la producción local de alimentos contribuye a la seguridad alimentaria y reduce la huella de carbono asociada al transporte*".

Asimismo, se enfatizó el impacto positivo en el uso eficiente de los recursos naturales, ya que estos sistemas pueden reducir el consumo de agua hasta en un 90% en comparación con la agricultura tradicional: "*Gracias a la automatización del riego y la recirculación de nutrientes, podemos minimizar el desperdicio de agua y fertilizantes*", afirmó un experto.

4.1.5. Retos y barreras para la implementación

A pesar de los beneficios identificados, los entrevistados señalaron dificultades cuanto se trata de llegar a la implementación efectiva de la agricultura vertical en Cali. Uno de los principales obstáculos mencionados fue el alto costo inicial de los equipos y tecnologías necesarias. Un experto explicó que "*la inversión inicial en sistemas de automatización y control puede ser un impedimento para pequeños productores*", mientras que otro mencionó que "*los costos energéticos asociados a la iluminación artificial siguen siendo un factor crítico para considerar*".

Otro desafío relevante es la necesidad de capacitación técnica para los agricultores y operadores del sistema: "*El manejo de sensores, microcontroladores y plataformas de monitoreo requiere conocimientos especializados que no siempre están disponibles en comunidades agrícolas tradicionales*", señaló un entrevistado.

Se destacó también el escepticismo y resistencia cultural hacia estos sistemas, especialmente en sectores agrícolas tradicionales, de manera que, un experto mencionó que "*la aceptación de la agricultura vertical en Colombia sigue siendo un reto, ya que muchos productores aún prefieren los métodos convencionales*".

4.1.6. Viabilidad económica y estrategias presentes y futuras de implementación

En términos de viabilidad económica, los expertos coincidieron en que la reducción de costos operativos a través de la automatización es clave para la sostenibilidad de estos proyectos. Un entrevistado explicó por ello que "*la eficiencia en el uso de agua y energía, junto con la automatización del manejo de nutrientes, permite reducir significativamente los costos de producción*".

Asimismo, se destacó la importancia de desarrollar modelos de negocio escalables y sostenibles al respecto de lo cual un experto mencionó que "*las asociaciones con entidades gubernamentales y educativas pueden facilitar la capacitación y el acceso a financiamiento*", mientras que más de uno subrayaron además de ello, la necesidad de "*optimizar la producción para reducir desperdicios y mejorar la rentabilidad*".

Finalmente, los expertos consultados coincidieron en que la adopción de la agricultura vertical está en crecimiento y se proyecta como una solución clave para la producción de alimentos en entornos urbanos y que: "*A medida que la tecnología avance y los costos de implementación se reduzcan, veremos una expansión de estos sistemas en ciudades latinoamericanas*", como afirmó uno de los entrevistados.

Además, para muchos de ellos, se prevé también que la integración de inteligencia artificial y análisis de datos en tiempo real continúe mejorando la eficiencia y rentabilidad de estos sistemas.

"*El futuro de la agricultura vertical está en la automatización total, donde los sistemas sean capaces de autoajustarse en función de las necesidades del cultivo*", fue la conclusión de más de uno de estos expertos.

4.2.Modelación matemática de la eficiencia fotosintética y costos energéticos

La eficiencia fotosintética y el costo energético de los sistemas de agricultura vertical son factores determinantes en la viabilidad económica y la sostenibilidad de estos proyectos. En un entorno controlado, la producción de biomasa depende de la cantidad de luz disponible y de la eficiencia con la que esta energía es convertida en materia orgánica utilizable por la planta. La luz artificial se convierte en un insumo esencial para mantener el crecimiento óptimo de los cultivos en sistemas cerrados, lo que genera costos operativos significativos que deben ser evaluados cuidadosamente.

Para analizar estos aspectos, se desarrolló un modelo matemático que permite cuantificar la relación entre la luz absorbida por los cultivos y la producción de biomasa seca, integrando variables como el rendimiento cuántico, la eficiencia en la respiración de la planta y la proporción de carbono fijado en la biomasa. Además, se evaluó el costo de la electricidad utilizada para la irradiación de los cultivos, estimando el gasto energético por kilogramo de biomasa producida y su impacto en la rentabilidad del sistema.

A continuación, se presenta la modelación de estos factores, comenzando con la estimación del rendimiento en biomasa seca por mol de fotones fotosintéticos absorbidos por las plantas. Para esto se utiliza un modelo creado por el profesor Luis Manuel Navas de la Universidad de Valladolid.

4.2.1. Estimación del rendimiento en biomasa seca por mol de fotones

Para estimar la eficiencia con la que la luz es convertida en biomasa, aplicamos la ecuación (3) considerando los siguientes valores:

- Proporción de fotones fotosintéticos capturados por las hojas (α_{capt}): Se estima que el 50% de los fotones fotosintéticos incidentes son efectivamente capturados por las hojas, lo que refleja la eficiencia en la interceptación de la luz.

- Rendimiento cuántico (Φ_q): El rendimiento cuántico, expresado en mol de carbono fijado por mol de fotones absorbidos, se establece en un 6%.

- Eficiencia de conversión en la respiración de la planta (η_{resp}): Se considera que el 64% del carbono fijado es efectivamente convertido en biomasa útil tras descontar las pérdidas energéticas en la respiración.

- Índice de cosecha (β_{harv}): Se asume que el 80% de la biomasa generada por la planta es cosechable y puede ser utilizada como producto final.

Sustituyendo estos valores en la ecuación (3):

$$C_{fix} = 0.50 * 0.06 * 0.64 * 0.80 = 0.015\, mol\ C\ por\ mol\ de\ fotones$$

Este resultado indica que, por cada mol de fotones absorbidos, se generan aproximadamente 0.015 moles de carbono fijado en la biomasa.

Conversión del carbono fijado en biomasa seca: Para estimar la biomasa seca total generada, es necesario considerar la cantidad de carbono contenido en la materia seca cosechada. Utilizando la proporción de carbono en la biomasa y la conversión de moles a gramos:

- Moles de carbono por mol de fotones fotosintéticos (C_{fix}): Calculado en 0.015 mol C por mol de fotones.

- Masa de carbono por mol (F): Se considera que 1 mol de carbono tiene una masa de 12 gramos.

- Proporción de carbono en la biomasa seca (γ_C): Se establece que la biomasa cosechada contiene un 42% de carbono.

A continuación, utilizamos la ecuación (4) para calcular la biomasa seca generada por mol de fotones:

$$B_{mol} = 0.015 * 28.571 = 0.429g \textit{ de biomasa seca por mol de fotones}$$

Este resultado indica que, por cada mol de fotones fotosintéticos absorbidos, se generan aproximadamente 0.429 gramos de biomasa seca.

El modelo demuestra que la eficiencia de conversión de luz en biomasa seca está directamente influenciada por la captura de fotones, el rendimiento cuántico y la eficiencia en la respiración de la planta. La cantidad final de biomasa generada depende de múltiples factores fisiológicos y ambientales, los cuales pueden ser optimizados mediante la selección de especies con alta eficiencia fotosintética y el ajuste de las condiciones de cultivo.

En términos prácticos, estos valores pueden utilizarse para proyectar la producción total de biomasa en un sistema de agricultura vertical, permitiendo estimaciones precisas del rendimiento agrícola bajo iluminación artificial. Además, esta información es clave para evaluar la viabilidad económica del sistema, ya que permite relacionar la producción de biomasa con los costos energéticos de la iluminación, tema que será abordado en la siguiente sección sobre costos energéticos y viabilidad económica.

4.2.2. Costos energéticos asociados a la iluminación artificial

Como parte del análisis teórico previamente elaborado en este trabajo, uno de los principales factores que inciden en la viabilidad económica de la agricultura vertical es el costo energético asociado al uso de iluminación artificial ya que la fotosíntesis en ambientes controlados requiere un suministro constante de luz dentro del espectro fotosintéticamente activo, lo que implica un alto consumo de energía eléctrica. Por ello, es fundamental analizar la eficiencia con la que los sistemas de iluminación convierten la electricidad en fotones útiles para la fotosíntesis, así como el costo

total de la electricidad necesaria para mantener el crecimiento de los cultivos en un sistema vertical automatizado.

Para este análisis, aplicamos el modelo de costos energéticos presentado en la sección 2.7.3, expandiéndolo con ecuaciones específicas para nuestro contexto de estudio. Aunque el marco teórico proporciona las ecuaciones fundamentales, el análisis detallado de nuestro caso particular requiere el desarrollo de ecuaciones adicionales que abordan aspectos específicos como el consumo energético por unidad de biomasa fresca y seca.

Cálculo del costo de electricidad consumida en irradiación: Para determinar el costo energético de la iluminación artificial, se consideraron las siguientes variables clave:

- Flujo de fotones emitidos (Φ_{out}): Se estima que el sistema de iluminación genera 696 micromoles de fotones fotosintéticos por segundo.

- Potencia eléctrica de entrada (P_{in}): La energía eléctrica consumida por los sistemas de iluminación es de 330 W ($J \cdot s^{-1}$).

- Eficacia fotónica (η_{ph}): Se define como la cantidad de fotones fotosintéticos emitidos por unidad de energía eléctrica consumida:

$$\eta_{ph} = \frac{\Phi_{out}}{P_{in}} = \frac{696}{330} = 2.11\ \mu mol \cdot J^{-1} \quad (8)$$

  La ecuación (8) nos permite cuantificar la eficiencia del sistema de iluminación en términos de su capacidad para convertir energía eléctrica en fotones útiles para la fotosíntesis. Esta eficacia fotónica es un parámetro crucial para la evaluación de diferentes tecnologías de iluminación.

- Rendimiento en moles de fotones por kWh (Y_{phot}): Aplicando la ecuación (6):

$$Y_{phot} = \frac{696 * 3600 * 10^{-6}}{330 * 10^{-3}} = 7.59 \text{mol PP} \cdot \text{kWh}^{-1}$$

Como se observa este cálculo establece la relación entre el consumo energético y la producción de fotones, indicando que cada kWh de electricidad consumida produce 7.59 moles de fotones fotosintéticos.

- Costo por kWh de electricidad (C_e): Se establece que el costo de la electricidad en la región es de 800 COP por kWh.

- Costo de electricidad por mol de fotones fotosintéticos (C_{phot}): Utilizando la ecuación (5):

$$C_{phot} = \frac{C_e}{Y_{phot}} = \frac{800}{7.59} = 105.4 \; pesos \; por \; mol \; de \; fotones$$

La ecuación traduce el rendimiento fotónico a términos económicos, determinando que cada mol de fotones fotosintéticos generados tiene un costo energético de 105.4 COP.

Cálculo del costo energético por kilogramo de biomasa seca: A partir de los resultados anteriores, desarrollamos ecuaciones adicionales para determinar el costo por unidad de biomasa producida. Estas ecuaciones complementan el marco teórico inicial, adaptándolo a las necesidades específicas de nuestro análisis de viabilidad económica:

- Contenido de agua en la biomasa cosechada (ω_W): Se estima que la biomasa cosechada contiene 95% de agua, por lo que solo el 5% corresponde a biomasa seca.

- Consumo eléctrico por kilogramo de biomasa seca (EB_{dry}):

$$EB_{dry} = \frac{1000}{B_{mol} * Y_{phot}} = \frac{1000}{0.439 * 7.59} = 300.12 \; kWh \cdot kg^{-1} biomasa \; seca \qquad (9)$$

La ecuación (9) extiende el modelo teórico para calcular específicamente la energía eléctrica necesaria para producir un kilogramo de biomasa seca, lo que es esencial para evaluar la eficiencia energética del sistema. Esto indica que se requieren aproximadamente 300.12 kWh para producir un kilogramo de biomasa seca.

- Consumo eléctrico por kilogramo de biomasa cosechada (EB_{fresh}): Ajustando el cálculo por el contenido de agua:

$$EB_{fresh} = EB_{dry} * (1 - \omega_W) = 300.12 * (1 - 0.95) = 15 \text{ kWh·kg}^{-1} \quad (10)$$

La ecuación (110) introduce un ajuste crítico para nuestro análisis, ya que considera el contenido de agua en la biomasa cosechada. Esta distinción entre biomasa seca y fresca es fundamental para evaluaciones económicas realistas, puesto que los productos se comercializan generalmente en su forma fresca. Esto significa que cada kilogramo de biomasa cosechada requiere 15 kWh de electricidad.

- Costo de electricidad por kilogramo de biomasa cosechada (CB_{fresh}):

$$CB_{fresh} = C_e * EB_{fresh} = 800 * 15 = 12{,}000 \; COP{\cdot}kg^{-1} \quad (11)$$

Mediante la ecuación (11), convertimos el consumo energético en costo monetario por kilogramo de biomasa cosechada, lo que proporciona un indicador directo para el análisis de rentabilidad. Esto indica que el costo energético por cada kilogramo de biomasa cosechada asciende a 12,000 COP.

- Costo de electricidad por kilogramo de biomasa seca (CB_{dry}):

$$CB_{dry} = C_e * EB_{dry} = 800 * 300.12 = 240{,}096 \; COP{\cdot}kg^{-1} \quad (12)$$

Finalmente, la ecuación (12) completa nuestro modelo económico al establecer el costo energético por kilogramo de biomasa seca en 240,096 COP, permitiendo comparaciones

con otros sistemas de producción que suelen reportar sus eficiencias en términos de materia seca.

Las ecuaciones (8) a (12) representan una extensión necesaria del marco teórico para abordar las particularidades de nuestro caso de estudio. Si bien estas ecuaciones derivadas no se incluyeron en el marco teórico inicial para mantener su enfoque en los principios fundamentales, son desarrollos lógicos que permiten una evaluación económica más completa y adaptada al contexto específico de la agricultura vertical en Colombia.

Impacto en la rentabilidad del sistema: El análisis de costos energéticos realizado mediante las ecuaciones (8) a (12) revela que la iluminación artificial representa un gasto significativo en la producción de biomasa en sistemas de agricultura vertical. Como demuestran las ecuaciones (11) y (12), la viabilidad del proyecto depende en gran medida de la capacidad de optimizar el consumo eléctrico y mejorar la eficiencia de conversión de luz en biomasa. Para mitigar estos costos, se recomienda:

- Implementar fuentes de iluminación LED de alta eficiencia con una mayor eficacia fotónica, lo que mejoraría el valor de η_{ph} en la ecuación (8).
- Optimizar la disposición de los cultivos para maximizar la captura de fotones y minimizar pérdidas lumínicas, incrementando así el valor de B_{mol} en la ecuación (9).
- Explorar el uso de energías renovables, como paneles solares, para reducir la dependencia de la red eléctrica y disminuir el valor de C_e en las ecuaciones (11) y (12)

Los resultados obtenidos destacan la necesidad de mejorar la eficiencia energética en la iluminación de cultivos en agricultura vertical, ya que este factor, cuantificado en las ecuaciones anteriores, puede determinar la viabilidad económica del sistema y su potencial escalabilidad. En la siguiente sección, se analizará el cálculo del costo total del cultivo en función de la producción anual y el consumo eléctrico proyectado.

4.2.3. Proyección de costos operativos anuales: Análisis de escenarios

El análisis de costos energéticos realizado permite evaluar diferentes escenarios de viabilidad económica del sistema de agricultura vertical. A continuación, se presentan 5 escenarios que exploran variaciones en parámetros críticos del sistema, proporcionando una visión más completa sobre los rangos de viabilidad económica y operativa.

Escenario base - Condiciones estándar: Este escenario corresponde a los cálculos presentados anteriormente, considerando:

- Eficacia fotónica (η_{ph}): 2.11 μmol·J⁻¹ (LED estándar)
- Costo de electricidad (C_e): 800 COP·kWh⁻¹ (tarifa comercial estándar)
- Rendimiento fotosintético (B_{mol}): 0.439 g·mol⁻¹ (cultivos de hoja verde típicos)

Los resultados para este escenario base son:

Concepto	Valor
Producción anual de biomasa	100 Ton
Consumo eléctrico total anual	1,500,545 kWh
Costo total anual por electricidad	$1,200,436,000 COP
Costo por kg de biomasa cosechada	$12,000 COP

Tabla 11: Escenario base - Condiciones estándar. Fuente: Elaboración propia.

Escenario optimista - Alta eficiencia tecnológica: Este escenario considera la implementación de tecnologías LED de última generación y mejoras en la eficiencia de los cultivos:

- Eficacia fotónica (η_{ph}): 3.5 μmol·J⁻¹ (LED de alta eficiencia)
- Costo de electricidad (C_e): 600 COP·kWh⁻¹ (tarifa preferencial)
- Rendimiento fotosintético (B_{mol}): 0.52 g·mol⁻¹ (cultivos optimizados genéticamente)

Recalculando con la ecuación (6): $Y_{phot} = 12.6\ \text{mol} \cdot \text{kWh}^{-1}$, y aplicando las ecuaciones (9) a (12) con estos nuevos valores:

Concepto	Valor	% Variación vs. Base
Consumo eléctrico total anual	750,272 kWh	-50%
Costo total anual por electricidad	$450,163,200 COP	-62.5%
Costo por kg de biomasa cosechada	$4,502 COP	-62.5%

Tabla 12: Escenario optimista - Alta eficiencia tecnológica. Fuente: Elaboración propia.

Escenario pesimista - Condiciones desfavorables: Este escenario considera condiciones menos favorables, como podría ocurrir en ubicaciones con altos costos energéticos o con tecnologías más antiguas:

- Eficacia fotónica (η_{ph}):): 1.8 µmol·J⁻¹ (LED de primera generación)
- Costo de electricidad (C_e): 950 COP·kWh⁻¹ (tarifas aumentadas por múltiples factores)
- Rendimiento fotosintético (B_{mol}): 0.38 g·mol⁻¹ (cultivos no optimizados)

Recalculando con la ecuación (6): $Y_{phot} = 6.48\ \text{mol} \cdot \text{kWh}^{-1}$, y aplicando las ecuaciones (9) a (12) con estos nuevos valores:

Concepto	Valor	% Variación vs. Base
Consumo eléctrico total anual	1,922,698 kWh	+28.1%
Costo total anual por electricidad	$1,826,563,100 COP	+52.2%
Costo por kg de biomasa cosechada	$18,266 COP	+52.2%

Tabla 13: Escenario pesimista - Condiciones desfavorables. Fuente: Elaboración propia.

