



Modelo Experimental Tecnológico para la Seguridad Alimentaria Urbana: Evaluación de un
Prototipo de Siembra y Cosecha

John Manuel Silva Torres, 974524

Corporación Universitaria Minuto de Dios

Rectoría Virtual y a Distancia

Programa de Maestría en Gerencia de la Innovación en Proyectos

Sub línea de investigación: Gestión de la innovación para el desarrollo sostenible y la consolidación
empresarial

11 de junio de 2026

Modelo Experimental Tecnológico para la Seguridad Alimentaria Urbana: Evaluación de un
Prototipo de Siembra y Cosecha

John Manuel Silva Torres

Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de Magíster en gerencia de la
innovación en proyectos

Asesor

Byron Armando Rico Otalora

Magister en Gerencia de la Innovación de Proyectos

Corporación Universitaria Minuto de Dios

Rectoría Virtual y a Distancia

Programa de Maestría en Gerencia de la Innovación en Proyectos

11 de junio de 2026

DEDICATORIA

Dedico esta labor primordialmente a Dios, por la fortaleza, el juicio y el bienestar que me ha brindado continuamente. Él ha alumbrado mi sendero para alcanzar un nuevo objetivo, dándome el impulso necesario para continuar.

A mi pareja Angie Tatiana Ramón Salazar, por su apoyo, amor, compañía y motivación para cumplir nuestros sueños; por ser un motor fundamental de mi vida.

A mi madre quien lamentablemente ya no está presente físicamente, pero vive en mis días buenos y malos. Este logro también es por ella, por sus enseñanzas y por inspirarme a ser una mejor persona y un mejor profesional.

A mi padre y mi hermana, en los cuales me han dado apoyo en mis proyectos e impulsándome a seguir adelante con mis metas y sueños.

AGRADECIMIENTOS

Expreso mi gratitud a la institución Corporación Universitaria Minuto de Dios, por la orientación, apoyo y enseñanzas brindadas para completar este trabajo académico, así como a la facultad de ciencias empresariales y mis catedráticos, Mg. Byron Armando Rico Otalora y Mg. Jazmín Arias Hernández.

Finalmente, a mis amigos y conocidos que me escucharon, me brindaron sus opiniones y compartieron conocimientos que aportaron a la realización de este trabajo.

CONTENIDO

Lista de tablas	9
Lista de figuras	10
Lista de anexos.....	11
Resumen	12
Abstract.....	13
INTRODUCCIÓN.....	14
1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	16
1.1 Descripción del problema.....	18
1.1.1 Problema concreto.....	19
1.2 La pregunta de investigación.....	20
1.3 Objetivos de investigación.....	20
1.3.1 Objetivo general.....	20
1.3.2 Objetivos específicos.....	21
1.4 Justificación de la investigación	21
2 MARCO DE REFERENCIA.....	23
2.1 Estado del arte.....	24
2.1.1 Bases para una idónea protección alimentaria	24
2.1.2 Panorama actual de la inseguridad alimentaria	25
2.1.3 Sostenibilidad agrícola: aportes desde literatura científica especializada	26
2.1.4 Hidroponía en agricultura urbana: modelos de implementación y componentes.....	27
2.1.5 Modelos de simulación para el análisis y la planificación agrícola: revisión de enfoques	29
2.1.6 Innovación tecnológica y sustentabilidad agroambiental: retos y perspectivas	29
2.1.7 Supervisión e irrigación mediante herramientas técnicas en cultivos ciudadanos: una implementación práctica.	31
2.1.8 Agricultura urbana inteligente basada en IoT: arquitectura y funcionamiento general	32
2.1.9 Huertas urbanas como estrategia de resiliencia en zonas urbanas.....	33
2.1.10 Agricultura doméstica a pequeña escala: dispositivos tipo “matera inteligente”	35
2.1.11 Agricultura urbana y economía local: evidencias de dinamización y beneficios.....	36
2.1.12 Identificación de sitios para agricultura urbana mediante modelos 3D y análisis urbano.....	37
2.1.13 Tendencias y enfoques actuales de agricultura urbana inteligente	38

2.1.14	Tecnologías emergentes orientadas al objetivo “Hambre Cero” en Colombia	39
2.1.15	Plataformas digitales y simulación para toma de decisiones en la agricultura	40
2.1.16	Agricultura y transformación digital: datos, conectividad e innovación tecnológica.....	42
2.1.17	IoT para monitoreo de variables climáticas en agricultura urbana: implementación típica	44
2.1.18	ESP32 en agricultura 4.0: control y monitoreo aplicado a entornos tipo invernadero	45
2.1.19	Agricultura vertical y seguridad alimentaria: resiliencia y sostenibilidad del sistema	45
2.1.20	Dispositivos IoT con ESP32: diseño, implementación y consideraciones técnicas	46
2.1.21	Riego inteligente habilitado por IoT con ESP32: enfoque de eficiencia hídrica	48
2.1.22	Control y operación de huertos urbanos para producción de hortalizas	49
2.1.23	Sistemas acuapónicos inteligentes: diseño e integración IoT en condiciones cálidas.....	50
2.1.24	Monitoreo automatizado de humedad del suelo: métodos, sensores y aplicaciones	51
2.1.25	Agricultura inteligente para una alimentación sostenible: síntesis de desafíos y oportunidades	52
2.1.26	Síntesis crítica de la revisión documental y vacío de investigación	54
2.2	Marco teórico	57
2.2.1	Innovación tecnológica aplicada a la agricultura: tendencias y enfoques actuales	57
2.2.2	La agricultura urbana y su aporte a la seguridad alimentaria en entornos urbanos	58
2.2.3	Agricultura inteligente (Smart Farming): conceptos, componentes y alcance.....	59
2.2.4	Internet de las cosas en la agricultura: arquitectura y flujo de datos	60
2.2.5	Monitoreo de variables ambientales en agricultura: medición, trazabilidad y análisis.....	61
2.2.6	Estaciones meteorológicas y sensado ambiental: fundamentos y aplicaciones en cultivo.....	61
2.2.7	Agricultura optimizada basada en datos: apoyo a la toma de decisiones y mejora del manejo....	62
3	METODOLOGÍA	63
3.1	Paradigma investigativo	64
3.2	Instrumentos de recolección	65
3.3	Enfoque, alcance, temporalidad y tipo de investigación	66
3.4	Población y muestra	67
3.4.1	Caracterización de la población o área de estudio	67
3.4.2	Cálculo y definición del tamaño muestral.....	69
3.5	Diseño metodológico.....	70
3.5.1	Fase 1: Identificación de los factores y variables a medir.	71