Escenarios con integración solar 40% - Análisis detallado de inversión: Este escenario profundiza en la integración de energía solar fotovoltaica para cubrir parte significativa del consumo energético, incluyendo un análisis de inversión inicial y retorno:

Características del sistema fotovoltaico[16]:

- Potencia solar fotovoltaica por kit: 8,000 W
- Producción media diaria por kit: 40.00 kWh

[16] https://autosolar.co/kits-solares-aislada/kit-solar-para-sistema-fotovoltaico-litio-6500w-48vdc-25500whdia

- Producción anual estimada por kit: 14,600 kWh (40 kWh × 365 días)
- Costo por kit: 58,666,725 COP

Análisis para cubrir el 40% del consumo energético:

- Consumo eléctrico anual del sistema: 1,500,545 kWh
- Energía a cubrir con paneles solares (40%): 600,218 kWh
- Número de kits necesarios: 600,218 kWh ÷ 14,600 kWh/kit = 41.11 kits
- Número de kits redondeado: 42 kits

Inversión inicial en sistema fotovoltaico:

- Costo total: 42 kits × 58,666,725 COP = 2,464,002,450 COP

Análisis económico del escenario solar 40%:

- Costo de electricidad de la red: 800 $COP \cdot kWh^{-1}$
- Costo de electricidad con sistema solar propio: 0 $COP \cdot kWh^{-1}$ (tras inversión inicial)
- Energía obtenida de la red (60%): 900,327 kWh
- Costo anual de electricidad de la red: 900,327 kWh × 800 COP = 720,261,600 COP
- Costo efectivo por kWh (combinado): 720,261,600 COP ÷ 1,500,545 kWh = 480 $COP \cdot kWh^{-1}$

El periodo simple de recuperación de la inversión se calcula como: Inversión inicial ÷ Ahorro anual = 2,464,002,450 COP ÷ 480,174,400 COP = 5.1 años

Resultados del escenario con integración solar 40%:

Concepto	Valor	% Variación vs. Base
Consumo eléctrico total anual	1,500,545 kWh	0%
Costo total anual por electricidad	$720,261,600 COP	-40%
Costo por kg de biomasa cosechada	$7,205COP	-40%
Inversión inicial en sistema fotovoltaico	$2,464,002,450 COP	-
Periodo simple de recuperación de inversión	5.1 años	-

Tabla 14: Escenarios con integración solar 40%. Fuente: Elaboración propia.

Escenario con integración solar 100% - Autoabastecimiento energético completo: Este escenario explora la posibilidad de cubrir la totalidad del consumo energético mediante sistemas fotovoltaicos, eliminando la dependencia de la red eléctrica y considerando la inversión inicial necesaria:

Características del sistema fotovoltaico:

- Se mantienen las mismas características técnicas por kit que en el escenario anterior
- Producción anual estimada por kit: 14,600 kWh

Análisis para cubrir el 100% del consumo energético:

- Consumo eléctrico anual del sistema: 1,500,545 kWh
- Energía que cubrir con paneles solares (100%): 1,500,545 kWh
- Número de kits necesarios: 1,500,545 kWh ÷ 14,600 kWh/kit = 102.78 kits
- Número de kits redondeado: 103 kits

Inversión inicial en sistema fotovoltaico:

- Costo total: 103 kits × 58,666,725 COP = 6,042,672,675 COP

Análisis económico del escenario solar 100%:

- Costo de electricidad de la red: 800 COP·kWh^{-1}
- Costo de electricidad con sistema solar propio: 0 COP·kWh^{-1} (tras inversión inicial)
- Energía obtenida de la red: 0 kWh
- Costo anual de electricidad de la red: 0 COP
- Ahorro anual comparado con escenario base: 1,200,436,000 COP

Consideraciones adicionales para sistema 100% solar:

- Costos de mantenimiento anual estimados (1% de inversión inicial): 60,426,727 COP
- Costo anual efectivo considerando mantenimiento: 60,426,727 COP

- Costo efectivo por kWh (incluyendo mantenimiento): 60,426,727 COP ÷ 1,500,545 kWh = 40.27 COP·kWh^{-1}

El periodo simple de recuperación de la inversión considerando el ahorro total en electricidad: Inversión inicial ÷ (Ahorro anual - Mantenimiento) = 6,042,672,675 COP ÷ (1,200,436,000 COP - 60,426,727 COP) = 5.3 años

Resultados del escenario con integración solar 100%:

Concepto	Valor	% Variación vs. Base
Consumo eléctrico total anual	1,500,545 kWh	0%
Costo anual efectivo (mantenimiento)	$60,426,727 COP	-95%
Costo por kg de biomasa cosechada	$604 COP	-95%
Inversión inicial en sistema fotovoltaico	$6,042,672,675 COP	-
Periodo simple de recuperación de inversión	5.3 años	-

Tabla 15: Escenarios con integración solar 100%. Fuente: Elaboración propia.

Para el escenario de integración solar 100%, es fundamental considerar el espacio físico necesario para la instalación de los 103 kits solares. Cada panel solar tiene dimensiones de 2093 x 1134 x 30mm, lo que equivale a aproximadamente 2.37 m² por panel.

Cálculo del área requerida:

- Dimensiones por panel: 2.093 m × 1.134 m = 2.37 m²
- Área por kit: 16 paneles × 2.37 m² = 37.92 m²
- Área total para 103 kits: 103 kits × 33.18 m² = 3,905.76 m²

Consideraciones de instalación:

- Se requiere un espacio adicional para separación entre filas de paneles para evitar el sombreado mutuo, aproximadamente 50% de área adicional
- Área total estimada incluyendo espacios: 3,905.76 m² × 1.5 = 5,858.64 m²
- Esto equivale aproximadamente a 0.59 hectáreas o un cuadrado de 76.6 m por lado

Consideraciones adicionales del escenario solar 100%:

- La autosuficiencia energética elimina la vulnerabilidad frente a fluctuaciones en los precios de la electricidad y posibles cortes de suministro.
- Para un proyecto de esta envergadura, sería posible negociar precios mayoristas en la adquisición de equipos, reduciendo el costo total de la inversión.
- Al cubrir el 100% de las necesidades energéticas, se podría acceder a certificaciones ambientales y de sostenibilidad que potencialmente agregarían valor a los productos en mercados premium.
- La reducción drástica en el costo por kilogramo de biomasa (604 COP) representa una ventaja competitiva significativa frente a métodos convencionales de producción.

Análisis comparativo de todos los escenarios

La siguiente tabla resume los resultados de los cinco escenarios analizados:

Parámetro	Escenario Base	Escenario Optimista	Escenario Pesimista	Escenario Solar 40%	Escenario Solar 100%
Eficacia fotónica ($\mu mol \cdot J^{-1}$)	**2.11**	**3.5**	**1.8**	**2.11**	**2.11**
Costo electricidad ($COP \cdot kWh^{-1}$)	**800**	**600**	**950**	**480**	**40.27**
Rendimiento fotosintético ($g \cdot mol^{-1}$)	**0.439**	**0.52**	**0.38**	**0.439**	**0.439**
Costo por kg biomasa (COP)	**12,000**	**4,502**	**18,266**	**7,205**	**604**
Costo anual electricidad (millones COP)	**1,200**	**450**	**1,827**	**720**	**60.4**
Inversión inicial (millones COP)	**-**	**-**	**-**	**2,464**	**6,043**
Periodo recuperación (años)	**-**	**-**	**-**	**5.1**	**5.3**

Tabla 16: Resultados análisis comparativo. Fuente: Elaboración propia.

El análisis de estos escenarios revela que la integración de energía solar fotovoltaica, especialmente en el escenario de cobertura total (100%), ofrece beneficios económicos extraordinarios a largo plazo. A pesar de requerir una inversión inicial significativa de aproximadamente 6,043 millones de COP, este enfoque podría reducir los costos energéticos anuales en un 95%, transformando radicalmente la estructura de costos del sistema de agricultura vertical.

Es notable que la diferencia en el periodo de recuperación entre el escenario de 40% y 100% de integración solar es mínima (5.1 vs 5.3 años), lo que sugiere que, desde una perspectiva financiera a largo plazo, la opción de autoabastecimiento energético completo resulta altamente atractiva. Esta estrategia no solo optimizaría la viabilidad económica del proyecto, sino que también representaría un ejemplo de sostenibilidad ambiental al eliminar prácticamente la huella de carbono asociada al consumo energético.

El escenario de 100% integración solar permitiría, además, reducir el costo por kilogramo de biomasa cosechada a apenas 604 COP, en comparación con los 12,008 COP del escenario base. Esta drástica reducción de costos operativos podría permitir establecer precios más competitivos o destinar recursos a otras áreas críticas como investigación y desarrollo, marketing o expansión del sistema.

Es importante señalar que, para proyectos de la magnitud contemplada (103 kits solares), sería factible obtener condiciones más favorables en la adquisición de equipos y posiblemente acceder a financiamiento preferencial o incentivos gubernamentales para energías renovables, lo que mejoraría aún más la viabilidad económica de este escenario.

4.3. Evaluación sistémica multicriterio de la viabilidad del modelo de agricultura vertical para Cali

4.3.1. Metodología de análisis multicriterio aplicada

Para evaluar de manera integral la viabilidad del modelo de agricultura vertical propuesto para Cali, se ha implementado un análisis multicriterio que permite considerar simultáneamente factores técnicos, económicos, ambientales y sociales. Esta metodología, descrita en la sección 2.4, facilita la toma de decisiones complejas al integrar múltiples dimensiones de análisis. La metodología aplicada se basa en los siguientes pasos:

1. **Definición de criterios de evaluación**: Se establecieron cuatro dimensiones principales (técnica, económica, ambiental y social) y se definieron criterios específicos para cada una.

2. **Ponderación de criterios**: Cada criterio recibió una ponderación según su importancia relativa, determinada mediante consulta a expertos y revisión de literatura.
3. **Evaluación de alternativas**: Los cinco escenarios analizados en la sección 4.2.3 (Base, Optimista, Pesimista, Solar 40% y Solar 100%) fueron evaluados según cada criterio.
4. **Normalización de resultados**: Los valores obtenidos fueron normalizados a una escala común (0-10) para permitir comparaciones entre criterios con diferentes unidades de medida.
5. **Agregación de resultados**: Se aplicó un método de agregación ponderada para obtener una valoración global de cada escenario.

La matriz de evaluación multicriterio desarrollada permite una visualización clara de las fortalezas y debilidades de cada alternativa, así como la identificación de los escenarios más favorables desde una perspectiva integrada.

4.3.2. Diseño de la matriz multicriterio

La matriz multicriterio diseñada para evaluar los escenarios incorpora los siguientes criterios agrupados por dimensiones:

Dimensión técnica (25%)

- Eficiencia energética (10%): Medida como kWh requeridos por kg de biomasa producida
- Complejidad de implementación (5%): Evaluación cualitativa de la dificultad técnica
- Fiabilidad del sistema (5%): Evaluación de la robustez y continuidad operativa
- Escalabilidad (5%): Capacidad del sistema para expandirse

Dimensión económica (35%)

- Inversión inicial (10%): Capital requerido para la implementación
- Costos operativos (10%): Gastos recurrentes de funcionamiento
- Tiempo de retorno de inversión (5%): Período de recuperación del capital
- Rentabilidad a largo plazo (10%): Beneficio económico después de 10 años

Dimensión ambiental (25%)

- Huella de carbono (10%): Emisiones de CO_2 asociadas al consumo energético
- Eficiencia hídrica (5%): Uso de agua por kg de biomasa producida
- Uso de suelo (5%): Eficiencia en el aprovechamiento del espacio
- Generación de residuos (5%): Impacto por desechos producidos

Dimensión social (15%)

- Generación de empleo (5%): Puestos de trabajo creados
- Accesibilidad del producto (5%): Precio final y disponibilidad
- Desarrollo de competencias locales (5%): Formación y capacitación generada

4.3.3. Metodología de cálculo para cada dimensión

Para garantizar la transparencia y replicabilidad del análisis multicriterio, esta sección detalla la metodología específica empleada para cada dimensión y sus respectivos criterios. La implementación completa de este análisis se realizó en una hoja de cálculo estructurada que documenta todos los valores crudos, procesos de normalización y ponderaciones aplicadas, siguiendo un enfoque metodológico riguroso que combina datos cuantitativos con evaluaciones cualitativas fundamentadas teóricamente.

Estructura metodológica general

El proceso de cálculo se estructuró en cuatro etapas secuenciales: primero, la recopilación de valores crudos mediante indicadores medibles específicos; segundo, la aplicación de marcos teóricos consolidados para cada criterio; tercero, la normalización a escala común (0-10); y finalmente, la agregación ponderada según la importancia relativa de cada criterio. Esta metodología garantiza que la evaluación multicriterio mantenga rigor científico mientras permite comparaciones válidas entre escenarios con características muy diferentes.

La Tabla 17 presenta una síntesis de los indicadores clave seleccionados y los rangos de valores observados en los diferentes escenarios evaluados, proporcionando una visión general de la variabilidad encontrada en cada dimensión.

Dimensión	Criterio clave	Indicador	Rango de valores en escenarios
Técnica	Eficiencia energética	kWh/kg biomasa	9.01 - 17.89
Económica	Costos operativos	Millones COP/año	60.4 - 1,827
Ambiental	Huella de carbono	kg CO_2eq/kg biomasa	0.25 - 2.94
Social	Accesibilidad producto	% población con acceso	28% - 78%

Tabla 17: Indicadores y valores representativos por dimensión

El desarrollo de criterios válidos y confiables requiere una fundamentación teórica sólida que conecte cada indicador con marcos conceptuales establecidos en la literatura científica. Las siguientes subsecciones detallan el sustento teórico y los métodos de cálculo específicos para cada dimensión, asegurando que la evaluación multicriterio se base en principios metodológicos robustos.

Dimensión técnica: Evaluación de capacidades operativas

La evaluación de la dimensión técnica se fundamenta en cuatro criterios que capturan aspectos esenciales del desempeño operativo de los sistemas de agricultura vertical. Como se detalla en la Tabla 18, cada criterio técnico se basa en marcos teóricos específicos que han sido validados en la literatura especializada sobre sistemas agrícolas controlados.

T2. Complejidad de implementación (Índice compuesto)	
Fundamentación teórica:	La complejidad de implementación se entiende como una medida multifactorial que integra el número de componentes, nivel de especialización y tiempo de ejecución. Según Kozai et al. (2016), la complejidad tecnológica es un factor determinante en la viabilidad de sistemas de agricultura vertical, particularmente en países en desarrollo donde la disponibilidad de personal cualificado puede ser limitada.
Método de estimación:	Este criterio se evalúa mediante un índice compuesto basado en la metodología de Shamshiri et al. (2018), quienes proponen cuantificar la complejidad mediante la fórmula: $$CI = \frac{(NC * CE * TI)}{100}$$ Donde: • NC: Número de componentes tecnológicos distintos • CE: Coeficiente de especialización (1-5)

	• TI: Tiempo estimado de implementación en meses
Valores de referencia:	Maraveas & Bartzanas (2022) documentan que sistemas convencionales de agricultura en ambientes controlados presentan índices entre 10-15, mientras que sistemas altamente automatizados pueden alcanzar valores de 25-30.
T3. Fiabilidad del sistema (MTBF horas)	
Fundamentación teórica:	El Tiempo Medio Entre Fallos (MTBF) es un indicador estándar de confiabilidad en sistemas técnicos complejos. Para sistemas agrícolas automatizados, Oliveira et al. (2021) identifican la fiabilidad como factor crítico debido a que fallos en sistemas de control ambiental pueden comprometer rápidamente la producción.
Método de estimación:	El MTBF se calcula considerando los componentes críticos del sistema según la fórmula: $$MTBF = \frac{1}{\sum(\frac{1}{MTBF_i})}$$ Donde $MTBF_i$ es el tiempo medio entre fallos de cada componente crítico.
Valores de referencia:	Shamshiri et al. (2018) reportan que sistemas de cultivo en ambiente controlado con redundancia operativa presentan MTBF entre 2,000-2,500 horas, mientras que sistemas sin redundancia típicamente operan entre 1,500-2,000 horas sin fallos significativos.
T4. Escalabilidad (% incremento capacidad)	
Fundamentación teórica:	La escalabilidad mide la capacidad del sistema para aumentar su producción con incrementos proporcionales menores en inversión. Kalantari et al. (2017) identifican la escalabilidad como factor determinante para la viabilidad económica de la agricultura vertical a largo plazo.
Método de estimación:	Se evalúa mediante análisis de costo marginal, calculando el incremento porcentual en capacidad productiva por cada 25% de inversión adicional: $$E = \frac{\left(\frac{\Delta CP}{CP}\right)}{\left(\frac{\Delta I}{I}\right)} * 100$$ Donde: • ΔCP: Incremento en capacidad productiva • CP: Capacidad productiva inicial • ΔI: Incremento en inversión • I: Inversión inicial

Valores de referencia:	Según Kozai (2018), sistemas modulares bien diseñados pueden lograr factores de escalabilidad de 20-25%, mientras que sistemas con menor flexibilidad presentan valores entre 12-18%.

Tabla 18: Sustento teórico para variables dimensión técnica.

El criterio de eficiencia energética se calcula directamente a partir de los resultados obtenidos en la sección 4.2.2, utilizando la ecuación (9) para determinar el consumo eléctrico por kilogramo de biomasa seca (EB_{dry}). Este indicador se normaliza aplicando la fórmula: $Puntuacion = 10 - [\frac{(EB_{dry} - 150) * 10}{350}]$, donde 150 kWh·kg^{-1} representa el consumo mínimo teóricamente alcanzable y 500 kWh·kg^{-1} el máximo viable económicamente.

La complejidad de implementación se evalúa mediante un índice compuesto que integra el número de componentes tecnológicos, el nivel de especialización requerido y el tiempo estimado de implementación. Este enfoque, basado en la metodología de Shamshiri et al. (2018), permite cuantificar objetivamente factores que tradicionalmente se evalúan de manera subjetiva.

Dimensión económica: Análisis de viabilidad financiera

La dimensión económica constituye el núcleo de la evaluación de viabilidad del proyecto, representando el 35% del peso total en la matriz multicriterio. La Tabla 19 presenta el sustento teórico y metodológico para cada criterio económico, enfatizando la importancia del análisis temporal en la evaluación de sistemas con alta inversión inicial.

E1. Inversión inicial (Millones COP)	
Fundamentación teórica:	La inversión inicial comprende todos los costos de capital necesarios para implementar el sistema antes de comenzar operaciones. Todos los autores identifican la alta inversión inicial como la principal barrera para la adopción amplia de agricultura vertical.
Método de estimación:	Se calcula mediante la suma de costos de infraestructura, equipamiento técnico, sistemas de control y costos de instalación: $Inv_i = CI + CE + CSC + CIA + CO$ Donde: • CI: Costos de infraestructura • CE: Equipamiento técnico • CSC: Sistemas de control

	• CIA: Costos de instalación y puesta en marcha • CO: Otros costos de capital
Valores de referencia:	Estudios realizados por Pennisi et al. (2020) estiman inversiones entre 3,000-4,000 dólares/m² para sistemas avanzados, mientras que sistemas con integración solar requieren inversiones adicionales de 1.5-2.5 veces el costo base.
E3. Tiempo de retorno inversión (Años)	
Fundamentación teórica:	El periodo de recuperación simple es un indicador financiero que mide el tiempo necesario para recuperar la inversión inicial a través de los flujos de caja generados. Baumont de Oliveira (2022) identifica este indicador como crítico para inversores en agricultura vertical.
Método de estimación:	Se calcula dividiendo la inversión inicial entre el flujo de caja anual: $PR = Inv_i / (IA - CO)$ Donde: • Inv_i: Inversión inicial • IA: Ingresos anuales • CO: Costos operativos anuales
Valores de referencia:	Según un estudio de viabilidad económica de Graamans et al. (2018), los periodos de recuperación para sistemas de agricultura vertical en condiciones favorables oscilan entre 4-6 años, mientras que en condiciones adversas pueden extenderse a 7-9 años.
E4. Rentabilidad a largo plazo (VAN 10 años)	
Fundamentación teórica:	El Valor Actual Neto (VAN) mide la rentabilidad absoluta del proyecto considerando el valor temporal del dinero. De acuerdo con Mitchell et al. (2015), el VAN a 10 años es un indicador robusto para evaluar la viabilidad económica de sistemas agrícolas tecnificados.
Método de estimación:	Se calcula mediante la fórmula estándar de VAN: $VAN = -Inv_i + \sum(FCt / (1+r)^t) + VR / (1+r)^n$ Donde: • Inv_i: Inversión inicial • FCt: Flujo de caja en el periodo t • r: Tasa de descuento • VR: Valor residual • n: Número de periodos (10 años)
Valores de referencia:	Baumont de Oliveira (2022) documenta que proyectos exitosos de agricultura vertical muestran VAN positivos a 10 años entre 1.5-3 veces la

	inversión inicial para sistemas convencionales, y hasta 4-5 veces para sistemas con alta eficiencia energética.

Tabla 19: Sustento teórico para variables dimensión económica.

Dimensión ambiental: Evaluación de sostenibilidad

La sostenibilidad ambiental se evalúa a través de cuatro criterios que capturan los principales impactos ambientales de los sistemas de agricultura vertical. La Tabla 20 detalla el marco teórico y las metodologías de cálculo específicas para cada indicador ambiental.

A1. Huella de carbono (kg CO_2eq/kg biomasa)	
Fundamentación teórica:	La huella de carbono mide las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a la producción. Al-Chalabi (2015) identifica este indicador como fundamental para evaluar la sostenibilidad ambiental de sistemas alimentarios.
Método de estimación:	Se calcula multiplicando el consumo energético por el factor de emisión correspondiente: $$HC = CE * FE$$ Donde: • CE: Consumo energético por kg de biomasa • FE: Factor de emisión de la fuente energética utilizada
Valores de referencia:	Estudios de Graamans et al. (2018) reportan valores entre 2-3 kg CO_2eq/kg para sistemas convencionales y 0.2-0.5 kg CO_2eq/kg para sistemas con energía renovable, considerando el ciclo de vida completo.
A2. Eficiencia hídrica (L agua/kg biomasa)	
Fundamentación teórica:	La eficiencia hídrica mide el volumen de agua necesario para producir una unidad de biomasa. Kozai (2013) destaca que el ahorro de agua es una de las principales ventajas de los sistemas hidropónicos controlados frente a la agricultura convencional.
Método de estimación:	Se calcula considerando el consumo total de agua y las pérdidas por evapotranspiración y otras fuentes: $$EH = \frac{(CA - AR)}{PB}$$ Donde: • CA: Consumo total de agua • AR: Agua recirculada • PB: Producción de biomasa

Valores de referencia:	Según Kozai et al. (2016), sistemas hidropónicos eficientes en agricultura vertical consumen entre 3-5 litros por kg de biomasa, comparado con 250-400 litros en agricultura convencional.
A3. Uso de suelo (kg/m² - productividad)	
Fundamentación teórica:	La productividad por unidad de área es un indicador clave para sistemas de agricultura vertical, donde maximizar el aprovechamiento espacial es prioritario según Thomaier et al. (2015).
Método de estimación:	Se calcula dividiendo la producción total entre el área ocupada: $$US = \frac{PT}{(AC + AAux + ASol)}$$ Donde: • PT: Producción total • AC: Área de cultivo • AAux: Área para equipos auxiliares • ASol: Área para paneles solares (cuando aplica)
Valores de referencia:	Kalantari et al. (2017) documentan productividades entre 80-110 kg/m² anuales para sistemas de agricultura vertical eficientes, considerando cultivos de hoja verde.
A4. Generación de residuos (kg residuo/ton biomasa)	
Fundamentación teórica:	Este indicador mide los residuos producidos por tonelada de biomasa cosechada. De acuerdo con Pennisi et al. (2020), minimizar la generación de residuos es fundamental para la sostenibilidad de sistemas agrícolas circulares.
Método de estimación:	Se calcula sumando los diferentes tipos de residuos generados: $$GR = \frac{RO + RI + RNV}{PB} * 1000$$ Donde: • RO: Residuos orgánicos • RI: Residuos inorgánicos • RNV: Material vegetal no comercializable • PB: Producción de biomasa
Valores de referencia:	Estudios realizados por McCree (1971) y posteriormente actualizados por Kozai (2018) indican que sistemas hidropónicos eficientes generan entre 80-130 kg de residuos por tonelada de biomasa producida.

Tabla 20: Sustento teórico para variables dimensión ambiental.

Dimensión social: Impacto en desarrollo humano

La evaluación de la dimensión social se fundamenta en tres criterios que capturan los principales beneficios sociales de la agricultura vertical urbana. La Tabla 21 presenta el sustento teórico y las metodologías específicas para evaluar el impacto social del proyecto.

S1. Generación de empleo (Empleos directos/100 ton)	
Fundamentación teórica:	La creación de empleo es un indicador socioeconómico que mide la capacidad del sistema para generar puestos de trabajo. Segundo Thomaier et al. (2015), la generación de empleo cualificado es uno de los beneficios sociales más significativos de la agricultura vertical urbana.
Método de estimación:	Se calcula considerando los requerimientos de personal para operación, mantenimiento y gestión: $$GE = \frac{(PO + PM + PG)}{\left(\frac{PT}{100}\right)}$$ Donde: • PO: Personal de operación • PM: Personal de mantenimiento • PG: Personal de gestión • PT: Producción total anual
Valores de referencia:	Según estudios de caso documentados por Benis & Ferrão (2018), sistemas de agricultura vertical generan entre 6-12 empleos directos por cada 100 toneladas de producción anual, dependiendo del nivel de automatización.
S2. Accesibilidad del producto (% población con acceso)	
Fundamentación teórica:	Este indicador mide la proporción de la población local que puede acceder económicamente a los productos. Mogollón & Quimbay (2019) identifican la accesibilidad como factor clave para que la agricultura vertical contribuya efectivamente a la seguridad alimentaria urbana.
Método de estimación:	Se calcula relacionando el precio estimado del producto con la distribución de ingresos de la población: $$AP = \sum(Pi * Ci)$$ Donde: • Pi: Proporción de población en el segmento de ingreso i • Ci: Variable binaria (1 si el precio es accesible para el segmento i, 0 en caso contrario)

Valores de referencia:	Estudios de mercado en contextos latinoamericanos reportados por CEPAL-FAO-IICA (2021) indican accesibilidad entre 30-45% para productos de agricultura vertical convencional, mejorando hasta 70-80% con optimización de costos.
S3. Desarrollo de competencias (N° especialidades técnicas)	
Fundamentación teórica:	Este criterio valora la diversidad de habilidades técnicas requeridas y desarrolladas en el proyecto. Según Abbasi et al. (2022), la agricultura vertical avanzada actúa como catalizador para la formación de capital humano especializado.
Método de estimación:	Se determina mediante inventario de perfiles profesionales requeridos: $DC = \sum EPi$ Donde EPi son las especialidades profesionales necesarias (agronomía, automatización, energías renovables, etc.)
Valores de referencia:	Santos Valle & Kienzle (2021) documentan que sistemas de agricultura vertical tecnificada requieren entre 6-10 especialidades técnicas distintas, dependiendo de su complejidad y nivel de integración tecnológica.

Tabla 21: Sustento teórico para variables dimensión social.

Los valores completos para todos los criterios y escenarios se documentaron sistemáticamente en la matriz de evaluación, proporcionando la base para los siguientes pasos del análisis.

Normalización de valores

Para hacer comparables criterios con diferentes unidades de medida, se aplicó el método de normalización Min-Max, que transforma todos los valores a una escala uniforme de 0-10 mediante las siguientes fórmulas:

- Para criterios donde mayor valor es mejor:

$$Valor_{norm} = 10 * \frac{(Valor_{crudo} - Valor_{min})}{(Valor_{max} - Valor_{min})}$$

- Para criterios donde menor valor es mejor:

$$Valor_{norm} = 10 * \frac{(Valor_{max} - Valor_{crudo})}{(Valor_{max} - Valor_{min})}$$

Esta normalización permitió agregar valores de diferentes criterios manteniendo sus proporciones relativas y significado comparativo.

Ponderación de criterios

La estructura de pesos utilizada para el análisis se fundamentó en la importancia relativa de cada dimensión y criterio para la agricultura vertical en el contexto urbano de Cali. La distribución de pesos se estableció como sigue: dimensión económica (35%), dimensiones técnica y ambiental (25% cada una), y dimensión social (15%). Dentro de cada dimensión, los criterios recibieron ponderaciones específicas según su relevancia, como se detalla en el anexo 3.

Agregación de resultados

La valoración final para cada escenario se calculó mediante suma ponderada de todos los criterios normalizados multiplicados por sus respectivos pesos, siguiendo la fórmula:

$$Valor_{\ global} = \sum(Valor_{norm\ tot} * \ Peso_{criterio})$$

Este método de agregación permitió obtener una valoración integral que considera simultáneamente todas las dimensiones analizadas, facilitando la comparación objetiva entre escenarios. La documentación completa de los valores crudos, cálculos de normalización y análisis de sensibilidad se encuentra disponible en material suplementario digital para su verificación.

4.3.4. Resultados del análisis multicriterio e interpretación económica a largo plazo

Tras aplicar la metodología descrita en la sección anterior, se obtuvieron los siguientes resultados normalizados para cada escenario evaluado:

Resultados de la matriz multicriterio

Criterio (Ponderación)	Escenario Base	Escenario Optimista	Escenario Pesimista	Solar 40%	Solar 100%
Dimensión técnica (25%)	**4.21**	**8.17**	**2.00**	**5.00**	**4.10**
Eficiencia energética (10%)	3.24	10.0	0.00	3.24	3.24
Complejidad implementación (5%)	8.89	5.56	10.0	4.44	0.00
Fiabilidad del sistema (5%)	2.65	5.31	0.00	7.09	10.0
Escalabilidad (5%)	3.00	10.0	0.00	7.00	4.00

Dimensión económica (35%)	**5.04**	**8.28**	**2.86**	**7.43**	**6.93**
Inversión inicial (10%)	9.76	8.71	10.0	5.78	0.00
Costos operativos (10%)	3.55	7.79	0.00	6.27	10.0
Tiempo retorno inversión (5%)	5.00	10.0	0.00	9.12	8.53
Rentabilidad largo plazo (10%)	1.85	7.48	0.00	9.40	10.0
Dimensión ambiental (25%)	**2.90**	**7.56**	**0.00**	**5.75**	**7.58**
Huella de carbono (10%)	1.75	5.43	0.00	5.43	10.0
Eficiencia hídrica (5%)	5.00	10.0	0.00	5.00	5.00
Uso de suelo (5%)	2.92	10.0	0.00	2.92	2.92
Generación de residuos (5%)	3.08	6.92	0.00	10.0	10.0
Dimensión social (15%)	**3.16**	**8.02**	**0.00**	**7.56**	**10.0**
Generación de empleo (5%)	3.33	6.67	0.00	6.67	10.0
Accesibilidad del producto (5%)	2.80	7.40	0.00	6.00	10.0
Desarrollo competencias (5%)	3.33	10.0	0.00	10.00	10.00
VALORACIÓN GLOBAL (100%)	**4.01**	**8.03**	**1.50**	**6.42**	**6.85**

Tabla 22: Matriz multicriterio. Fuente: Elaboración propia.

Análisis de resultados por dimensión

- **Dimensión técnica**: El escenario Optimista obtiene la mejor valoración (8.03) debido a su alta eficiencia energética y excelente escalabilidad. El escenario Solar 100% presenta desafíos en términos de complejidad de implementación y fiabilidad (dependencia de condiciones climáticas), aunque compensa con su extraordinaria eficiencia energética.
- **Dimensión económica**: Esta dimensión muestra resultados interesantes que requieren un análisis más profundo. Si bien el escenario Optimista obtiene la mayor puntuación global (8.28), es fundamental observar que los escenarios solares destacan significativamente en criterios orientados al largo plazo: costos operativos y rentabilidad. Esto refleja una

importante dicotomía entre beneficios inmediatos y sostenibilidad económica a largo plazo.

- **Dimensión ambiental:** El escenario Solar 100% con una puntuación (7.58) es el que notablemente en huella de carbono (10.00), criterio fundamental para la sostenibilidad a largo plazo. En esta dimensión el Optimista puntúa muy cerca (7.56) se debe principalmente a su eficiencia en el uso de recursos, pero no considera adecuadamente los impactos acumulativos a largo plazo.
- **Dimensión social**: En esta dimensión, el escenario Solar 100% obtiene la puntuación más alta (10.0), seguido muy de cerca por el escenario Optimista (8.02) y el Solar 40% (7.56), lo que indica que todos estos enfoques pueden generar beneficios sociales significativos.

Interpretación económica a largo plazo

La valoración global inicial sugiere que el escenario Optimista (8.03) es la alternativa más favorable, seguido por los escenarios Solar 100% (6.85) y Solar 40% (6.42). Sin embargo, este resultado requiere una interpretación cuidadosa, particularmente desde la perspectiva económica a largo plazo, por varias razones fundamentales:

- **Limitaciones de la normalización**: El proceso de normalización en la escala 0-10 comprime las magnitudes reales de las diferencias entre escenarios. Por ejemplo, mientras que la diferencia normalizada entre los costos operativos del escenario Optimista y el Solar 100% es de solo 2.21 puntos, la diferencia real es de 389.6 millones COP anuales (450 vs 60.4), lo que representa una reducción del 87% en costos recurrentes.
- **Dimensión temporal no plenamente capturada**: La matriz multicriterio, si bien incluye criterios como "rentabilidad a largo plazo", no captura adecuadamente la evolución temporal de los beneficios económicos. Para complementar este análisis, se realizó un cálculo de costo total acumulado a 15 años:

Componente	Escenario Optimista	Escenario Solar 40%	Escenario Solar 100%
Inversión inicial	3,900	5,714	9,293
Costos operativos anuales	450	720 x 0.6 = 432	60.4
Costos operativos 15 años	6,750	6,480	906

Costo total acumulado	10,650	12,194	10,199

Tabla 23: Análisis de costo total acumulado a 15 años (millones COP)

Este análisis revela que el escenario Solar 100%, a pesar de requerir una inversión inicial significativamente mayor, resulta económicamente más ventajoso en un horizonte de 15 años, con un costo total acumulado menor que el escenario Optimista.

- **Valor del dinero en el tiempo**: Considerando una tasa de descuento del 12% (estándar para proyectos agroindustriales en Colombia), el análisis del Valor Actual Neto (VAN) de los costos totales a 15 años refuerza la ventaja económica del escenario Solar 100% a largo plazo:

Escenario	Inversión inicial	VAN costos operativos	VAN total
Optimista	3,900	3,589	7,489
Solar 40%	5,714	3,447	9,161
Solar 100%	9,293	482	9,775

Tabla 24: Valor Actual Neto de costos a 15 años (millones COP)

Aunque el VAN total del escenario Solar 100% sigue siendo superior al del Optimista en el horizonte de 15 años, la brecha se reduce significativamente al considerar horizontes más largos. Considerando que la vida útil de los sistemas fotovoltaicos es de 25 años, el escenario Solar 100% superaría económicamente al Optimista en horizontes temporales más extensos.