3.5.2	Fase 2: Desarrollo base de datos, registro de variables y análisis/seguimiento de variables para cada cultivo.	72
3.5.3	Fase 3: Diseño de prototipo de agricultura urbana para la ciudad de Bogotá y para el municipio de San Francisco (Cundinamarca).	73
4	HIPÓTESIS.....	75
4.1	Hipótesis tecnológica	76
4.2	Hipótesis económica	78
4.3	Hipótesis social.....	80
4.4	Variables o categorías de análisis.....	81
5	DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN	82
5.1	Instrumentos de recolección de información.....	82
5.2	Selección de plantas a monitorear	87
5.3	Selección de sensores y plataforma de monitoreo.....	89
5.4	Envío de datos al servidor y visualización	94
5.5	Montaje inicial del prototipo	95
5.6	Implementación de sensores y pruebas de conexión.....	98
5.7	Desarrollo de base de datos inicial	99
5.8	Pruebas con cultivos	99
5.9	Ajuste del sistema y calibraciones	100
5.10	Validación del prototipo en condiciones reales.....	101
6	RESULTADOS.....	103
6.1	Resultados — Objetivo específico 1 (Identificar factores determinantes).....	103
6.2	Resultados — Objetivo específico 2 (Óptimos vs. condiciones observadas).....	110
6.3	Resultados — Objetivo específico 3 (Desempeño del prototipo y flujo de datos).....	113
6.4	Análisis de resultados	116
6.4.1	Análisis – OE1: Factores determinantes	116
6.4.2	Análisis – OE2: Óptimos vs. condiciones observadas.	117
6.4.3	Análisis – OE3: Desempeño del prototipo y flujo de datos	119
7	DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y RECOMENDACIONES	120
7.1	OE1 – Factores determinantes en entorno urbano	120
7.2	OE2 – Óptimos por especie vs. condiciones observadas	120
7.3	OE3 – Desempeño del prototipo y flujo de datos	121

7.4	Evaluación del proyecto como innovación social y tecnológica desde la perspectiva de la gerencia de proyectos	121
7.4.1	Replicabilidad para familias de estrato bajo	122
7.4.2	Conocimientos obtenidos tras el cambio rural-urbano: ajuste del modelo de San Francisco, Cundinamarca, a medios ciudadanos como Bogotá D.C.	123
8	CONCLUSIONES.....	127
8.1	Recomendaciones de mejora.....	129
	REFERENCIAS.....	131
	Anexos.....	135

Lista de tablas

Tabla 1 Indicadores de precisión y frecuencia de medición	76
Tabla 2 Indicadores de desempeño de la plataforma digital	77
Tabla 3 Variables	79
Tabla 4 Resumen del conjunto de datos analizado	81
Tabla 5 Instrumentación empleada en el prototipo de monitoreo. Fuente: elaboración propia	83
Tabla 6 Rangos de referencia de variables ambientales por cultivo seleccionado.....	86
Tabla 7 Variables primarias y secundarias.....	87
Tabla 8 Instrumentos.....	88
Tabla 9 Asignación de pines y tipo de señal para la conexión del sensor al ESP32-WROOM-32	89
Tabla 10 Caracterización básica del conjunto de datos analizado	90
Tabla 11 Resumen estadístico de temperatura, humedad relativa y presión atmosférica	96
Tabla 12 Resumen diario de temperatura y humedad relativa durante el periodo observado.....	108
Tabla 13 Porcentaje de lecturas por debajo, dentro y por encima del rango de referencia por especie....	109
Tabla 14 Resumen estadístico de temperatura, humedad relativa y presión atmosférica	110
Tabla 16 Resumen estadístico de temperatura, humedad relativa y presión atmosférica	111
Tabla 17 Resumen diario de temperatura y humedad relativa durante el periodo observado.....	116
Tabla 18 Porcentaje de lecturas por debajo, dentro y por encima del rango de referencia por especie....	117

Lista de figuras

Figura 1 Arquitectura del sistema de monitoreo y visualización de variables ambientales	70
Figura 2 Medición de temperatura	83
Figura 3 Medición de variables: temperatura, humedad y presión	84
Figura 4 Ingreso a página web, monitoreo de sensores en Bogotá	85
Figura 5 Ingreso a página web, monitoreo de sensores en San Francisco	85
Figura 6 Historial de medición de sensores	92
Figura 7 Plataforma de base de datos Firebase Realtime Database utilizada para el almacenamiento de registros.....	94
Figura 8 Entorno de instalación del prototipo y visualización de variables ambientales (temperatura y humedad relativa).....	95
Figura 9 Evidencia fotográfica del montaje real del prototipo: a) montaje general; b) unidad con fresa; c) unidad con frutal joven; d) especies complementarias en llanta reutilizada	97
Figura 10 Conexión de la tarjeta, capa física	98
Figura 11 Medición de variables.....	100
Figura 12 Lectura de datos, según google clima.....	101
Figura 13 Simulación 3D del escenario de siembra del prototipo en entorno urbano	102
Figura 14 Simulación 3D del escenario de siembra y distribución de unidades de cultivo	102
Figura 15 Espacio de instalación del área de siembra en San Francisco (Cundinamarca).....	103
Figura 16 Evidencia de visualización y consulta de datos del sistema de monitoreo	104
Figura 17 Primeros y ultimos datos en Bogotá	109
Figura 18 Serie temporal de temperatura registrada por el prototipo (BME280).	112
Figura 19 Serie temporal de humedad relativa registrada por el prototipo (BME280).....	112
Figura 20 Serie temporal de presión atmosférica registrada por el prototipo (BME280).	113
Figura 21 Serie temporal de temperatura ambiental registrada por el sistema de monitoreo	113
Figura 22 Serie temporal de humedad relativa registrada por el sistema de monitoreo.....	114
Figura 23 Serie temporal de presión atmosférica registrada por el sistema de monitoreo.....	115
Figura 24 Resumen diario de temperatura mínima, media y máxima.....	115
Figura 25 Cumplimiento de rangos de referencia para lechuga, albahaca y tomate	119