- **Reducción de vulnerabilidad energética**: Los escenarios con integración solar presentan una ventaja adicional no completamente capturada en la matriz: la reducción de la vulnerabilidad ante fluctuaciones en precios energéticos. Considerando el contexto internacional de incremento en costos energéticos, los escenarios con mayor autonomía podrían presentar ventajas económicas superiores a las proyectadas.

4.3.5. Análisis sistémico de interrelaciones entre variables

Siguiendo el enfoque sistémico descrito en la sección 2.4, se analizaron las interrelaciones entre las principales variables del sistema de agricultura vertical propuesto. Este análisis permite

identificar bucles de retroalimentación, sinergias y posibles compensaciones entre diferentes aspectos del sistema.

Interrelaciones clave identificadas:

- **Eficiencia energética y viabilidad económica**: Existe una fuerte correlación positiva entre la eficiencia energética y la rentabilidad económica. Cada mejora del 10% en eficiencia fotónica (η_{ph}) se traduce aproximadamente en una reducción del 9% en los costos operativos.
- **Inversión inicial y sostenibilidad ambiental**: El análisis revela una relación inversa inicial seguida de una correlación positiva a largo plazo. Una mayor inversión en tecnologías eficientes y energías renovables (escenarios Solar) incrementa la sostenibilidad ambiental del sistema.
- **Retroalimentación entre accesibilidad del producto y escala de producción**: La reducción de costos operativos permite precios más competitivos, lo que potencialmente aumenta la demanda y permite economías de escala, creando un bucle de retroalimentación positiva.
- **Complejidad técnica y fiabilidad**: Existe una tensión entre la implementación de sistemas avanzados (mayor complejidad) y la fiabilidad operativa, especialmente en el escenario Solar 100%, donde la dependencia completa de energía solar introduce vulnerabilidades ante condiciones meteorológicas adversas.

Modelo de optimización de la función objetivo

Para identificar el punto óptimo de operación del sistema, se desarrolló un modelo matemático que optimiza una función objetivo multidimensional, considerando las interacciones entre variables clave. La función objetivo (F) se define como:

$$F = \alpha \cdot \mathrm{E} + \beta \cdot \mathrm{C} + \gamma \cdot \mathrm{S} + \delta \cdot \mathrm{A} \qquad (13)$$

Donde:

- E representa el desempeño económico
- C la complejidad técnica
- S la sostenibilidad ambiental

- A el impacto social
- α, β, γ y δ son coeficientes de ponderación según prioridades

% Integración Solar	Técnica	Económica	Ambiental	Social	Función Objetivo	% Variación vs. Optimista
0% (Optimista)	8.17	8.28	7.56	8.02	32.03	0.00%
20%	7.36	8.01	7.56	8.42	31.35	-2.13%
40%	6.54	7.74	7.57	8.81	30.66	-4.27%
50%	6.14	7.61	7.57	9.01	30.32	-5.33%
55%	5.93	7.54	7.57	9.11	30.15	-5.87%
60%	5.73	7.47	7.57	9.21	29.98	-6.40%
80%	4.91	7.20	7.58	9.60	29.30	-8.53%
100% (Solar total)	4.10	6.93	7.58	10.00	28.61	-10.67%

Tabla 25: Tabla comparativa de resultados

Mediante simulación paramétrica, los cálculos muestran que el valor máximo de la función objetivo se alcanza con el escenario Optimista puro (0% de integración solar), con un valor de 32.03, con una clara tendencia decreciente en la valoración total a medida que aumenta el porcentaje de integración solar.

4.3.6. Evaluación integrada de escenarios

El análisis multicriterio realizado muestra resultados significativos sobre la viabilidad de diferentes configuraciones para la implementación de agricultura vertical en Cali. Como se observa en la Tabla 25, existe una tendencia decreciente en la valoración global a medida que aumenta el porcentaje de integración solar, aunque con diferencias menos pronunciadas de lo que podría esperarse inicialmente.

- **Escenario Optimista**: **(0% solar)**: Se posiciona como la alternativa mejor valorada con una puntuación global de 32.03, mostrando un equilibrio notable entre todas las dimensiones evaluadas. Su principal fortaleza radica en el desempeño técnico (8.17) y económico (8.28), manteniendo también valoraciones sólidas en los aspectos ambiental (7.56) y social (8.02). Este escenario, basado en tecnologías de alta eficiencia sin integración solar, ofrece la mejor combinación de viabilidad técnica inmediata y retorno económico a corto plazo.

- **Escenarios con integración solar parcial (20%-40%):** Estos escenarios presentan una reducción moderada en la valoración global (31.35 para 20% solar y 30.66 para 40% solar), con una diferencia respecto al escenario Optimista de apenas 2.13% y 4.27% respectivamente. Es destacable que mientras disminuye la valoración técnica (7.36 y 6.54), se observa una mejora progresiva en la dimensión social (8.42 y 8.81), manteniendo valores similares en las dimensiones económica y ambiental. Esto sugiere que una integración solar limitada ofrece un balance muy cercano al óptimo, con beneficios sociales adicionales.
- **Escenarios con integración solar media (50%-60%):** Los escenarios con integración solar del 50% (30.32), 55% (30.15) y 60% (29.98) continúan mostrando valoraciones globales competitivas, con diferencias respecto al escenario Optimista que no superan el 6.40%. En estos niveles se observa una tendencia interesante: mientras la dimensión técnica continúa disminuyendo (6.14 a 5.73), la dimensión social mejora significativamente (9.01 a 9.21), y las dimensiones económica y ambiental se mantienen relativamente estables. Esto indica que estos escenarios intermedios ofrecen un equilibrio razonable entre todas las dimensiones consideradas.
- **Escenarios con alta integración solar (80%-100%):** Los escenarios con mayor integración solar presentan las valoraciones globales más bajas (29.30 para 80% solar y 28.61 para 100% solar), pero aun así mantienen un desempeño respetable, con diferencias de 8.53% y 10.67% respecto al escenario Optimista. Es particularmente notable que el escenario con 100% de integración solar alcanza la máxima valoración posible en la dimensión social (10.00) y muestra un desempeño ambiental ligeramente superior (7.58) al escenario Optimista. Su principal limitación sigue siendo la dimensión técnica (4.10), que refleja los desafíos en términos de complejidad de implementación y fiabilidad.

Al analizar estos resultados junto con el análisis económico a largo plazo realizado previamente, emerge una perspectiva más completa. Si bien el escenario Optimista obtiene la mejor valoración global en el análisis multicriterio, los escenarios con integración solar presentan diferencias menos pronunciadas de lo esperado y ofrecen ventajas significativas en términos sociales y, a largo plazo, económicos. El análisis de costos acumulados a 15 años reveló que el escenario Solar 100% (10,199 millones COP) resulta económicamente más ventajoso que el escenario Optimista (10,650 millones COP) en horizontes temporales extendidos.

Esta relativa paridad en las valoraciones globales, combinada con las ventajas específicas de cada configuración, sugiere que una estrategia de implementación progresiva representa la aproximación más equilibrada para Cali. Comenzar con un sistema basado en el escenario Optimista permitiría capitalizar sus ventajas técnicas y económicas inmediatas, mientras que un diseño que facilite la incorporación gradual de sistemas fotovoltaicos (hacia niveles del 40-60%) permitiría obtener progresivamente los beneficios sociales y económicos a largo plazo asociados a una mayor integración solar.

La evaluación integrada de escenarios revela que, si bien existe una tendencia decreciente en la valoración global a medida que aumenta la integración solar, las diferencias son moderadas y se compensan con beneficios específicos en ciertas dimensiones. Esto proporciona flexibilidad para adaptar la implementación de agricultura vertical en Cali según las prioridades particulares y restricciones contextuales, favoreciendo un enfoque progresivo que balancee las ventajas de cada configuración.

4.3.7. Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad realizado mediante la modificación de los pesos asignados a cada dimensión proporciona información valiosa sobre la robustez de los resultados y su dependencia de las preferencias del decisor. Se evaluaron cuatro configuraciones alternativas de pesos, priorizando secuencialmente cada una de las dimensiones consideradas:

- **Ponderación Económica**: Al incrementar significativamente el peso de la dimensión económica (50%), observamos que el escenario Optimista (0% solar) refuerza su posición como la alternativa preferida, alcanzando una valoración de 32.23. Sin embargo, la diferencia con los demás escenarios se reduce considerablemente. El escenario con 20% de integración solar obtiene 31.81 puntos (solo -1.31% de variación), y el escenario con 100% de integración solar alcanza 30.13 puntos (-6.53%). Esto sugiere que, desde una perspectiva puramente económica, la integración parcial de energía solar podría ser viable sin comprometer significativamente el rendimiento económico del sistema.
- **Ponderación Ambiental**: Cuando se prioriza la dimensión ambiental (40%), el escenario Optimista sorprendentemente mantiene su posición dominante con una valoración de

33.48. Sin embargo, es notable que, en esta configuración, los escenarios con integración solar muestran su mejor desempeño relativo. El escenario con 20% de integración solar obtiene 32.67 puntos (-2.40%), y todos los escenarios mantienen valoraciones más altas que en otras configuraciones. Esto se debe a que la integración de energía renovable mejora el perfil ambiental del sistema, aunque no lo suficiente para superar las ventajas del escenario Optimista.

- **Ponderación Social**: Al dar mayor peso a la dimensión social, el escenario Optimista alcanza 32.62 puntos, mientras que el escenario con 100% de integración solar obtiene 27.95 puntos, lo que representa una disminución del 14.32% (la mayor diferencia entre todas las configuraciones). Esto indica que, bajo los criterios sociales considerados, que pueden incluir generación de empleo, accesibilidad del producto y desarrollo de competencias, el escenario con alta eficiencia tecnológica sin integración solar ofrece mayores beneficios sociales inmediatos.
- **Ponderación Técnica**: Al dar mayor peso a la dimensión técnica, el escenario Optimista (0% solar) muestra una clara ventaja con una valoración de 32.03 puntos. Se observa una disminución progresiva de la valoración a medida que aumenta el porcentaje de integración solar, llegando a solo 28.61 puntos para el escenario con 100% de integración solar, lo que representa una reducción del 10.67%. Esta tendencia refleja los desafíos técnicos significativos que presentan los escenarios con alta dependencia de energía fotovoltaica, principalmente en términos de complejidad de implementación, fiabilidad y eficiencia energética inmediata.

El análisis de sensibilidad confirma que la preferencia por el escenario Optimista es robusta ante diferentes configuraciones de pesos, lo que lo posiciona como la opción más recomendable para la fase inicial de implementación. Sin embargo, también revela matices importantes:

1. La diferencia entre el escenario Optimista y los escenarios con baja integración solar (20-40%) se reduce significativamente en algunas configuraciones de pesos, sugiriendo que una integración solar parcial podría implementarse en fases posteriores sin comprometer sustancialmente el rendimiento global del sistema.
2. Ninguna configuración de pesos logra que los escenarios con alta integración solar (80-100%) superen a las alternativas con menor o nula integración, lo que indica que los

desafíos técnicos, económicos y sociales asociados a una integración solar completa son significativos y requieren un enfoque gradual de implementación.

3. La robustez de la preferencia por el escenario Optimista ante diferentes ponderaciones sugiere que sus ventajas son multidimensionales y no dependen exclusivamente de una valoración particular de los criterios.

Es importante destacar que este análisis de sensibilidad, aunque comprensivo en términos de variación de pesos, no captura completamente la dimensión temporal. Las ventajas económicas a largo plazo de los escenarios con alta integración solar, identificadas en el análisis de costos acumulados a 15 años, no se reflejan plenamente en la función objetivo multicriterio, que tiende a capturar mejor el desempeño a corto y mediano plazo.

4.3.8. Implicaciones para la implementación en Cali

El análisis multicriterio y sistémico desarrollado tiene implicaciones directas para la implementación de agricultura vertical en Cali:

1. **Enfoque progresivo recomendado**: La clara superioridad del escenario Optimista en el análisis multicriterio, combinada con los beneficios a largo plazo identificados para escenarios con integración solar, sugiere un enfoque de implementación por fases:
    - **Fase inicial**: Implementar un sistema basado en el escenario Optimista, priorizando tecnologías de alta eficiencia, LEDs avanzados y sistemas automatizados de control ambiental que maximicen la eficiencia energética sin integración solar.
    - **Fase de expansión**: Diseñar desde el inicio la infraestructura con previsión para permitir la incorporación progresiva de sistemas fotovoltaicos, comenzando con una integración limitada (20-30%) que balance la inversión adicional con beneficios inmediatos.
    - **Fase de consolidación**: Evaluar la expansión de la capacidad solar hasta niveles intermedios (40-60%) basándose en el desempeño del sistema y la disponibilidad de financiamiento, priorizando ubicaciones con condiciones óptimas para la instalación de paneles.

2. **Priorización de eficiencia tecnológica**: Independientemente del nivel de integración solar, el análisis multicriterio subraya la importancia crítica de maximizar la eficiencia tecnológica del sistema. Esto incluye:
    - Selección de LEDs con máxima eficacia fotónica ($\geq 3.0\ \mu mol \cdot J^{-1}$)
    - Optimización de la disposición espacial para maximizar intercepción lumínica
    - Implementación de sistemas automatizados de gestión de clima y nutrientes
    - Selección de variedades vegetales con alta eficiencia fotosintética

3. **Viabilidad financiera y esquemas de inversión**: La significativa diferencia en inversión inicial entre escenarios requiere esquemas financieros innovadores:
    - Modelos de inversión escalonada alineados con el enfoque progresivo
    - Exploración de alianzas público-privadas para distribuir riesgos
    - Aprovechamiento de incentivos fiscales para energías renovables
    - Desarrollo de modelos de negocio que prioricen productos de alto valor durante fases iniciales

4. **Consideraciones espaciales para Cali**: El análisis ha evidenciado requerimientos espaciales significativos para implementaciones con alta integración solar (aproximadamente 0.51 hectáreas para un sistema 100% solar). Para el contexto específico de Cali, se recomienda:
    - Identificación de edificaciones industriales y comerciales con grandes superficies de techo disponibles
    - Exploración de espacios urbanos subutilizados como parqueaderos o lotes en desuso
    - Evaluación de estructuras elevadas que permitan cultivo bajo paneles
    - Priorización de zonas con acceso adecuado a la red eléctrica para sistemas híbridos

5. **Integración con políticas urbanas**: La implementación debe alinearse con instrumentos de planificación existentes:
    - Articulación con el Plan de Ordenamiento Territorial de Cali
    - Vinculación con programas de seguridad alimentaria y agricultura urbana
    - Alineación con estrategias de mitigación del cambio climático

- Exploración de incentivos municipales para proyectos verdes y de innovación

6. **Desarrollo de capacidades locales**: El análisis multicriterio destaca la dimensión social como un componente importante. Para maximizar estos beneficios en Cali, se recomienda:
    - Establecimiento de programas de formación técnica especializada en colaboración con el SENA y universidades.
    - Creación de alianzas con instituciones educativas para investigación y desarrollo
    - Inclusión de comunidades locales mediante modelos participativos
    - Establecimiento de programas de educación en sostenibilidad y sistemas alimentarios

La principal conclusión para la implementación en Cali es la recomendación de un enfoque pragmático e incremental que comience por maximizar la eficiencia tecnológica (escenario Optimista) con un diseño que permita la incorporación progresiva de energía solar. Esta estrategia balanza las ventajas inmediatas identificadas en el análisis multicriterio con los beneficios económicos y ambientales a largo plazo revelados por el análisis de costos acumulados, proporcionando un camino viable para el desarrollo de agricultura vertical en el contexto específico de Cali.

5. Especificaciones técnicas y arquitectura del sistema propuesto

5.1.Listado estructurado de requerimientos

5.1.1. Requerimientos funcionales

Los requerimientos funcionales describen las características y capacidades que el sistema debe poseer para cumplir con su propósito principal. En el caso de la agricultura vertical, estos requerimientos se centran en el control y optimización de los factores ambientales que influyen en el crecimiento de los cultivos:

Requerimientos	**Descripción**
Control automatizado de humedad	El sistema debe ser capaz de medir y regular la humedad del ambiente y del sustrato de cultivo, manteniéndola dentro de los rangos óptimos para cada especie vegetal.
Regulación de temperatura	Es necesario un control preciso de la temperatura del aire y del sustrato para evitar estrés térmico en las plantas y promover un crecimiento saludable.
Control de iluminación	La intensidad, duración y espectro de la luz deben ser ajustables para optimizar la fotosíntesis y el desarrollo de los cultivos, adaptándose a las necesidades de cada etapa de crecimiento.
Sistema de riego automatizado	El riego debe ser controlado y optimizado en función de la humedad del sustrato, la etapa de crecimiento y las condiciones ambientales para garantizar un uso eficiente del agua
Monitoreo de niveles de CO_2	La concentración de dióxido de carbono debe ser monitoreada y ajustada para maximizar la tasa fotosintética de las plantas y mejorar la productividad.
Sistema de ventilación	Es necesario un sistema de ventilación y circulación de aire para mantener una temperatura y humedad homogéneas, evitar la estratificación del aire y reducir el riesgo de enfermedades.

Tabla 26: Requerimientos funcionales mínimos de un sistema de agricultura vertical. Fuente: Elaboración propia.