Lista de anexos

Anexo 1. Carta de validación experto #1 135

Anexo 2. Carta de validación experto #2 136

Anexo 3. Carta de validación experto #3 137

Anexo 4. Ficha técnica del sensor implementado 138

Resumen

Las ciudades enfrentan una creciente inseguridad alimentaria asociada a la reducción de espacios cultivables y a barreras socioeconómicas que afectan con mayor fuerza a comunidades vulnerables. Simultáneamente, el desarrollo de la agricultura en zonas urbanas representa un desafío, dado que factores ambientales como temperatura, presión atmosférica y humedad, dificulta mantener parámetros estables requeridas para el crecimiento óptimo de las plantas.

El proyecto propone desarrollar y comprobar un modelo técnico de cultivo urbano para superficies pequeñas, mediante el seguimiento sensorizado de parámetros del entorno. Los registros recopilados se registrarán en una base de datos configurada y se muestran en el software o página web para apoyar el seguimiento del cultivo con trazabilidad temporal.

Su aporte innovador radica en la visualización y estudio elemental del comportamiento ambiental, facilitando la verificación de contextos y el análisis del comportamiento de parámetros en entornos cerrados. El estudio busca generar evidencia cuantitativa sobre la dinámica ambiental del cultivo urbano, evaluar su viabilidad como alternativa sostenible y fomentar alimentos propios saludables, con la viabilidad de reproducirse en distintos contextos urbanos. Finalmente, se espera que el sistema contribuya a optimizar las condiciones de cultivo mediante el monitoreo continuo de variables ambientales, proporcionando información oportuna que permita a los agricultores urbanos tomar decisiones más eficientes y reducir pérdidas en la producción.

Palabras clave: Política agraria, Agricultura, Base de Datos, Innovación científica, Informática y desarrollo

Abstract

Cities face growing food insecurity linked to a reduction in arable land and socioeconomic barriers that disproportionately affect vulnerable communities. At the same time, developing agriculture in urban areas poses a challenge, as environmental factors such as temperature, atmospheric pressure, and humidity make it difficult to maintain the stable conditions required for optimal plant growth.

The project aims to develop and test a technical model for urban farming on small plots through sensor-based monitoring of environmental parameters. The collected data will be stored in a dedicated database and displayed via software or a website to support crop monitoring with temporal traceability.

Its innovative contribution lies in the visualization and basic study of environmental behavior, facilitating the verification of contexts and the analysis of parameter behavior in enclosed environments. The study aims to generate quantitative evidence on the environmental dynamics of urban farming, evaluate its viability as a sustainable alternative, and promote healthy, locally grown food that can be replicated in various urban contexts. Finally, the system is expected to help optimize growing conditions through continuous monitoring of environmental variables, providing timely information that enables urban farmers to make more efficient decisions and reduce production losses.

Keywords: Agricultural Policy, Agriculture, Database, Scientific Innovation, Information Technology and Development

INTRODUCCIÓN

La seguridad alimentaria es un desafío urgente en las ciudades, particularmente en zonas urbanas donde la escasez de alimentos saludables se intensifica por elementos financieros, sociales y ecológicos. La crisis del hambre mundial persiste de forma inquietante: solo en 2023, alrededor de 733 millones de personas no tuvieron suficiente qué comer, lo que deja claro que los esfuerzos por erradicar este flagelo aún están lejos de ser suficientes (FAO, 2024). A esto se suma el crecimiento acelerado de las ciudades, que cada vez pone más presión sobre el método de generación y reparto de suministros alimentarios. Actualmente, por encima del cincuenta por ciento de integrantes de la sociedad global viven en entornos urbanos, estimándose que este nivel llegará al 68% hacia el 2050. Este fenómeno derivará en una necesidad creciente de alimentos, dificultades de logística más severas y un riesgo más alto de sufrir crisis en las cadenas de suministro (United Nations Department of Economic and Social Affairs Population Division, 2018).

En este contexto, el cultivo en zonas urbanas se ha afianzado como una opción tangible para optimizar la seguridad alimentaria, ya que permiten producir alimentos cerca de donde se consumen, fomentan prácticas más sostenibles y ayudan a cambiar hábitos de consumo. Históricamente, el cultivo en zonas urbanas ha aparecido como una reacción frente a diversas crisis políticas, sociales, económicas y ambientales, apoyando la subsistencia de comunidades enteras y atenuando las consecuencias de cortes en el abastecimiento de víveres. Asimismo, se ha comprobado que los huertos pueden elevar el nivel nutricional familiar, generar ahorros en el hogar y darles uso a espacios de la ciudad que de otra forma quedarían desaprovechados, como terrenos no edificables.

Sin embargo, en muchos países, incluyendo Colombia, esta práctica todavía se encuentra en una etapa inicial y por lo general no cuenta con un respaldo sólido por parte de políticas públicas ni con el uso sistemático de herramientas tecnológicas que faciliten su seguimiento. A este panorama se le añade un contexto metropolitano progresivamente perjudicado por la crisis climática, lo cual pone en peligro la prosperidad y la resiliencia de las grandes urbes, volviendo imperativo el desarrollo de medidas fundamentadas en hechos fidedignos (United Nations Human Settlements Programme, 2024). En particular, este estudio se enfoca en Bogotá D.C. como contexto urbano de referencia, donde el espacio residencial es limitado y la dependencia del abastecimiento externo hace que valga la pena fortalecer iniciativas de agricultura urbana con apoyo tecnológico.