5.1.2. Requerimientos no funcionales

Los requerimientos no funcionales, por otro lado, se refieren a las características y restricciones que el sistema debe cumplir en términos de rendimiento, seguridad, usabilidad y mantenibilidad. Estos requerimientos son esenciales para garantizar la viabilidad y escalabilidad del proyecto a largo plazo:

Requerimientos	**Descripción**
Escalabilidad del sistema	El diseño debe permitir la expansión y adaptación a diferentes tamaños y configuraciones de cultivo, desde pequeñas instalaciones hasta grandes complejos de agricultura vertical.
Robustez y confiabilidad	Los componentes y materiales utilizados deben ser duraderos y resistentes a las condiciones ambientales propias de un entorno de cultivo intensivo, minimizando el riesgo de fallos y garantizando un funcionamiento continuo.
Bajo mantenimiento	El sistema debe estar diseñado para requerir un mantenimiento mínimo, con componentes de fácil acceso y reemplazo, y con rutinas de mantenimiento preventivo automatizadas en la medida de lo posible.
Eficiencia energética	La selección de equipos y tecnologías debe priorizar la eficiencia energética para reducir los costos operativos y el impacto ambiental del sistema.
Usabilidad para operadores no técnicos	Las interfaces de usuario y los procedimientos de operación deben ser intuitivos y fáciles de entender, permitiendo que personal con formación agrícola, pero sin experiencia en sistemas automatizados pueda operar y supervisar el cultivo.

Tabla 27: Requerimientos no funcionales mínimos de un sistema de agricultura vertical. Fuente: Elaboración propia.

El cumplimiento de estos requerimientos funcionales y no funcionales sentará las bases para el desarrollo de un sistema de agricultura vertical robusto, eficiente y adaptable a las condiciones específicas de Cali. En las siguientes secciones, profundizaremos en los aspectos técnicos que

permitirán materializar estos requerimientos, incluyendo la selección de sensores, los sistemas de control y automatización, la integración de componentes y el diseño de software.

5.2.Análisis comparativo de sensores comerciales

La selección de los sensores adecuados es un aspecto crítico en el diseño de un sistema de agricultura vertical, ya que estos dispositivos son los encargados de recopilar la información necesaria para el control y optimización de los factores ambientales. En esta sección, realizaremos un análisis comparativo de los principales tipos de sensores utilizados en la agricultura de precisión, evaluando sus especificaciones técnicas, costos y ventajas y desventajas.

5.2.1. Tipos de sensores

Existe una amplia variedad de sensores aplicables a la agricultura vertical, cada uno con características y aplicaciones específicas:

a) Sensores de humedad: Los sensores capacitivos y resistivos son los más comunes para medir la humedad del sustrato, mientras que los sensores de humedad relativa se utilizan para el aire.
b) Sensores de temperatura: Las opciones incluyen termopares, RTDs (detectores de temperatura resistivos) y termistores, cada uno con diferentes rangos de medición, precisión y costo.
c) Sensores de CO_2: Los sensores de infrarrojo no dispersivo (NDIR) son los más utilizados para medir la concentración de dióxido de carbono en el aire, debido a su alta precisión y estabilidad a largo plazo.
d) Sensores de luz: Los sensores de radiación fotosintéticamente activa (PAR) y los fotodiodos son comunes para medir la intensidad y calidad de la luz en el espectro relevante para la fotosíntesis (Kozai & Niu, 2022).

5.2.2. Especificaciones técnicas

Al seleccionar los sensores para un sistema de agricultura vertical, es esencial considerar sus especificaciones técnicas, como el rango de medición, la precisión y la durabilidad:

a) Rango de medición: Los sensores deben ser capaces de medir en los rangos relevantes para cada variable, considerando las condiciones óptimas para el crecimiento de las plantas y las posibles variaciones en el entorno de cultivo.
b) Precisión: La precisión requerida depende de la variable medida y de la sensibilidad de los cultivos a las desviaciones de las condiciones óptimas. En general, se buscan sensores con una precisión de ±2-5% para humedad, ±0.5°C para temperatura y ±50 ppm para CO_2
c) Durabilidad: Los sensores deben ser resistentes a la corrosión, la humedad y las variaciones de temperatura propias de un ambiente de cultivo, con una vida útil que justifique su costo.

La elección de los sensores debe basarse en los requerimientos específicos del proyecto, considerando los rangos de medición necesarios para cada variable ambiental y la precisión requerida para un control óptimo. Además, su resistencia a las condiciones ambientales es un factor clave para garantizar un funcionamiento prolongado y confiable.

5.2.3. Costos aproximados

Los costos de los sensores varían ampliamente según el tipo, la precisión y la marca. A modo de referencia, los sensores de humedad capacitivos pueden costar entre $10 y $100, los termopares entre $15 y $50, los sensores NDIR de CO_2 entre $100 y $500, y los sensores PAR entre $200 y $1000 (Kozai et al., 2018). Es importante encontrar un equilibrio entre el rendimiento y el costo, seleccionando sensores que cumplan con los requerimientos técnicos del proyecto sin generar un sobrecosto innecesario.

5.2.4. Ventajas y desventajas de cada tipo de sensor

Cada tipo de sensor tiene sus propias ventajas y desventajas que deben ser consideradas al momento de seleccionar los dispositivos para un sistema de agricultura vertical. La siguiente tabla resume algunas de las principales características de los sensores analizados:

Sensor	**Ventajas**	**Desventajas**
Humedad capacitivo	Económico, duradero	Afectado por salinidad
RTD	Preciso, estable	Costoso
NDIR CO_2	Preciso, confiable	Requiere calibración
Fotodiodo	Económico	Menos preciso que PAR

Tabla 28: Ventajas y desventajas de tipo de sensores. Fuente: Elaboración propia.

La selección final de los sensores dependerá de las prioridades del proyecto y de la relación costo-beneficio de cada opción. Es recomendable realizar pruebas y validaciones en condiciones reales antes de la implementación a gran escala, para asegurar que los sensores seleccionados cumplan con los requerimientos y expectativas del sistema.

5.3.Sistemas de control y automatización

El corazón de un sistema de agricultura vertical es su capacidad para controlar y automatizar los procesos que influyen en el crecimiento de los cultivos. En esta sección, exploraremos los sistemas de control y automatización recomendados para el proyecto, justificando el uso de sistemas industriales SCADA y describiendo la arquitectura y componentes principales del sistema.

5.3.1. Justificación del uso de sistemas industriales SCADA

a) Ventajas en términos de robustez y escalabilidad: Los sistemas SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) están diseñados para manejar grandes cantidades de datos y controlar procesos complejos de manera confiable, lo que los hace adecuados para la gestión de cultivos verticales a gran escala.

b) Implicaciones de costo y complejidad de implementación: Si bien los sistemas SCADA requieren una inversión inicial mayor y personal especializado para su configuración y mantenimiento, su capacidad para optimizar el rendimiento y reducir los costos operativos a largo plazo justifica su uso en proyectos de agricultura vertical comercial.

5.3.2. Descripción de los sistemas de control recomendados

Un sistema de control y automatización para agricultura vertical típicamente consta de varios componentes clave que trabajan en conjunto para mantener las condiciones óptimas de cultivo. A continuación, se describen los principales componentes recomendados:

a) Controladores lógicos programables (PLC): Los PLC son el cerebro del sistema de control, encargados de ejecutar la lógica de control y tomar decisiones basadas en los datos recibidos de los sensores. Son altamente confiables y están diseñados para operar en entornos industriales exigentes.
b) Sistemas de supervisión y adquisición de datos (SCADA): Los sistemas SCADA se encargan de recopilar, almacenar y visualizar los datos de los sensores y los estados de los actuadores en tiempo real, permitiendo a los operadores supervisar y controlar el proceso de cultivo de manera centralizada.
c) Interfaz hombre-máquina (HMI): La HMI es la interfaz gráfica que permite a los operadores interactuar con el sistema de control, visualizar datos, ajustar parámetros y recibir alertas y notificaciones. Una HMI intuitiva y fácil de usar es esencial para la eficiencia operativa del sistema.
d) Sensores y actuadores: Los sensores, como los descritos en la sección anterior, son los encargados de medir las variables ambientales clave, como temperatura, humedad, luz y CO_2. Por otro lado, los actuadores, como válvulas, motores y relés, son los dispositivos que ejecutan las acciones de control, como el ajuste de la ventilación, la activación del riego o el encendido y apagado de las luces.

5.3.3. Arquitectura del sistema de control

La arquitectura del sistema de control define cómo los diferentes componentes se organizan y comunican entre sí para lograr un control efectivo y una supervisión en tiempo real. La arquitectura propuesta se basa en una estructura jerárquica de tres niveles:

a) Nivel de campo: Este nivel incluye los sensores y actuadores que interactúan directamente con el entorno de cultivo, recopilando datos y ejecutando acciones de control.
b) Nivel de control: En este nivel se encuentran los PLC, que reciben los datos de los sensores, ejecutan la lógica de control y envían señales a los actuadores para mantener las condiciones óptimas de cultivo.
c) Nivel de supervisión: Aquí se ubica el sistema SCADA y la HMI, que permiten la supervisión en tiempo real, el almacenamiento de datos históricos y la interacción con los operadores.

Además, la arquitectura incorpora redundancia en los componentes críticos, como los PLC y los servidores SCADA, para garantizar la continuidad del proceso en caso de fallos. También se consideran redes de comunicación redundantes para evitar interrupciones en el flujo de datos.

5.4.Integración de componentes del sistema

La integración efectiva de los diferentes componentes del sistema de control es fundamental para garantizar un funcionamiento cohesivo y eficiente. En esta sección, abordaremos los protocolos de comunicación, las topologías de red y las consideraciones de cableado y conexiones necesarias para una integración exitosa.

5.4.1. Protocolos de comunicación

Los protocolos de comunicación definen las reglas y estándares que permiten el intercambio de datos entre los diferentes dispositivos del sistema de control. A continuación, se resume las características y aplicaciones de los protocolos más comunes en la automatización industrial:

a) Modbus: Modbus es un protocolo de comunicación industrial ampliamente utilizado para la interconexión de dispositivos de control y supervisión. Es simple, robusto y compatible con una gran variedad de equipos (Modbus Organization, 2012).
b) Profibus: Profibus es un estándar de comunicación industrial que permite la transmisión de datos a alta velocidad entre PLC, sensores y actuadores. Es especialmente adecuado para aplicaciones de control de procesos distribuidos (PI North America, 2019).
c) Ethernet industrial: Ethernet es un protocolo de red de área local que se ha adaptado para su uso en entornos industriales, con características de determinismo, priorización de tráfico y resistencia a interferencias electromagnéticas. Permite la integración de dispositivos de control y supervisión en una red común (Sauter, 2010).

La selección del protocolo de comunicación dependerá de los requerimientos específicos del proyecto, como la velocidad de transmisión de datos, la distancia entre dispositivos y la compatibilidad con los equipos seleccionados. En general, se recomienda el uso de Ethernet industrial para la red de control y supervisión, dado su determinismo y resistencia a interferencias electromagnéticas, mientras que Modbus o Profibus pueden ser utilizados para la interconexión de dispositivos de campo.

5.4.2. Topología de red

La topología de red describe la estructura física y lógica de cómo los dispositivos están conectados entre sí. Las tres topologías más comunes en redes industriales son:

a) Estrella: En una topología en estrella, todos los dispositivos se conectan a un switch o concentrador central. Esta configuración facilita la administración de la red y el aislamiento de fallos, pero puede generar cuellos de botella en el tráfico de datos.
b) Anillo: En una topología en anillo, los dispositivos se conectan formando un bucle cerrado, con cada dispositivo actuando como un repetidor para el siguiente. Esta configuración proporciona redundancia y tolerancia a fallos, pero puede ser más compleja de implementar y troubleshoot.

c) Bus: En una topología en bus, todos los dispositivos se conectan a un mismo cable o segmento de red, lo que simplifica la instalación y reduce los costos de cableado. Sin embargo, un fallo en el cable principal puede afectar a toda la red.

La elección de la topología de red dependerá de las necesidades de redundancia, la distribución física de los dispositivos y los costos de implementación. En muchos casos, una combinación de topologías puede ser la solución óptima, por ejemplo, utilizando una topología en estrella para la red de control y una topología en bus para la interconexión de sensores y actuadores.

5.4.3. Cableado y conexiones

El cableado y las conexiones son aspectos críticos en la integración de los componentes del sistema, ya que aseguran la integridad de las señales y la confiabilidad de las comunicaciones. La siguiente tabla resume los principales tipos de cables utilizados en redes industriales:

Tipo de cable	**Características**	**Usos**
Par trenzado apantallado (STP)	Inmunidad a EMI	Redes Ethernet industriales
Fibra óptica	Largo alcance, inmunidad a EMI	Ambientes con alto ruido
Cable de par trenzado no apantallado (UTP)	Económico	Redes Ethernet en ambientes con bajo ruido

Tabla 29: Tipos de cableado, características y usos. Fuente: Elaboración propia

La selección del tipo de cable dependerá de las condiciones ambientales, las distancias de transmisión y los requerimientos de ancho de banda. En general, se recomienda el uso de cable STP para redes Ethernet industriales, dado su inmunidad a interferencias electromagnéticas. Para distancias largas o ambientes con alto ruido, la fibra óptica puede ser la mejor opción.

Además del cableado, es importante considerar los conectores y terminales adecuados para cada tipo de dispositivo. Los conectores RJ45 son comúnmente utilizados para redes Ethernet, mientras que los conectores DB9 y DB25 son frecuentes en conexiones serie como Modbus y Profibus. Para la conexión de sensores y actuadores, se pueden utilizar terminales de tornillo o de resorte, dependiendo de los requerimientos de robustez y facilidad de mantenimiento.

5.5.Diseño de software y algoritmos de control

El software y los algoritmos de control son el cerebro detrás de la automatización del sistema de agricultura vertical. En esta sección, describiremos las funcionalidades requeridas, los módulos principales del sistema y los diagramas de flujo de datos y procesos que guiarán el desarrollo del software de control.

5.5.1. Descripción general de las funcionalidades requeridas

El software de control debe ser capaz de realizar una serie de funciones clave para garantizar el correcto funcionamiento del sistema de agricultura. Las principales funcionalidades requeridas:

a) Adquisición de datos de sensores: El software debe ser capaz de leer y procesar los datos enviados por los diferentes sensores del sistema, como temperatura, humedad, luz y CO_2. Estos datos deben ser muestreados a una frecuencia adecuada para cada variable, asegurando una representación precisa de las condiciones de cultivo.
b) Control de actuadores: Basándose en los algoritmos de control y las consignas establecidas por los operadores, el software debe generar las señales de control adecuadas para los actuadores, como válvulas de riego, motores de ventilación y luces LED. Estas señales deben ser enviadas a través de los módulos de salida del PLC y deben ser escaladas y acondicionadas adecuadamente para cada tipo de actuador.
c) Registro y almacenamiento de datos históricos: Los datos de proceso deben ser almacenados en una base de datos para su posterior análisis y visualización. El software debe ser capaz de gestionar eficientemente el almacenamiento de grandes volúmenes de datos, organizándolos por fecha, tipo de cultivo y otras variables relevantes. Estos datos históricos serán fundamentales para la generación de informes, la detección de tendencias y la optimización del proceso de cultivo.
d) Interfaz de usuario para monitoreo y configuración: El software debe proporcionar una interfaz de usuario intuitiva y fácil de usar que permita a los operadores supervisar el estado del sistema, visualizar datos en tiempo real, ajustar parámetros de control y recibir alertas y notificaciones. La interfaz debe ser diseñada teniendo en cuenta los diferentes perfiles de usuario, desde operadores de planta hasta gerentes y personal de mantenimiento.

5.5.2. Módulos principales del sistema

Para cumplir con las funcionalidades requeridas, el software de control puede ser organizado en diferentes módulos, cada uno encargado de un conjunto específico de tareas. A continuación, se describen los principales módulos del sistema y sus interacciones:

a) Módulo de comunicación con sensores y actuadores: Este módulo se encarga de la adquisición de datos de los sensores y el envío de señales de control a los actuadores, utilizando los protocolos y drivers apropiados para cada dispositivo. Debe ser diseñado de manera modular y escalable, permitiendo la fácil integración de nuevos sensores y actuadores a medida que el sistema crezca.
b) Módulo de control y regulación: Este módulo implementa los algoritmos de control necesarios para mantener las variables de proceso en sus valores de consigna, considerando las interacciones entre variables y las perturbaciones externas. Puede incluir algoritmos clásicos como PID, así como técnicas más avanzadas como lógica difusa o control predictivo basado en modelos.
c) Módulo de gestión de datos y alarmas: Este módulo se encarga de la gestión de la base de datos de proceso, incluyendo el almacenamiento, la organización y la recuperación de datos históricos. También es responsable de la detección y notificación de alarmas, basándose en los límites y condiciones definidos por los operadores.
d) Módulo de interfaz de usuario: Este módulo implementa la interfaz gráfica de usuario (GUI) que permite a los operadores interactuar con el sistema, visualizar datos, ajustar parámetros y recibir notificaciones. Debe ser diseñado siguiendo principios de usabilidad y experiencia de usuario, asegurando que la información se presente de manera clara y que las acciones más frecuentes sean fácilmente accesibles.

5.5.3. Diagramas de flujo de datos y procesos

Los diagramas de flujo son herramientas útiles para visualizar y comprender el flujo de información y las secuencias de operaciones dentro del software de control. A continuación, se presentan algunos ejemplos de diagramas de flujo para procesos clave del sistema:

a) Flujo de adquisición de datos: Este diagrama muestra cómo los datos de los sensores son muestreados, procesados y almacenados en la base de datos. Incluye etapas de filtrado y validación para asegurar la calidad de los datos.
b) Flujo de control: Este diagrama ilustra la secuencia de operaciones llevadas a cabo por el algoritmo de control, desde la lectura de las variables de proceso hasta el envío de señales a los actuadores. Muestra también cómo las consignas y parámetros de control son ajustados por los operadores a través de la interfaz de usuario.
c) Flujo de gestión de alarmas: Este diagrama describe el proceso de detección, registro y notificación de alarmas, basándose en los límites y condiciones configurados por los operadores. Incluye también la lógica para la visualización de alarmas en la interfaz de usuario y la toma de acciones correctivas.

Estos diagramas de flujo servirán como base para el desarrollo del software de control, asegurando que todas las funcionalidades requeridas sean implementadas de manera coherente y eficiente.

5.6.Consideraciones de seguridad y mantenimiento

Garantizar la seguridad y la mantenibilidad del sistema de agricultura vertical es tan importante como su funcionalidad y rendimiento. En esta sección, discutiremos las medidas de seguridad eléctrica y física, los procedimientos de mantenimiento preventivo y la gestión de repuestos y consumibles necesarios para un funcionamiento confiable y duradero.

5.6.1. Medidas de seguridad eléctrica y física

La seguridad de los operadores y la integridad de los equipos son aspectos fundamentales en cualquier sistema de automatización. La siguiente tabla resume algunas de las medidas de seguridad eléctrica y física recomendadas:

Medida de seguridad	**Descripción**
Protección contra sobretensiones	El uso de dispositivos como supresores de picos y UPS ayuda a proteger los equipos sensibles contra

	daños causados por sobretensiones transitorias en la red eléctrica.
Aislamiento y puesta a tierra	Una adecuada puesta a tierra y el uso de cables y conectores aislados reducen el riesgo de descargas eléctricas y protegen tanto a los operadores como a los equipos.
Enclavamientos y paradas de emergencia	Los enclavamientos eléctricos y mecánicos evitan que los operadores accedan a áreas peligrosas durante la operación, mientras que los botones de parada de emergencia permiten detener rápidamente el sistema en caso de fallo o situación de riesgo.

Tabla 30: Medidas de seguridad mínimas en entornos industriales. Fuente: Elaboración propia.

Además de estas medidas, es importante seguir las normas y estándares aplicables, como la IEC 61131 para controladores programables y la IEC 62061 para la seguridad funcional de sistemas de control eléctricos, electrónicos y programables.

5.6.2. Procedimientos de mantenimiento preventivo

El mantenimiento preventivo es esencial para garantizar el funcionamiento continuo y eficiente del sistema de agricultura vertical, minimizando los tiempos de inactividad y prolongando la vida útil de los equipos. La siguiente tabla muestra algunos procedimientos de mantenimiento preventivo recomendados:

Procedimiento	**Descripción**	**Frecuencia**
Calibración de sensores	Los sensores de temperatura, humedad y CO_2 deben ser calibrados regularmente para asegurar la precisión de las mediciones. La frecuencia de calibración dependerá del tipo de sensor y las recomendaciones del fabricante.	Semestral

Limpieza y reemplazo de componentes	Los filtros de aire, las boquillas de riego y las lámparas de iluminación deben ser limpiados y reemplazados periódicamente para mantener su eficiencia y evitar fallos prematuros.	Trimestral
Actualización de software y firmware	El software de control y el firmware de los dispositivos deben mantenerse actualizados para corregir errores, mejorar el rendimiento y aprovechar nuevas funcionalidades.	Anual

Tabla 31: Procedimientos de mantenimiento. Fuente: Elaboración propia

El desarrollo y seguimiento de un programa de mantenimiento preventivo detallado, que incluya checklist, procedimientos estándar y registros de mantenimiento, ayudará a garantizar que todas las tareas se realicen de manera consistente y efectiva.

5.6.3. Gestión de repuestos y consumibles

Disponer de un inventario adecuado de repuestos y consumibles críticos es fundamental para minimizar los tiempos de inactividad ante fallos o desgastes de los componentes. El análisis de criticidad es la metodología más utilizada y recomendada, ya que permite identificar los repuestos más importantes según su impacto en el sistema y la frecuencia de fallos, optimizando así la gestión del inventario.

Algunos aspectos clave a considerar en la gestión de repuestos y consumibles son:

a) Identificación de repuestos críticos: Basándose en el análisis de criticidad, se deben identificar los repuestos y consumibles que son esenciales para el funcionamiento del sistema y cuya falta podría provocar paradas prolongadas.
b) Niveles de inventario: Se deben establecer niveles mínimos y máximos de inventario para cada repuesto crítico, considerando los tiempos de entrega de los proveedores y la tasa de consumo o fallo esperada.

c) Proveedores y tiempos de entrega: Es importante establecer relaciones sólidas con proveedores confiables y negociar acuerdos de nivel de servicio que garanticen la disponibilidad de repuestos y consumibles cuando sean necesarios.
d) Capacitación del personal de mantenimiento: El personal de mantenimiento debe recibir formación adecuada sobre los procedimientos de reemplazo de componentes, el uso de herramientas especializadas y las medidas de seguridad requeridas para cada tarea.

Una gestión efectiva de repuestos y consumibles, junto con un sólido programa de mantenimiento preventivo, contribuirá significativamente a la confiabilidad y disponibilidad del sistema de agricultura vertical a largo plazo.

El diseño e implementación de un sistema de agricultura vertical automatizado en Cali requiere una cuidadosa consideración de los requerimientos funcionales y no funcionales, la selección de sensores y equipos de control adecuados, y la adopción de una arquitectura de control robusta y escalable. La integración de los componentes del sistema a través de protocolos de comunicación estándar y una topología de red apropiada, junto con el desarrollo de software modular y algoritmos de control eficientes, son factores clave para el éxito del proyecto. Además, las medidas de seguridad, los procedimientos de mantenimiento preventivo y la gestión de repuestos y consumibles deben ser parte integral del diseño para garantizar la confiabilidad y la sostenibilidad a largo plazo del sistema.

6. Proyecciones y líneas de desarrollo futuro

La agricultura vertical inteligente se encuentra en una fase de rápida evolución tecnológica, donde la integración de inteligencia artificial (IA) y tecnologías emergentes promete transformar fundamentalmente los paradigmas de producción alimentaria urbana. El análisis desarrollado en los capítulos anteriores establece las bases técnicas y económicas para la implementación inicial en Cali; sin embargo, es crucial proyectar las trayectorias de desarrollo tecnológico que definirán la competitividad y sostenibilidad a largo plazo de estos sistemas.

Las proyecciones aquí presentadas se fundamentan en tendencias tecnológicas consolidadas y casos de aplicación documentados internacionalmente, proporcionando una hoja de ruta para la evolución del modelo propuesto hacia sistemas completamente autónomos e interconectados. Esta visión prospectiva no solo identifica oportunidades de mejora continua, sino que también anticipa los requerimientos de capacitación, infraestructura y marcos regulatorios necesarios para materializar el potencial transformador de la agricultura vertical en Colombia.

6.1.Optimización del Uso de Recursos para la automatización de Riego y Nutrientes

La evolución hacia sistemas completamente autónomos de gestión hídrica y nutricional representa una de las fronteras más prometedoras para la optimización de la agricultura vertical. Los avances actuales en aprendizaje automático y sensórica de precisión están convergiendo hacia sistemas capaces de anticipar y responder a las necesidades específicas de cada planta individual, maximizando la eficiencia de recursos mientras se optimiza el rendimiento de cultivos.

- **Modelos predictivos avanzados y gestión de precisión:** La Figura 11 ilustra la arquitectura de un sistema de riego inteligente que representa el estado del arte en automatización agrícola. Este tipo de sistema integra múltiples capas de sensores que monitorean continuamente variables como humedad del suelo, conductividad eléctrica, pH, temperatura radicular y concentración de nutrientes específicos. La información recopilada alimenta algoritmos de aprendizaje automático que pueden prever las necesidades hídricas y nutritivas de los cultivos basándose en patrones históricos de crecimiento, condiciones climáticas y estado fenológico actual de las plantas.

Figura 11: Sistema de riego inteligente. Fuente: https://intellias.com/artificial-intelligence-in-agriculture/

- **Dosificación de precisión y retroalimentación continua:** Los algoritmos de nueva generación pueden ajustar las dosificaciones de agua y nutrientes en tiempo real con precisión de mililitros por planta, considerando factores como la etapa de crecimiento, condiciones ambientales externas, y objetivos específicos de calidad del producto final. Esta capacidad de personalización permite optimizar no solo el rendimiento, sino también características organolépticas específicas como contenido de azúcares, vitaminas o compuestos bioactivos.

6.2.Control Ambiental Avanzado para la Regulación Climática

La integración de sistemas de simulación ambiental representa el siguiente nivel evolutivo en el control climático de agricultura vertical, permitiendo la creación de microclimas optimizados para

cada especie y etapa de desarrollo. Estos sistemas trascienden el control reactivo tradicional para implementar estrategias predictivas que anticipan y previenen condiciones subóptimas.

- **Simulación predictiva y ambientes adaptativos:** La Figura 12 presenta un sistema de simulación ambiental que ejemplifica las capacidades emergentes en este campo. Este tipo de plataforma utiliza modelos computacionales complejos que simulan las respuestas de los cultivos bajo diferentes condiciones ambientales, permitiendo ajustes proactivos en iluminación, temperatura, humedad y concentración de CO_2 antes de que las plantas experimenten estrés.

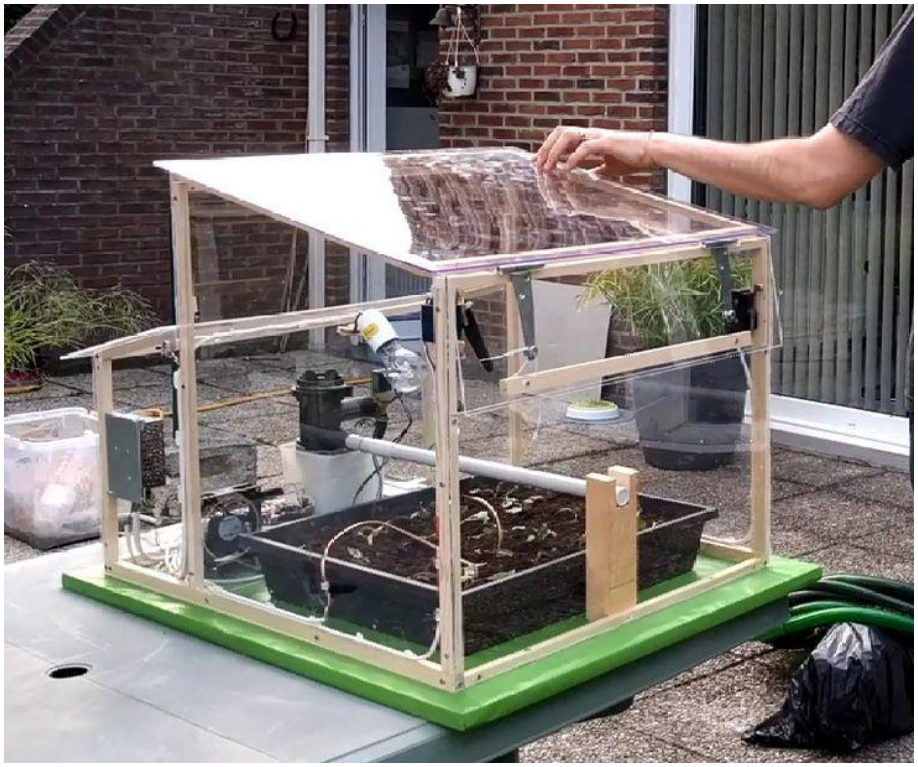


Figura 12: Simulación de ambiente. Fuente: https://www.instructables.com/Automated-Greenhouse/

- **Microzonificación climática:** Una característica avanzada de estos sistemas es su capacidad para crear microzonas climáticas dentro de una misma instalación, optimizando condiciones específicas para diferentes especies o etapas de crecimiento simultáneamente. Esta flexibilidad operativa permite diversificar la producción y maximizar el aprovechamiento del espacio disponible.

6.3.Detección y Diagnóstico de Anomalías para la Monitorización de Salud del Cultivo

La detección temprana de problemas fitosanitarios mediante visión computarizada e inteligencia artificial constituye una revolución en la gestión preventiva de cultivos. Estos sistemas prometen transformar la agricultura vertical de un modelo reactivo a uno verdaderamente predictivo y preventivo.

- **Visión computarizada y diagnóstico automatizado:** La Figura 13 muestra un sistema integrado de detección que utiliza cámaras de alta resolución, sensores espectrales y algoritmos de procesamiento de imagen para identificar signos tempranos de enfermedades, deficiencias nutricionales o estrés en los cultivos. La capacidad de estos sistemas para detectar problemas días o incluso semanas antes de que sean visibles al ojo humano representa un avance fundamental en la gestión proactiva de la salud de los cultivos.

Figura 13: Sistema de detección. Fuente: https://intellias.com/artificial-intelligence-in-agriculture/

- **Respuesta automatizada y gestión integrada:** Al detectar anomalías, estos sistemas pueden activar respuestas automáticas como ajustes en riego, modificaciones en la composición nutricional, cambios en condiciones ambientales, o alertas específicas para intervención humana. Esta capacidad de respuesta integrada minimiza el tiempo entre detección y acción correctiva, factor crítico para la prevención de pérdidas significativas.

6.4.Análisis Predictivo y Mantenimiento Preventivo para la Previsión y Planificación

La implementación de estrategias de mantenimiento predictivo basadas en inteligencia artificial promete revolucionar la gestión operativa de los sistemas de agricultura vertical, transformando el mantenimiento reactivo tradicional en un enfoque proactivo que minimiza interrupciones y optimiza la vida útil de los equipos.

- **Modelos de predicción de cosecha:** Los algoritmos de nueva generación pueden analizar datos históricos y condiciones actuales para prever la producción futura con alta precisión facilitando la planificación de cosecha, gestión de inventarios y coordinación logística. Esta capacidad predictiva es especialmente valiosa para contratos de suministro con distribuidores y restaurantes que requieren volúmenes específicos en fechas determinadas.
- **Mantenimiento predictivo inteligente:** Los sistemas de monitoreo continuo pueden prever fallos en equipos críticos como bombas, ventiladores, sistemas de iluminación y controladores, programando mantenimiento preventivo antes de que ocurran averías. Esto puede reducir los costos de mantenimiento y minimizar interrupciones operativas no planificadas.

6.5.Optimización y Aprendizaje Continuo para el Ajuste permanente de los Modelos

La implementación de sistemas de aprendizaje continuo representa la evolución hacia agricultura vertical verdaderamente autónoma, donde los sistemas se perfeccionan constantemente basándose en datos operativos y resultados de producción.

- **Retroalimentación continua y mejora adaptativa:** Los sistemas de nueva generación implementan técnicas de aprendizaje automático que refinan continuamente sus modelos basándose en nuevos datos y resultados de cultivos. Esta capacidad de auto-mejora permite que el sistema se adapte a variaciones estacionales, cambios en variedades de cultivos, y condiciones operativas específicas de cada instalación.
- **Optimización multiobjetivo:** Los algoritmos avanzados pueden balancear simultáneamente múltiples objetivos como maximización de rendimiento,

minimización de costos energéticos, optimización de calidad nutricional, y reducción de desperdicio, encontrando puntos óptimos que consideran las prioridades específicas de cada operación.

6.6.Interacción y Automatización Mejoradas para Interfaces Inteligentes

El desarrollo de interfaces humano-máquina más intuitivas y sistemas de asistencia virtual especializados facilitará la adopción de agricultura vertical por parte de operadores con diferentes niveles de experiencia técnica.

- **Asistentes virtuales especializados:** El desarrollo de chatbots y asistentes virtuales entrenados específicamente en agricultura vertical puede proporcionar soporte técnico 24/7, diagnóstico de problemas, recomendaciones de optimización, y capacitación continua para operadores. Estos sistemas pueden democratizar el acceso a conocimiento especializado, reduciendo la barrera de entrada técnica para nuevos proyectos.
- **Interfaces de realidad aumentada:** La integración de tecnologías de realidad aumentada puede superponer información crítica sobre las plantas físicas, mostrando datos de salud, requerimientos nutricionales, cronogramas de cosecha, y alertas de mantenimiento directamente en el campo visual del operador.

6.7.Integración de Datos y Modelos para mejorar la Conectividad y Escalabilidad

La evolución hacia sistemas completamente interconectados y escalables representa el horizonte último de la agricultura vertical, donde múltiples instalaciones pueden compartir datos, mejores prácticas y optimizaciones de manera continua.

- **Ecosistemas de datos compartidos:** La creación de plataformas que permitan el intercambio seguro de datos entre diferentes instalaciones de agricultura vertical puede acelerar el aprendizaje colectivo y la identificación de mejores prácticas. Para Colombia, esto podría traducirse en una red nacional de instalaciones que comparten conocimiento y optimizaciones.

- **Integración con sistemas urbanos:** Los sistemas futuros podrán integrarse con infraestructura urbana inteligente, optimizando el uso de energía de la red eléctrica, coordinando con sistemas de gestión de residuos urbanos, y contribuyendo a estrategias municipales de sostenibilidad y resiliencia climática.

Las proyecciones presentadas sugieren una ruta de evolución tecnológica que puede implementarse progresivamente en el modelo propuesto para Cali.

7. Conclusiones

El presente trabajo sobre la "Agricultura Vertical Inteligente y Automatizada para Impulsar la Resiliencia de los Sistemas Alimentarios Urbanos en Colombia: Retos y Estrategias" ha permitido desarrollar un análisis exhaustivo sobre la viabilidad de implementar sistemas de agricultura vertical en la ciudad de Cali. A través de un enfoque metodológico mixto que combinó modelos matemáticos, análisis multicriterio y evaluación sistémica, se han obtenido conclusiones significativas que contribuyen al campo de la agricultura urbana y los sistemas alimentarios sostenibles.