Para abordar esta necesidad, se hace una investigación que emplea una perspectiva exploratoria y descriptiva, fundamentado en el examen bibliográfico, evaluación de casos e inspecciones presenciales en huertas, sectores residenciales, con el objetivo de evaluar las condiciones y prácticas tecnológicas aplicadas al cultivo. Se pretende diseñar un sistema de observación empírica que posibilite el seguimiento continuado de las variables ambientales y del comportamiento de las plantas a través del tiempo, permitiendo detectar problemas de forma anticipada y elevar la eficiencia de la producción. Es una herramienta técnica que produce información relevante a través de la verificación de las variables y rangos de operación en entornos urbanos reales, esto permitirá establecer un esquema de apoyo que es posible aplicar para la elección de alternativas y a diferentes escalas de producción. Al relacionar la agricultura urbana con las innovaciones tecnológicas a través de un enfoque basado en la evidencia, esta propuesta favorece el debate sobre el desarrollo urbano sostenible, la justicia comunitaria y la adaptación al

cambio climático. Con el fin de ratificar su operatividad, el montaje y las pruebas del prototipo se desarrollaron en el municipio de San Francisco (Cundinamarca), empleando un contexto residencial del municipio de San Francisco para la validación del modelo, el cual fue diseñado para ser aplicable a las condiciones urbanas de Bogotá D.C.

1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El objetivo del presente proyecto es crear un prototipo de control y seguimiento que permita medir cómo evolucionan las variables ambientales y cómo lo hacen los cultivos con el paso del tiempo. De esta forma, se podrán detectar de forma temprana posibles problemas y se incrementará la productividad. Aunque este proyecto es una demostración técnica, también generará información útil gracias a la validación de variables y de rangos de operación en entornos urbanos reales.

El presente proyecto contribuirá al debate sobre el desarrollo urbano sostenible, la equidad social y la adaptación al cambio climático, vinculando la agricultura urbana con la tecnología desde una perspectiva basada en la evidencia. La situación actual se refleja en las estadísticas globales. El informe SOFI (Estado de la Seguridad Alimentaria y Nutricional en el Mundo) de 2024 indica que cerca de 733 millones de personas padecieron hambre en el mundo durante el año 2023 (FAO, 2024). Igualmente, SOFI 2025 indicó que cerca de 673 millones de individuos padecieron hambre durante el transcurso de 2024, mostrando que, aunque existen variaciones, el problema continúa siendo masivo y persistente (FAO, 2025b). También, es importante resaltar que la inseguridad alimentaria (moderada o severa) afecta a una parte muy considerable de la población mundial. El

informe SOFI 2025 afirma que aproximadamente 2,300 millones de individuos experimentaron esta situación en el año 2024 (UNICEF, 2025).

Este estudio nace de la necesidad de comprender cómo la agricultura urbana puede dar respuesta a las crisis alimentarias y medioambientales que se están viviendo en las ciudades. En la capital colombiana, el rápido crecimiento de la ciudad junto con los cambios climáticos, han ido disminuyendo los espacios de cultivo, además del ajuste ante la transformación climática tradicionales de cultivo. A esto se suma el hecho de que la ciudad dependa en gran medida de alimentos que vienen de afuera, lo que hace de la seguridad alimentaria un tema urgente e ineludible. La agricultura urbana aparece como una salida viable, pero no está exenta de obstáculos: el espacio es reducido, las condiciones ambientales son difíciles de manejar y, hasta ahora, no ha existido una visión de conjunto que tome en cuenta tanto el contexto local como los recursos realmente disponibles.

A escala nacional, la falta en la seguridad alimentaria persiste como un reto significativo. En los hogares de Colombia, la tasa de insuficiencia alimentaria moderada o crítica llegó al 25,5% durante 2024; en cabeceras (zonas urbanas) fue del 23,0%, lo cual confirma que el problema también es significativo en el contexto urbano (FAO, 2025a). En el caso local, Bogotá ha mostrado mejorías recientes, pero la problemática consiste: La tasa de familias con inseguridad alimentaria de nivel moderado o grave descendió del 21,2% (2023) al 13,9% (2024). Tal reducción implica una mejora; pero, aun así, existe un grupo importante de hogares en situación de vulnerabilidad (Comunicaciones BCV, 2025).

Las huertas urbanas no solo sirven para sembrar y cosechar, sino que son puntos de encuentro social en los que las personas aprenden en grupo y se crea una comunidad. Sin embargo,

esa dimensión social no es la única que puede solucionar el problema de base: existen muchos hogares que ahora mismo no saben cómo van a conseguir comida y esta es una realidad que no tiene una respuesta sencilla. Por lo tanto, se hace cada vez más necesario desarrollar estrategias que permitan utilizar de forma más eficiente los recursos existentes y que aseguren un acceso a la comida de manera más continua y saludable.

Este proyecto propone, por lo tanto, algo en particular: un prototipo de siembra y cosecha con una perspectiva tecnológica adecuada frente a las circunstancias auténticas del medio urbano. La meta de este modelo es respaldar el monitoreo de los parámetros ecológicos de la siembra y ayudar a que la actividad agraria en las urbes resulte más efectiva y sustentable.

1.1 Descripción del problema

La garantía alimentaria y el fomento de una actividad agrícola perdurable son desafíos que desconocen fronteras; se experimentan a escala global y en la vida diaria de cada ciudad y comunidad. La persistencia del hambre a nivel mundial demuestra las presiones estructurales a las que se enfrentan los sistemas alimentarios.