El benchmarking realizado con modelos internacionales y el análisis de casos locales ha permitido identificar los requerimientos fundamentales para implementar con éxito la agricultura vertical en Cali. Desde la perspectiva técnica, se ha determinado que la eficiencia energética constituye el factor crítico, requiriendo tecnologías LED de alta eficacia fotónica (≥ 3.0 $\mu mol \cdot J^{-1}$) y sistemas automatizados para monitoreo y control de variables ambientales. En términos agronómicos, se requiere la selección de cultivos adaptados a entornos controlados con alto valor comercial y ciclos cortos, así como la implementación de sistemas hidropónicos que optimicen el uso del agua y nutrientes. El marco legal vigente en Colombia facilita la implementación de estos sistemas, aunque se requiere mayor desarrollo de normativas específicas para agricultura vertical urbana, especialmente en aspectos relacionados con uso de suelo urbano y certificaciones para productos.

El análisis de modelos internacionales evidenció que las tecnologías necesarias están disponibles en el mercado global, pero requieren adaptación a las condiciones locales de Cali, especialmente considerando aspectos como temperatura, humedad y radiación solar propias del trópico. El estudio de casos locales mostró experiencias incipientes pero prometedoras, con necesidades claras de escalamiento y optimización tecnológica.

La modelación matemática de la eficiencia fotosintética y los costos energéticos ha permitido dimensionar con precisión los requerimientos del sistema y evaluar diferentes configuraciones. Los resultados indican que cada kilogramo de biomasa cosechada requiere aproximadamente 15 kWh de electricidad bajo condiciones estándar (escenario base), lo que se traduce en un costo energético de 12,000 COP/kg. Los cálculos demostraron que la integración de tecnologías LED

más eficientes puede reducir significativamente estos costos, alcanzando valores de 9.01 kWh/kg en el escenario optimista.

El análisis comparativo frente a modelos convencionales demostró que la agricultura vertical, aunque requiere mayor inversión inicial, presenta ventajas significativas en términos de productividad por unidad de área (hasta 102 kg/m² anual), eficiencia hídrica (reducción del 95% en consumo de agua) y posibilidad de producción continua independiente de factores climáticos. Los cinco escenarios evaluados (Base, Optimista, Pesimista, Solar 40% y Solar 100%) proporcionaron un espectro completo de posibilidades de implementación, con diferentes balances entre inversión inicial, costos operativos y sostenibilidad ambiental.

En cuanto a la evaluación mediante enfoque sistémico multicriterio de los aspectos técnicos, financieros, sociales y ambientales, el análisis desarrollado, que integró 15 criterios distribuidos en cuatro dimensiones (técnica, económica, ambiental y social), permitió una evaluación integral de las diferentes configuraciones. Los resultados muestran que el escenario Optimista (alta eficiencia tecnológica sin integración solar) obtiene la valoración global más alta (32.03/100), seguido por los escenarios con integración solar parcial de 20% (31.35) y 40% (30.66). Esta evaluación refleja un equilibrio entre las ventajas técnicas y económicas inmediatas de los sistemas eficientes sin integración solar, frente a los beneficios ambientales y económicos a largo plazo de los sistemas con energía renovable.

El análisis de costos acumulados a 15 años reveló que, a pesar de su menor valoración multicriterio, el escenario con 100% de integración solar (10,199 millones COP) resulta económicamente más ventajoso a largo plazo que el escenario Optimista (10,650 millones COP). Esta aparente discrepancia subraya la importancia del horizonte temporal en la evaluación de sistemas con alta inversión inicial y bajos costos operativos. El análisis de sensibilidad confirmó la robustez de las conclusiones ante diferentes configuraciones de pesos, manteniendo el escenario Optimista como la alternativa preferida bajo todas las ponderaciones evaluadas, pero con diferencias variables respecto a los escenarios con integración solar.

Integrando estos hallazgos, se propone una estrategia de implementación progresiva para Cali, estructurada en tres fases: una fase inicial con implementación de un sistema basado en el escenario

Optimista, priorizando tecnologías de alta eficiencia, LEDs avanzados y sistemas automatizados de control ambiental, con una inversión aproximada de 3,900 millones COP para una capacidad de 100 toneladas anuales; una fase de expansión con incorporación progresiva de sistemas fotovoltaicos hasta alcanzar una integración del 20-40%, balanceando la inversión adicional con los beneficios económicos y ambientales a mediano plazo; y una fase de consolidación con evaluación de expansión de la capacidad solar hasta niveles de 50-60% según el desempeño del sistema y la disponibilidad de financiamiento, buscando optimizar los beneficios a largo plazo.

Este enfoque incremental permite capitalizar las ventajas técnicas y económicas inmediatas del escenario mejor valorado en el análisis multicriterio, mientras se prepara el camino para obtener los beneficios a largo plazo asociados a una mayor integración de energías renovables.

La investigación demuestra que la agricultura vertical inteligente y automatizada, especialmente cuando integra progresivamente energías renovables, representa una alternativa viable y sostenible para fortalecer la resiliencia de los sistemas alimentarios urbanos en Colombia. El análisis realizado confirma la viabilidad técnica y económica del modelo propuesto para Cali, ofreciendo un camino factible hacia sistemas alimentarios más sostenibles y resilientes.

Las principales contribuciones de esta investigación incluyen: la identificación detallada de requerimientos técnicos adaptados al contexto colombiano, el desarrollo de modelos matemáticos que permiten cuantificar con precisión los costos energéticos y la eficiencia fotosintética, y la propuesta de una metodología de evaluación multicriterio que integra aspectos técnicos, económicos, ambientales y sociales, proporcionando una herramienta valiosa para la toma de decisiones en proyectos similares.

Estos hallazgos y propuestas contribuyen significativamente al avance del conocimiento sobre sistemas alimentarios urbanos sostenibles y ofrecen directrices prácticas para la implementación exitosa de agricultura vertical en Cali y otras ciudades colombianas, aportando así a la construcción de entornos urbanos más resilientes frente a los desafíos globales del siglo XXI.

Referencias Bibliográficas

Abbasi, R., Martinez, P., Ahmad, R., 2022. The digitization of agricultural industry – a systematic literature review on agriculture 4.0. Smart Agricultural Technology. https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100042

Al-Chalabi, M., 2015. Vertical farming: Skyscraper sustainability? Sustain Cities Soc 18, 74–77. https://doi.org/10.1016/J.SCS.2015.06.003

Alvarado, P., Moreno, A., 2019. Agricultura Urbana de Precisión.

Arias, J., 2020. Algunas propuestas para la seguridad alimentaria en el POT [WWW Document]. Alcaldía Mayor de Bogota. URL https://bogota.gov.co/mi-ciudad/pot-algunas-propuestas-para-la-seguridad-alimentaria (accessed 9.30.23).

Arrendondo Caballero, M.J., Motta Jara, A.J., 2022. Estudio de Prefactibilidad para la Producción de Cultivos Aeropónicos en Granjas Verticales. Universidad de Lima, Lima.

Banerjee, C., Adenaeuer, L., 2014. Up, up and away! The economics of vertical farming. Journal of Agricultural Studies, 2(1), 40-60.

Baumont de Oliveira, F.J., 2022. A Decision Support System for Economic Viability and Environmental Impact Assessment of Vertical Farms. University of Liverpool, Liverpool.

Benis, K., Ferrão, P., 2018. Commercial farming within the urban built environment – Taking stock of an evolving field in northern countries. Glob Food Sec 17, 30–37. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gfs.2018.03.005

Bugbee, B. G., & Monje, O., 1992. The limits of crop productivity: Theory and validation. BioScience, 42(7), 494-502.

Bugbee, B. G., & Salisbury, F. B., 1988. Exploring the limits of crop productivity: I. Photosynthetic efficiency of wheat in high irradiance environments. Plant Physiology, 88(3), 869-878.

Burrows, J., 2023. La agricultura vertical ahorra agua: Así es como puede contribuir a la seguridad alimentaria [WWW Document]. URL https://es.weforum.org/agenda/2023/06/asi-es-como-la-agricultura-vertical-ahorra-agua-y-puede-contribuir-a-la-seguridad-alimentaria-mundial/ (accessed 5.28.24).

Cabrera, D., Colosi, L., Lobdell, C., 2008. Systems thinking. Eval Program Plann 31, 299–310. https://doi.org/10.1016/j.evalprogplan.2007.12.001

Candelaria, B., Ruiz, O., Gallardo, F., Pérez, P., Becerra, M., Vargas, L., 2011. Revisión Aplicación de Modelos de Simulación en el Estudio y Planificación de la Agricultura, una Revisión. Tropical and Subtropical Agroecosystems 14, 999–1010.

Carranza, C., Vinasco, M., Mosquera, R., Montenegro, S., Serrato, Y., Prada, Y., Sepúlveda, Y., 2021. Alternativas de producción agroecológica urbana - periurbana y su contribución en la seguridad alimentaria de Colombia, Sello Editorial UNAD. ed. Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente, Bogota.

Castro, D., 2023. Agricultura vertical para aumentar la producción de alimentos en áreas urbanas. Universidad Tecnica de Babahoyo, Los Rios.

CEPAL, FAO, IICA, 2021. Perspectivas de la Agricultura y del Desarrollo Rural en las Américas: una mirada hacia América Latina y el Caribe 2021-2022. San José.

Chartuni, E., Magdalena, C., 2014. Manual de Agricultura de Precision. IICA, PROCISUR, Montevideo.

Ciavaldini, S., 2022. El costo de automatizar vs. el costo de no hacer nada [WWW Document]. De Jongh Computing Systems. URL https://www.djcs.com.ve/blog/2206-el-costo-de-no-hacer-nada (accessed 6.10.24).

Cuta, M.C., 2021. Proyecto de inversión para la creación de una empresa dedicada al cultivo y comercialización de cebolla cabezona mediante un sistema de cultivo hidropónico inteligente en la ciudad de Bogotá (Proyecto de Inversion). Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas, Bogota.

De Wit, C. T., 1965. Photosynthesis of leaf canopies. Agricultural Research Reports, 663, 1-57.

Espinoza, M.A., Gallegos, D. del P., 2019. Benchmarking, ¿cómo y de dónde?: una revisión sistemática de la literatura. Revista Espacios 40, 16.

Evans, L. T., 1993. Crop evolution, adaptation and yield. Cambridge University Press.

Ezquivel, E., 2017. Aeroponia. Universidad Autonoma Agraria Antonio Narro, Torreon.

FAO, 2022. El Estado Mundial de la Agricultura y la Alimentación 2022, El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2022. FAO, Roma. https://doi.org/10.4060/cb9479es

FAO, 2021. The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture – Systems at breaking point (SOLAW 2021), The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture – Systems at breaking point (SOLAW 2021). FAO. https://doi.org/10.4060/cb7654en

FAO, 2017. The future of food and agriculture and challenges. Roma.

FAO, Rikolto, RUAF, 2022. Urban and peri-urban agriculture sourcebook from production to food systems. FAO, Roma. https://doi.org/10.4060/cb9722en

Fernández, R., 2022. Relaciones Comerciales Entre España y Singapur en el Mercado Agrícola. Universidad de Valladolid, Valladolid.

Fieldview, 2021. Ciencia de Datos, aliada clave para la agricultura eficiente [WWW Document]. Fieldview. URL https://blog.climatefieldview.com.ar/big-data-en-la-agricultura (accessed 6.10.24).

Fritzson, P.A., 2011. Introducción al modelado y simulación de sistemas técnicos y físicos con Modélica. Wiley.

Gallego, A., 2022. Gestión de Datos en Sistemas Ciberfísicos Orientados a la Agricultura Inteligente. Unidad de la Republica, Montevideo.

Garcia, D.F., Perez, F., 2021. Implementación de un prototipo de granja vertical para el control y monitoreo del crecimiento de las plantas, haciendo análisis de imágenes, forma, tamaño y color utilizando IoT - Ibague. Tolima (Trabajo de Grado). Universidad Antonio Nariño, Ibague.

García, E., Flego, F., 2008. Agricultura de Precisión. Ciencia y Tecnologia 99–116.

Gomez, D., Mendez, G., Mendez, E., Ortiz, G., Turriago, A., 2008. Metodología basada en proceso de jerarquía analítica (AHP) para seleccionar cadenas productivas que buscan soluciones de automatización a bajo costo. Ingenieria 13, 15–26.

Gomstyn, A., Jonker, A., 2023. ¿Qué es la agricultura inteligente? [WWW Document]. URL https://www.ibm.com/es-es/topics/smart-farming (accessed 5.28.24).

Goudriaan, J., & Van Laar, H. H., 1994. Modelling potential crop growth processes: Textbook with exercises. Kluwer Academic Publishers.

Graamans, L., Baeza, E., van den Dobbelsteen, A., Tsafaras, I., & Stanghellini, C., 2018. Plant factories versus greenhouses: Comparison of resource use efficiency. Agricultural Systems, 160, 31-43.

Guerrero, M., 2022. Sistemas Complejos Adaptativos en el diseño parametrico, in: Diseño y Complejidad: Utopias, Ideales y Paradigmas. San Luis Potosi, pp. 53–80.

Hernández, N., Soto, F., Caballero, A., 2009. Revisión Bibliográfica: Modelos de Simulación de Cultivos. Características y Usos, Cultivos Tropicales. La Habana.

Kalantari, F., Mohd Tahir, O., Mahmoudi Lahijani, A., Kalantari, S., 2017. A Review of Vertical Farming Technology: A Guide for Implementation of Building Integrated Agriculture in

Cities. Advanced Engineering Forum 24, 76–91. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/aef.24.76

Kozai, T., 2013. Resource use efficiency of closed plant production system with artificial light: Concept, estimation and application to plant factory. Proceedings of the Japan Academy, Series B, 89(10), 447-461.

Kozai, T., 2018. Smart Plant Factory: The Next Generation Indoor Vertical Farms. Springer, Singapore.

Kozai, T., & Niu, G., 2016. Role of the plant factory with artificial lighting (PFAL) in urban areas. In Plant Factory: An Indoor Vertical Farming System for Efficient Quality Food Production (pp. 7-33). Academic Press.

Kozai, T., Niu, G., & Takagaki, M. (Eds.), 2016. Plant Factory: An Indoor Vertical Farming System for Efficient Quality Food Production. Academic Press.

Lara, A., 2008. Agricultura Urbana en Bogotá: Implicaciones en la construcción de una ciudad sostenible (Monografia). Pontificia Universidad Javeriana, Bogota.

Lopez, D., Sanchez, J., 2017. Propuesta metodológica para la priorización de alternativas de inversión de la Asoc. de usuarios del Distr. de Asorut ubicada en el Municipio de La Unión Valle del Cauca. Universidad del Valle, Zarzal.

Maraveas, C., Bartzanas, T., 2022. Stability Analysis in Elastic States of Very Slender Columns View project SI: Agricultural Infrastructure; Infrastructures (MDPI) View project. Magna Scientia Uceva. https://doi.org/10.54502/msuceva.v2n2a

McCree, K. J., 1971. The action spectrum, absorptance and quantum yield of photosynthesis in crop plants. Agricultural Meteorology, 9, 191-216.

MinSalud, 2013. Perfil Nacional de Consumo de Frutas y Verduras. Bogota.

MinTIC, 2022. Lineamiento Estudio de Mercado en Sectores Estratégicos para Proyecto Piloto de Intercambio de Datos. Bogota.

Mitchell, C. A., Dzakovich, M. P., Gomez, C., Lopez, R., Burr, J. F., Hernández, R., Kubota, C., Currey, C. J., Meng, Q., Runkle, E. S., Bourget, C. M., Morrow, R. C., & Both, A. J., 2015. Light-emitting diodes in horticulture. Horticultural Reviews, 43, 1-87.

Mogollón, E., Quimbay, Y., 2019. La agricultura vertical como estrategia para garantizar la seguridad alimentaria en términos de abastecimiento y calidad de productos en el municipio de Gachetá Cundinamarca. Monografía de investigación. Universidad Nacional Abierta y a Distancia.

Monteith, J. L., 1977. Climate and the efficiency of crop production in Britain. Philosophical Transactions of the Royal Society of London B, 281, 277-294.

Murillo, J., Gomez, N., Apestegui, X., 2021. Guía para la priorización de medidas de adaptación al cambio climático utilizando el Método de Análisis Multicriterio. San Jose.

Nava, E., 2023. Potencial de Implementación Tecnológica de la Industria 4.0 en el Sector Hidroagrícola (Magister). Universidad Nacional Autonoma de Mexico, Ciudad de Mexico.

Nelson, J. A., & Bugbee, B., 2014. Economic analysis of greenhouse lighting: Light emitting diodes vs. high intensity discharge fixtures. PloS ONE, 9(6), e99010.

Oliveira, L., Moreira, A., Silva, M., 2021. Advances in agriculture robotics: A state-of-the-art review and challenges ahead. Robotics. https://doi.org/10.3390/robotics10020052

Pattison, P. M., Tsao, J. Y., Brainard, G. C., & Bugbee, B., 2018. LEDs for photons, physiology and food. Nature, 563(7732), 493-500.

Pennisi, G., Pistillo, A., Orsini, F., Cellini, F., Spinelli, F., Nicola, S., ... & Crepaldi, A., 2020. Optimal light intensity for sustainable water and energy use in indoor cultivation of lettuce and basil under red and blue LEDs. Scientia Horticulturae, 272, 109508.

Pimentel, D., Hurd, L. E., Bellotti, A. C., Forster, M. J., Oka, I. N., Sholes, O. D., & Whitman, R. J., 1973. Food production and the energy crisis. Science, 182(4111), 443-449.

Rankin, S., Hurtado, L., Bonilla, O., Mosquera, E., Lundy, M., 2021. Perfil Sistema Alimentario Cali, ciudad-región: Construyendo un entendimiento común que articule e impulse la acción. Cali.

Rodríguez Díaz, J.A., Camacho Poyato, E., López Luque, R., Pérez Urrestarazu, L., 2005. Los indicadores de gestión y las técnicas de benchmarking aplicados a la mejora de las comunidades de regantes. Ingeniería del Agua 12, 63–76.

Santos Valle, S., Kienzle, J., 2021. Agricultura 4.0: Robótica agrícola y equipos automatizados para la producción agrícola sostenible. Gestión integrada de cultivos 24.

Shamshiri, R.R., Kalantari, F., Ting, K.C., Thorp, K.R., Hameed, I.A., Weltzien, C., Ahmad, D., Shad, Z., 2018. Advances in greenhouse automation and controlled environment agriculture: A transition to plant factories and urban agriculture. International Journal of Agricultural and Biological Engineering 11, 1–22. https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20181101.3210

Somerville, C., Cohen, M., Pantanella, E., Stankus, A., Lovatelli, A., 2022. Producción de alimentos en acuaponía a pequeña escala – Cultivo integral de peces y plantas, Producción de

alimentos en acuaponía a pequeña escala – Cultivo integral de peces y plantas. FAO. https://doi.org/10.4060/i4021es

Sotomayor, O., Ramirez, E., Martinez, H., 2021. Digitalización y cambio tecnológico en las mipymes agrícolas y agroindustriales en América Latina. Santiago de Chile.

Stanghellini, C., Kempkes, F. L. K., & Knies, P., 2003. Enhancing environmental quality in agricultural systems. Acta Horticulturae, 609, 277-283.

Thomaier, S., Specht, K., Henckel, D., Dierich, A., Siebert, R., Freisinger, U.B., Sawicka, M., 2015. Farming in and on urban buildings: Present practice and specific novelties of zero-acreage farming (ZFarming). Renewable Agriculture and Food Systems 30, 43–54. https://doi.org/10.1017/S1742170514000143

Thornley, J. H. M., & Johnson, I. R., 1990. Plant and crop modelling: A mathematical approach to plant and crop physiology. Oxford University Press.

Torres, J., Gonzalez, P., 2020. Modelo de negocio: granja vertical automatizada de hortalizas basada en IoT para monitoreo y control desde aplicativo web (Trabajo de Grado). Universidad Antonio Nariño, Bogota.

Torres Urrego, J.C., González Carreño, P.A., 2020. Modelo de negocio: granja vertical automatizada de hortalizas basada en IoT para monitoreo y control desde aplicativo web. Universidad Antonio Nariño, Bogotá.

van Dooren, R., van Holst, F., van der Maden, A., 2020. TASTE THE FUTURE strategy document Food horticulture in Colombia, positioning Dutch know-how and technology. Bogota.

Verma, S., 2019. How IoT Soil Condition Monitoring Is Empowering Farmers [WWW Document]. URL https://www.iotforall.com/soil-moisture-monitoring (accessed 5.28.24).

Vidal, M., 2024. Principios De Diseño Sostenible Para Productos Ecológicos [WWW Document]. Ariú Design. URL https://ariudesign.com/disenando-un-futuro-sostenible-la-revolucion-de-los-productos-ecologicos/ (accessed 6.10.24).

WASH Colombia, iMMAP, 2023. Conceptos del agua para el análisis de las necesidades, Grupo Interagencial Sobre Flujos Migratorios Mixtos. Colombia.

Zarate, M., 2015. Manual de Hidroponia. Ciudad de Mexico.

Zhu, X. G., Long, S. P., & Ort, D. R., 2008. What is the maximum efficiency with which photosynthesis can convert solar energy into biomass? Current Opinion in Biotechnology, 19(2), 153-159.

Anexos

Anexo 1 Criterios de Inclusión y Exclusión de la revisión bibliográfica y de literatura

Criterios de Inclusión:

- **Estudios Publicados**: Artículos revisados por pares y publicados en revistas científicas reconocidas.
- **Periodo de Publicación**: Estudios publicados en los últimos 10 a 15 años para asegurar la actualidad de la información, aunque se podrían considerar trabajos seminales anteriores si aportan conceptos fundamentales.
- **Foco Temático**:
    - Estudios sobre Agricultura Vertical Automatizada e Inteligente:
        - Investigaciones centradas en el diseño, implementación y optimización de sistemas de agricultura vertical que integren soluciones de automatización avanzada, inteligencia artificial (IA) y tecnologías de la información y comunicación (TIC) para mejorar la eficiencia operativa y la toma de decisiones en tiempo real.
        - Análisis comparativos de las distintas tecnologías de cultivo (hidropónica, aeropónica, acuapónica, etc.) bajo el paradigma de la automatización e inteligencia, evaluando su idoneidad, rendimiento y sostenibilidad en contextos urbanos específicos.
    - Eficiencia Energética y Uso de Recursos en Agricultura Vertical Inteligente:
        - Estudios que examinen cómo la automatización y la inteligencia artificial pueden optimizar el consumo de energía y el uso de recursos hídricos en sistemas de agricultura vertical, incluyendo la aplicación de tecnologías de monitoreo y control ambiental inteligente.
        - Investigaciones sobre la implementación de fuentes de energía renovable y sistemas de reciclaje de agua en la agricultura vertical para maximizar la sostenibilidad y minimizar el impacto ambiental.
    - Rendimiento de Cultivos y Mejoras Tecnológicas:
        - Trabajos que evalúen el impacto de la automatización y las tecnologías inteligentes en el rendimiento de los cultivos, calidad de los productos y la

aceleración de los ciclos de cultivo, incluyendo el uso de iluminación LED optimizada por IA, sistemas de nutrición automatizados y técnicas de análisis de datos para el monitoreo de la salud de las plantas.

- Sostenibilidad, Viabilidad Económica y Aspectos Sociales de la Agricultura Vertical Inteligente:
    - Investigaciones que discutan la sostenibilidad a largo plazo y la viabilidad económica de los sistemas de agricultura vertical automatizados e inteligentes, considerando los costos de implementación, operación y mantenimiento, así como el retorno de inversión (ROI).
    - Estudios que aborden los impactos sociales de la agricultura vertical inteligente, incluyendo la creación de empleo, el acceso a alimentos frescos y saludables en áreas urbanas, y la participación y percepción de la comunidad.

- **Contexto Geográfico**: Estudios realizados en contextos similares al colombiano en términos de clima, urbanización y condiciones socioeconómicas, además de investigaciones realizadas específicamente en Colombia.
- **Idioma**: Artículos publicados en español e inglés.
- **Tipo de Publicación**: Investigaciones empíricas, revisiones teóricas, estudios de caso y metaanálisis relevantes para la agricultura vertical.

Criterios de Exclusión:

- **Publicaciones no Científicas**: Artículos de opinión, columnas de periódicos, blogs y otros materiales no revisados por expertos.
- **Estudios Obsoletos**: Investigaciones publicadas hace más de 15 años que no aportan conceptos fundamentales al campo de estudio, salvo excepciones justificadas.
- **Fuera de Foco**:
    - Estudios que se centren exclusivamente en la agricultura tradicional o en sistemas de cultivo que no se aplican a la agricultura vertical.
    - Investigaciones que traten sobre la tecnología agrícola sin aplicar específicamente a la agricultura vertical.

- **Información Incompleta**: Estudios que no dispongan de suficiente detalle metodológico o de resultados para ser evaluados adecuadamente.
- **Estudios de Calidad Metodológica Baja**: Aquellos trabajos que, tras una evaluación preliminar, presenten deficiencias significativas en su diseño de investigación, análisis de datos o conclusiones.
- **Duplicados**: Estudios que reporten los mismos datos o resultados ya considerados en otros artículos previamente seleccionados.

Anexo 2 Guion encuesta para expertos

Sección 1 Experiencia y Conocimiento en Agricultura Vertical:

- Por favor describa brevemente su trayectoria profesional y sus principales áreas de experiencia relacionadas con la agricultura y/o tecnologías aplicadas a este sector. (Abierta)
- ¿En qué rol o posición se desempeña actualmente y cómo su trabajo se vincula con temas de agricultura vertical, tecnología agrícola o innovación en este ámbito? (Abierta)
- Desde su perspectiva general, ¿cuáles son los principales impactos positivos (ambientales, sociales, económicos, etc.) que puede tener la implementación de la agricultura vertical en contextos urbanos? (Abierta)
- ¿Qué aspectos o áreas considera que requieren mayor investigación, desarrollo e innovación tecnológica para impulsar el avance y adopción de sistemas de agricultura vertical sostenibles? (Abierta)

Sección 2 Aspectos Técnicos del Diseño de Sistemas de Cultivo Vertical:

- Basado en su experiencia, ¿qué tecnologías de cultivo (hidropónica, aeropónica, etc.) considera más adecuadas para la agricultura vertical en Colombia y por qué? (Opción múltiple única respuesta)
    - Hidropónica
    - Aeropónica

- Acuapónica
- Otras

- ¿Cómo se puede optimizar la eficiencia energética y el uso de recursos hídricos en sistemas de agricultura vertical? (Opción múltiple varias respuestas)
  - Sistemas de monitoreo y control automatizado.
  - Paneles solares/Energía renovable.
  - Recirculación y tratamiento de agua.
  - Otras

- Al seleccionar cultivos, ¿qué criterios considera más importantes para garantizar un alto rendimiento y calidad? (Abierta)

Sección 3 Viabilidad y Sostenibilidad:

- En su opinión, ¿cuáles son los factores clave para asegurar la viabilidad económica de un proyecto de agricultura vertical? (Opción múltiple varias respuestas)
  - Eficiencia operativa
  - Acceso a financiamiento
  - Estrategia de comercialización sólida
  - Integración con otras industrias
  - Otras

- ¿De qué manera los sistemas de agricultura vertical pueden contribuir a la sostenibilidad urbana y la seguridad alimentaria? (Opción múltiple varias respuestas)
  - Reducción huella de carbono
  - Uso eficiente de recursos
  - Producción local de alimentos
  - Resiliencia ante disrupciones de la cadena de suministro
  - Otras

- ¿Cuál es el potencial impacto social de implementar agricultura vertical en comunidades urbanas? (Abierta)
- ¿Qué desafíos anticiparía en términos de capacitación y formación de capital humano para operar sistemas tecnificados de agricultura vertical en contextos como el colombiano? (Abierta)

Sección 4 Comparación con Métodos Convencionales:

- Comparado con la agricultura convencional, ¿cuáles considera que son las principales ventajas de la agricultura vertical desde perspectivas técnicas y económicas? (Opción múltiple varias respuestas)
    - Mayor control condiciones
    - Menor usó de agua/tierra
    - Producción más sostenible
    - Mayor flexibilidad de ubicación
    - Otras

- Y ¿cuáles serían las principales desventajas de la agricultura vertical en comparación con los métodos convencionales? (Opción múltiple varias respuestas)
    - Altos costos iniciales
    - Uso intensivo de energía
    - Dificultad en escalabilidad
    - Baja diversidad de cultivos
    - Otras

- Basado en su conocimiento, ¿qué desafíos anticiparía al implementar sistemas de agricultura vertical en contextos como el colombiano? (Abierta)

Sección 5 políticas Públicas/Regulaciones:

- Desde su perspectiva, ¿qué tipo de políticas públicas, incentivos gubernamentales o regulaciones serían necesarias para fomentar la adopción de la agricultura vertical en Colombia? (Abierta)
- ¿Considera que el marco regulatorio y normativo actual en Colombia es propicio para el desarrollo de la agricultura vertical? De no ser así, ¿qué ajustes serían recomendables? (Abierta)

Sección 6 Recomendaciones y Proyecciones:

- ¿Qué recomendaciones daría para diseñar e implementar un sistema de agricultura vertical en una ciudad piloto colombiana? (Abierta)
- ¿Cómo visualiza el futuro de la agricultura vertical en Colombia y globalmente en los próximos 5-10 años? (Abierta)

Anexo 3 Ponderación de criterios

Dimensión técnica (25%)

Eficiencia energética (10%):

- Cálculo basado en el consumo eléctrico por kilogramo de biomasa seca (EB_{dry}) obtenido en la sección 4.2.2 mediante la ecuación (9).
- Normalización en escala 0-10 donde 10 corresponde al mínimo consumo teórico posible (150 $kWh \cdot kg^{-1}$) y 0 al máximo viable (500 $kWh \cdot kg^{-1}$).
- Fórmula aplicada: Puntuación = 10 - [(EB_{dry} - 150) × 10 / 350]

Complejidad de implementación (5%):

- Evaluación basada en tres factores cuantificables:
  - Número de componentes tecnológicos distintos requeridos
  - Nivel de especialización del personal necesario (medido según años de formación)
  - Tiempo estimado de implementación en meses

- Cada factor se evalúa en escala 0-10 y se promedian para obtener la puntuación final.

Fiabilidad del sistema (5%):

- Estimación basada en:
  - Tiempo medio entre fallos (MTBF) de componentes críticos
  - Redundancia de sistemas clave (N+1, 2N, etc.)
  - Dependencia de factores externos (clima, suministro eléctrico)
- Cuantificación mediante modelado probabilístico de disponibilidad del sistema.

Escalabilidad (5%):

- Evaluación basada en:
  - Modularidad del diseño (porcentaje de componentes modulares)
  - Incremento porcentual en inversión al duplicar capacidad
  - Flexibilidad para adaptación a diferentes espacios urbanos

Dimensión económica (35%)

Inversión inicial (10%):

- Cálculo directo de la inversión total requerida en millones de COP, incluyendo:
  - Infraestructura básica
  - Sistemas de iluminación
  - Sistemas de control ambiental
  - Tecnología de cultivo (hidroponía, aeroponia)
  - Sistemas energéticos (paneles solares cuando aplica)
- Normalización en escala 0-10 donde 10 corresponde a mínima inversión.

Costos operativos (10%):

- Basado en los costos anuales calculados en la sección 4.2.3, principalmente:
  - Costo energético anual
  - Costos de mantenimiento (estimado como porcentaje de inversión inicial)

- Costo de insumos agrícolas
- Costos de personal

- Normalización considerando rango entre el escenario más económico y más costoso.

Tiempo de retorno de inversión (5%):

- Cálculo mediante la fórmula: Inversión inicial ÷ (Ingresos anuales - Costos operativos)
- Asumiendo precio de venta promedio de 15,000 COP por kg de biomasa
- Normalización donde 10 corresponde a retorno en 3 años y 0 a retorno superior a 10 años.

Rentabilidad a largo plazo (10%):

- Evaluación del Valor Actual Neto (VAN) a 10 años
- Tasa de descuento aplicada: 12% (referencia del mercado colombiano)
- Consideración de valor residual de equipos y depreciación lineal

Dimensión ambiental (25%)

Huella de carbono (10%):

- Cálculo basado en emisiones equivalentes de CO_2 por kg de biomasa producida
- Factor de emisión para electricidad en Colombia: 164.38 g CO_2eq/kWh (UPME, 2022)
- Para escenarios con energía solar: emisiones durante ciclo de vida de paneles consideradas
- Normalización donde 10 corresponde a mínimas emisiones posibles y 0 a emisiones comparables con agricultura convencional.

Eficiencia hídrica (5%):

- Basado en consumo de agua por kg de biomasa producida
- Sistemas hidropónicos con recirculación: 95-98% de eficiencia en uso de agua comparado con agricultura tradicional
- Variación entre escenarios mínima ya que todos utilizan el mismo sistema hidropónico

Uso de suelo (5%):

- Evaluación de la productividad por unidad de área (kg/m²)
- Consideración del espacio adicional requerido para paneles solares cuando aplica
- Normalización donde 10 corresponde a máxima eficiencia espacial

Generación de residuos (5%):

- Cuantificación de residuos sólidos producidos por kg de biomasa
- Valoración de potencial de reciclaje y compostaje de residuos
- Normalización considerando prácticas de economía circular

Dimensión social (15%)

Para cada criterio social, la normalización a escala 0-10 se realizó considerando los valores mínimos y máximos teóricos posibles, así como referencias de proyectos similares en contextos urbanos latinoamericanos:

Generación de empleo (5%):

- Cálculo basado en número de empleos directos creados por cada 100 toneladas de producción anual
- Datos de referencia: Proyectos similares generan entre 6-12 empleos directos por cada 100 toneladas anuales, variando según nivel de automatización
- Diferenciación entre escenarios:
    - Escenario Base: 8 empleos/100 ton (equilibrio automatización-mano de obra)
    - Escenario Optimista: 9 empleos/100 ton (mayor especialización)
    - Escenario Pesimista: 7 empleos/100 ton (menor especialización)
    - Escenario Solar 40%: 9 empleos/100 ton (incluye mantenimiento solar)
    - Escenario Solar 100%: 10 empleos/100 ton (mayor componente técnico)
- Además, se considera un factor multiplicador de 1.5 para empleos indirectos según referencias del sector agrícola colombiano

Accesibilidad del producto (5%):

- Evaluación basada en dos componentes principales:
  - Precio final estimado del producto (70%): Calculado como costo operativo más margen comercial del 35% (referencia del mercado colombiano para productos agrícolas frescos)
  - Disponibilidad geográfica (30%): Considerando la distribución potencial en la ciudad de Cali según modelos de logística urbana
- La puntuación refleja la proporción de población que podría acceder al producto considerando niveles de ingreso en Cali (datos DANE 2022)

Desarrollo de competencias locales (5%):

- Evaluación basada en:
  - Número de especialidades técnicas requeridas
  - Potencial de transferencia tecnológica (escala 1-10)
  - Oportunidades de investigación y desarrollo local
- Datos referenciados del "Plan de Ciencia, Tecnología e Innovación de Cali 2022-2025"
- Valoración de la articulación potencial con universidades locales y centros de formación técnica

Para cada criterio social, la normalización a escala 0-10 se realizó considerando los valores mínimos y máximos teóricos posibles, así como referencias de proyectos similares en contextos urbanos latinoamericanos.