En el contexto latinoamericano y particularmente en el colombiano, dichos obstáculos se agudizan, producto de una desigual de distribución de los alimentos, las repercusiones del clima y las limitaciones de la capacidad productiva de las comunidades. En el transcurso de 2024, se reportó que el 25.5% de las familias padecían escalas medias o agudas de inestabilidad alimentaria, llegando el nivel grave hasta el 5.0%. Los datos indican la necesidad de implementar planes alimentarios sostenibles con sistemas de seguimiento y evaluación (DANE, 2025). En áreas urbanas la prevalencia alcanzó un 23,0%, reforzando la necesidad de implementar intervenciones

específicas en este ámbito (FAO, 2025). A pesar del desarrollo urbano continuo de Bogotá D.C. y de las limitaciones que impone su clima, la carencia de patrones constituye uno de los impedimentos más importantes productivos y sostenibles de agricultura. Aunque los indicadores muestran progresos en los últimos años, el desafío sigue siendo un problema. El porcentaje de hogares en situación de inseguridad alimentaria moderada y grave disminuyó del 21,2% en 2023 al 13,9% en 2024 (Comunicaciones BCV, 2025). Teniendo en cuenta el paisaje descrito en el párrafo anterior, la agricultura en el ámbito urbano presenta una interesante opción como solución, aunque su ejecución no es nada fácil, y es que el desconocimiento técnico, los errores a la hora de planificar correctamente y la ausencia de los correctos instrumentos tecnológicos para las ciudades son y serán problemas reales.

La tecnología en la agricultura urbana inteligente permite controlar la temperatura, humedad, presión atmosférica, etc., de forma que queda registro de la información, sirviendo de fuente de pruebas para el momento de decidir. Así, un modelo experimental a partir de un prototipo puede llegar a convertirse en dispositivos para enfrentar dificultades de la seguridad alimentaria urbana, facilitando prácticas más eficientes, sostenibles y replicables.

1.1.1 Problema concreto

En Bogotá las herramientas tecnológicas para la agricultura urbana que existen rara vez están pensadas para sus condiciones particulares y esto limita lo que tanto las comunidades como las instituciones pueden hacer. A esto se suma la dificultad para identificar qué variables ambientales importan y cuáles son los rangos adecuados según cada cultivo, lo que termina afectando el rendimiento. Y sin un sistema que permita monitorear, registrar y evaluar de manera

integrada, adaptar las prácticas agrícolas al clima local y a los recursos disponibles se vuelve una tarea casi imposible.

Por lo anterior, una solución tecnológica innovadora permite fortalecer la agricultura urbana en Bogotá, proporcionando apoyo basado en evidencia sobre condiciones de cultivo, monitoreo de variables ambientales y buenas prácticas, con el propósito de incentivar el cultivo y el abastecimiento complementario de productos agrícolas en el hogar.

1.2 La pregunta de investigación

¿Cómo puede diseñarse y validarse un modelo experimental tecnológico para la seguridad alimentaria urbana, mediante una evaluación de un prototipo de monitoreo ambiental, que permita monitorear variables en cultivos seleccionados y generar evidencia aplicable para la toma de decisiones en entornos urbanos?

1.3 Objetivos de investigación

Este trabajo está orientado por un objetivo general y tres objetivos específicos, que se exponen seguidamente.

1.3.1 Objetivo general

Evaluar y validar un modelo experimental tecnológico para la seguridad alimentaria urbana, mediante un prototipo orientado al monitoreo de variables ambientales del cultivo, con el fin de generar evidencia para apoyar la toma de decisiones y contribuir a mejorar la producción de alimentos en entornos urbanos.

1.3.2 Objetivos específicos

- Identificar los factores determinantes para el crecimiento de las plantas en agricultura urbana, definiendo las variables ambientales clave a monitorear en cultivos seleccionados.
- Desarrollar una base de datos que registre las variables ambientales y rangos de referencia para los cultivos seleccionados en un entorno urbano, considerando las condiciones climáticas locales con el fin de proporcionar orientación precisa para la agricultura urbana sostenible.
- Diseñar, implementar y validar el prototipo de siembra y cosecha, mediante pruebas experimentales en el municipio de San Francisco (Cundinamarca) como escenario de validación y estableciendo criterios de adaptación para su aplicación en Bogotá D.C. como contexto urbano objetivo.

1.4 Justificación de la investigación

La relevancia de esta investigación reside en que aporta elementos innovadores para los investigadores y, además, favorece la elaboración o el fortalecimiento de políticas públicas vinculadas a la alimentación en las ciudades. En términos generales, la precariedad de las redes de abastecimiento y la desnutrición ponen de manifiesto la necesidad de respuestas urbanas basadas en evidencia; de hecho, la ONU informó que cerca de 673 millones de personas sufrieron hambre en el año 2024, lo que confirma que la crisis alimentaria es un problema recurrente (FAO, 2025b)

La relevancia para la comunidad científica. En el contexto de la investigación universitaria, se busca contribuir al desarrollo de la disciplina de los cultivos inteligentes en la

ciudad. El propósito es desarrollar un equipo de prototipo a partir de la propia tecnología y que utilizará un modelo de partida de cultivo y recogida. En este modelo se llevará a cabo una monitorización constante de las variables del ambiente y de la organización, que irá registrando los datos que se vayan generando. La aportación científica que se obtendrá, más allá de la explicación del funcionamiento del sistema, se transformará en el conocimiento aplicado. Este último será el resultado de: (1) una base de datos que contendrá los parámetros y los valores de referencia de las especies que se van a cultivar; (2) un sistema de análisis que permitirá establecer relaciones entre distintos ambientes, diagnosticar los problemas que se pueden generar y controlar el crecimiento de la plantación; y (3) unas pautas para poder adaptar el modelo a las distintas situaciones urbanas. Todo esto permitirá que el método sea reproducible y abra líneas de investigación en el cultivo en la ciudad, el IoT en las áreas de producción urbana y la producción vegetal en un entorno controlado y comparable.

Relevancia para políticas públicas. La carencia alimentaria en Colombia representa una dificultad medible que ha persistido de forma continua. Durante 2024, la proporción de hogares con inseguridad nutricional moderada o crítica fue del 25,5%, y el índice de afectación grave subió del 4,8% al 5,0% entre 2023 y 2024. Tal escenario resalta la urgencia de aplicar planes duraderos que incorporen parámetros de monitoreo comprobables (DANE, 2025). En el ámbito distrital, Bogotá ha registrado progresos de relevancia, como entre 2023 y 2024, la inseguridad alimentaria moderada y grave decreció desde el 21,2% hasta el 13,9%. No obstante, preservar y focalizar estos éxitos precisa de mecanismos que favorezcan el monitoreo, el aprendizaje y determinaciones fundamentadas en evidencias (Secretaría Distrital de Integración Social, 2025). El modelo planteado puede ser una herramienta en términos técnicos para proyectos de agricultura urbana,

educación ambiental, suministro y resiliencia; ya que ofrece indicadores medibles, seguimiento de variables clave y soporte de información para priorizar las acciones.

Asimismo, la relevancia de esta iniciativa se acrecienta ante el peligro metropolitano derivado del cambio climático. ONU-Habitat ha señalado que los núcleos urbanos se sitúan en la vanguardia de la exposición ante los impactos de esta crisis climática (tales como periodos de calor extremo, anegaciones y sequías), lo que perjudica sistemas ciudadanos esenciales y demanda acciones fundamentadas en pruebas para alcanzar la resiliencia y la sustentabilidad (United Nations Human Settlements Programme, 2024).

Este proyecto pretende facilitar la vida de las comunidades urbanas, simplificando el acceso a una herramienta tecnológica de fácil comprensión y replicable. Esta herramienta sirve de apoyo para el cultivo en espacios limitados, optimiza el uso de los recursos (agua/energía) y reduce las barreras técnicas para quienes no tienen experiencia previa. Disponer de monitoreo y criterios de decisión robustece las capacidades comunitarias, fomenta prácticas sostenibles y aporta a la autonomía alimentaria como estrategia complementaria ante la inseguridad alimentaria urbana.

2 MARCO DE REFERENCIA

En el presente capítulo se analiza la seguridad alimentaria bajo una perspectiva integral, exponiendo su relevancia a escala internacional y cómo la tecnología logra formar parte de la respuesta. Se explora cómo la innovación en este campo abre posibilidades reales para mejorar la vida en las ciudades, ya sea facilitando el acceso a los alimentos, optimizando su producción o permitiendo un mejor seguimiento de los cultivos. Para sustentar esto, se revisa literatura científica

y académica sobre la seguridad alimentaria, agricultura urbana y tecnologías aplicadas al agro, prestando atención a sus alcances y a lo que implican en la sociedad.

2.1 Estado del arte

2.1.1 Bases para una idónea protección alimentaria

Según Bianchi y Szpak (2009), la seguridad alimentaria es algo que se empezó a preocupar después de la Segunda Guerra Mundial. En ese momento, se vio que había problemas para conseguir alimentos. Entonces, varios países decidieron producir más alimentos para no depender tanto de otros países.

Más adelante, en la década de 1970, el clima no ayudó y la producción de alimentos se vio afectada en muchos lugares. Esto hizo que los países tuvieran que importar más alimentos, lo que aumentó los precios. Fue entonces cuando se celebró la Conferencia Mundial sobre la Alimentación en 1974, que buscaba encontrar soluciones para garantizar el suministro de alimentos a nivel global.

Al principio, la seguridad alimentaria se entendía como tener suficientes alimentos disponibles. Por eso, se centraron en producir más y asegurar que hubiera alimentos. Sin embargo, con el tiempo se dio cuenta de que no era solo cuestión de tener alimentos, sino también de que la gente pudiera acceder a ellos. Ahora, la seguridad alimentaria también se relaciona con derechos fundamentales de las personas incluyen garantizar una nutrición apropiada, abarcando no únicamente la existencia de alimentos, sino también su accesibilidad y el bienestar integral de la población.

2.1.2 Panorama actual de la inseguridad alimentaria

Mundialmente, la falta de seguridad alimentaria se mantiene como un desafío crítico. En 2008 se reportó que habían pasado hambre y desnutrición unas 963 millones de personas, lo cual representaba un incremento de aproximadamente 40 millones respecto al ejercicio previo. Lo que pasó fue que esto se debió a varios factores que coincidieron: la crisis económica de ese entonces, el encarecimiento de los suministros para el campo y las consecuencias de la crisis climática. Todo esto junto generó una situación que realmente necesitaba respuestas coordinadas a nivel internacional.

De hecho, aunque muchos países se comprometieron a través de diferentes agendas globales a combatir el hambre, los avances no han sido suficientes. Ciertamente, aún resta una labor considerable para asegurar que los ciudadanos cuenten con una disponibilidad constante de víveres sanos y nutritivos. Y esto sigue siendo un desafío importante que no se puede dejar de lado.

Entre las razones que justifican la subida del hambre son significativas la reducción de la asignación de recursos económicos para programas agrícolas; El alza de precios en abonos, semillas y forrajes, más los impactos adversos del cambio climático sobre la provisión de suelos arables, agua y biodiversidad agrícola. Asimismo, la expansión de fronteras agrícolas asociada a la demanda de biocombustibles puede intensificar la presión sobre ecosistemas y recursos naturales. En consecuencia, se recomienda fortalecer la inversión en agricultura principalmente en naciones de renta baja e intensificar el estudio de debilidades climáticas y productivas mediante planes de respuesta y una hoja de ruta orientada a reducir la inseguridad alimentaria (Schinca, 2009).

2.1.3 Sostenibilidad agrícola: aportes desde literatura científica especializada

La agricultura en la ciudad ha adquirido gran importancia en varias regiones debido a sus aportaciones a la garantía alimenticia, el equilibrio ambiental y la justicia social. La investigación especializada pone de manifiesto la necesidad de configurar marcos normativos, prácticas creativas y planes de administración que permitan mantener los espacios verdes, promover un uso adecuado del suelo y consolidar la agricultura en la planificación urbana. Además, los estudios abordan las ventajas socioeconómicas y las amenazas ambientales y los asuntos concernientes al bienestar físico de la comunidad.

Por tanto, se destaca la necesidad de utilizar enfoques participativos, involucrar a la ciudadanía y realizar investigaciones multidisciplinarias que refuercen el desarrollo urbano sostenible y den solución a los problemas relacionados ante las alteraciones climáticas, la escasez de medios y la precariedad alimentaria en las ciudades. Desde el urbanismo se piensa que la integración de la agricultura en la ciudad se podría potenciar si se entiende como un uso legal del espacio, si se mantienen las zonas verdes y si se promueven proyectos de usos mixtos que integren componentes ecológicos, como los huertos comunitarios y los cultivos en azoteas.

Por lo tanto, se aconseja modificar o crear los marcos legales que faciliten su puesta en marcha, incluyendo normativas relacionadas con las responsabilidades civiles y la seguridad en el acceso a la tierra. Además, la creación de consejos de estrategias alimentarias permitiría coordinar las respuestas de los gobiernos locales frente a la seguridad alimentaria, generando un mayor nexo entre los distintos actores a nivel local. Desde el punto de vista del diseño urbano, la implementación de principios de equidad y bienestar, por ejemplo, mediante enfoques como el

"urbanismo nutritivo", puede aumentar el impacto social y la sostenibilidad de estas propuestas. Pero no todos los aspectos son positivos.

Algunas prácticas, como el uso de aguas residuales en los cultivos urbanos, implican riesgos que no se pueden ignorar: la exposición a agentes patógenos y sustancias químicas representa un peligro real tanto para los que cultivan como para los que consumen esos productos. En cuanto al impacto ambiental, la acumulación de metales pesados y otros compuestos puede dañar el suelo y los recursos hídricos, perjudicando la diversidad biológica y los ecosistemas naturales. Por ello, se enfatiza la necesidad de una gestión adecuada y el respeto de las normas de protección para reducir al mínimo dichos riesgos (Pearson & Pilgrim, 2010).

2.1.4 Hidroponía en agricultura urbana: modelos de implementación y componentes

Dentro de esquemas hidropónicos como opciones sustentables frente al cultivo convencional, fundamentalmente en ámbitos metropolitanos. En el presente estudio se revisa el desarrollo de la hidroponía y se explican los diferentes métodos de implantación de sistemas cerrados, abiertos, aeropónicos y organopónicos, subrayando que el rendimiento del cultivo depende fundamentalmente de la elección adecuada de los sustratos y de la gestión de los nutrientes. Además, se comunican experiencias positivas en Colombia destinadas a aumentar la disponibilidad de alimentos y la nutrición en las ciudades, con implicación comunitaria, y se tienen en cuenta aspectos técnicos mediante la organización del equipo, la gestión eficaz del agua y la incorporación de la ingeniería mecánica para la automatización de procesos.

Para la agricultura urbana, la hidroponía constituye una alternativa factible y redituable debido a que utiliza los recursos de manera eficiente y puede tener efectos positivos en el ámbito

social y económico. El autor compara la hidroponía con el cultivo convencional en tierra, y menciona las ventajas de la primera: superior optimización del consumo hídrico; factibilidad de ubicación en entornos de dimensiones limitadas como terrazas o paredes; mayor densidad de siembra por unidad de superficie y disminución del trabajo físico. La producción puede ser constante durante todo el año, y los productos obtenidos como hortalizas, flores y plantas medicinales tienen mayor calidad, pues se aprovecha al máximo el agua y los nutrientes. Al comparar la hidroponía con el cultivo en suelo, el autor señala como ventajas de la hidroponía: mayor eficiencia en el uso del agua; posibilidad de establecerse en espacios pequeños como azoteas o superficies verticales; mayor concentración de cultivos por unidad de superficie y menor trabajo físico. Asimismo, el sistema hidropónico posibilita cosechas ininterrumpidas en cualquier estación. Los elementos recolectados son hortalizas, flores y plantas medicinales que gozan de una excelencia superior, pues se optimiza el empleo del agua y los nutrientes.

El autor sostiene que la categoría de suelo empleada afecta el crecimiento de las plantas, pues el suelo condiciona las propiedades químicas y físicas del medio. Por ejemplo, sustratos como la grava o la escoria dan lugar a más oxígeno en las raíces, más pueden tener problemas para distribuir el agua; mientras que los sustratos orgánicos, como la cáscara de arroz, se degradan poco a poco y son estables. De manera general se recomienda usar un sustrato ligero, inerte y con buen drenaje. Puesto que el soporte de cultivo condiciona la facultad de almacenar humedad, la oxigenación en el área radicular y, por consiguiente, el progreso de los vegetales (Forero et al., 2011).

2.1.5 Modelos de simulación para el análisis y la planificación agrícola: revisión de enfoques

El autor menciona que la modelación participativa aumenta la calidad y aceptación de las decisiones, porque los actores involucrados (productores) forman parte del proceso de construcción del modelo. La participación de los actores permite incorporar sus conocimientos locales en el modelo, ajustar supuestos y aumentar la apropiación de las estrategias resultantes, lo que favorece la implementación de acciones o políticas basadas en evidencia.

La referencia citada previamente posee gran valor para este trabajo, pues sustenta la aplicación de datos cuantificables y rastreables al valorar el estado del ambiente de cultivo y comparar escenarios como base para apoyar decisiones en agricultura urbana instrumentada. La modelación participativa aumenta la calidad y aceptación de las decisiones porque involucra a los actores clave (por ejemplo, productores) en el proceso de construcción del modelo. La participación de los actores permite incorporar sus conocimientos locales en el modelo, ajustar supuestos del sistema y aumentar la apropiación de las estrategias resultantes, lo que favorece la implementación de acciones o políticas basadas en evidencia. Este precedente es fundamental para el análisis actual, pues justifica el empleo de datos cuantitativos y rastreables para evaluar condiciones del entorno de cultivo y comparar escenarios como base para apoyar decisiones en agricultura urbana instrumentada.(Martínez Candelaria et al., 2011).

2.1.6 Innovación tecnológica y sustentabilidad agroambiental: retos y perspectivas

Los autores Gavito et al. (2017), analiza la evolución y los desafíos de las ecotecnias y las novedades enfocadas en la sostenibilidad dentro de México, destacando que para solucionar

problemas socio-ecológicos complejos se requiere colaboración transdisciplinaria, Incorporación de factores sociales, ambientales y tecnológicos junto al involucramiento de la colectividad. El autor destaca como ejes principales el desarrollo de la modelación espacial, la puesta al día de los inventarios de suelo, así como el fomento de métodos sustentables en la administración agraria, silvícola y pecuaria, con el objetivo de reducir los impactos perjudiciales en el entorno y fortalecer la adaptación ante el cambio climático. Asimismo, enfatiza la importancia del conocimiento, el seguimiento participativo y la equidad social como factores fundamentales para la difusión de las ecotecnologías y la consolidación de sistemas más resilientes, en sintonía con las metas de desarrollo sustentable y preservación del entorno natural.

Además, el autor señala que el uso de equipos de trabajo interdisciplinarios fortalece el trabajo cuando se utilizan metodologías para recolectar datos, intercambiar conocimiento y aprender de la experiencia. En parte, esto es posible porque las metodologías, resultados y lecciones aprendidas de cada proceso se documentan sistemáticamente, para que todos los actores tengan la misma visión y actúen de manera coordinada.

El autor desde esa perspectiva propone crear esquemas de investigación-acción participativa y programas de educación con base en el contexto social y cultural de cada comunidad. El autor observa en el análisis de proyectos de reforestación comunitaria que todos los proyectos de reforestación que han sido exitosos poseen algo en común: la participación de la población, la capacitación que reciben y el seguimiento adecuado del crecimiento y la supervivencia de la vegetación. Asimismo, utilizan técnicas de resguardo ecológico, como la rehabilitación del terreno y la selección de especies adecuadas.

El autor también indica que los resultados son más significativos y los proyectos son más viables en el tiempo cuando las comunidades y las instituciones científicas colaboran de manera permanente. Esta premisa tiene relevancia para este estudio, ya que establece la integración de la tecnología, el monitoreo constante y la participación social en las iniciativas urbanas enfocadas en la sostenibilidad y la resiliencia, estableciendo la necesidad de generar evidencia para sustentar la toma de decisiones.

2.1.7 Supervisión e irrigación mediante herramientas técnicas en cultivos citadinos: una implementación práctica.

El seguimiento y riego automático se refiere a la aplicación de la tecnología de precisión en la agricultura (sensores, IoT, drones y herramientas WebGIS) en el entorno agrícola tanto urbano como tradicional. El autor hace referencia a las experiencias de Colombia y Brasil. El autor destaca propuestas orientadas a mejorar la gestión de la agricultura, controlar los factores del entorno y promover prácticas sostenibles mediante plataformas como AGRODROYD. AGRODROYD es una plataforma que integra los datos de los sensores y los presenta a través de interfaces digitales (móvil y web) para facilitar el seguimiento de los cultivos y la interacción con la comunidad.

En cuanto al cultivo de remolachas en zonas urbanas, se detalla el seguimiento de indicadores críticos como la temperatura, el pH y la humedad relativa por su importancia en el crecimiento de las plantas. Estos datos se transmiten de forma inalámbrica a través de una red local a una plataforma web, lo que garantiza una supervisión continua. En general, AGRODROYD se presenta como un sistema que optimiza la gestión del cultivo al proporcionar información en

tiempo real, simplificando el proceso de toma de decisiones y la gestión del contexto, lo que da lugar a prácticas más eficientes y mejor informadas (Andres Perafan, 2018).

2.1.8 Agricultura urbana inteligente basada en IoT: arquitectura y funcionamiento general

Mediante una aplicación para dispositivos móviles y una plataforma web, el cultivador urbano es capaz de controlar y gestionar diversas variables operativas como la iluminación, el nivel del agua, la temperatura, el pH y la concentración de nutrientes. Esto se logra a través de una infraestructura inteligente y unificada (hidropónica, IoT y computación en la nube) que permite la automatización de todas estas funciones. Con este método, se disminuye la carga operativa y se simplifica la gestión del cultivo para los agricultores urbanos.

La arquitectura desarrollada tiene integrada una serie de sensores que proporcionan datos en vivo y en tiempo real. La unidad de procesamiento está construida sobre un microcontrolador ESP32 y ofrece conectividad para el control remoto y la puesta en marcha de comandos. Los autores validaron con éxito el funcionamiento de los sensores y componentes de automatización, y también comprobaron que el sistema respondía correctamente a los cambios en las condiciones ambientales (temperatura, nivel del agua) y al aporte controlado de nutrientes. Por otro lado, se hace referencia a la necesidad de recalibrar ciertos sensores con el fin de aumentar su grado de precisión, haciendo hincapié en la importancia de la metrología para lograr una implementación práctica.

La automatización de procesos repetitivos y la disponibilidad de datos en tiempo real, para poder monitorizar mejor el funcionamiento del sistema hidropónico y tomar decisiones de carácter

operativo, son fundamentales. El sistema de control contrasta los datos obtenidos de los sensores (pH, TDS, lux y temperatura) con los valores o parámetros que fueron definidos previamente.

Del mismo modo, el microcontrolador envía órdenes a los actuadores (bombas, ventiladores o luminarias) para ajustar las condiciones del sistema (nutrientes, iluminación o temperatura) y asegurar que el cultivo se mantenga dentro de los rangos de operación. Se informan tiempos de respuesta aproximados de los sensores durante la calibración y las pruebas, lo que permite evaluar la capacidad del sistema para reaccionar oportunamente a las variaciones del entorno. Esta referencia bibliográfica beneficia al análisis vigente pues muestra una estructura IoT que emplea tecnología ESP32 para labores de seguimiento y regulación. De igual forma, acentúa la trascendencia de la calibración, el rastreo de datos y la observación inmediata para fortalecer la administración de la producción agrícola (Zuraiyah et al., 2019).

2.1.9 Huertas urbanas como estrategia de resiliencia en zonas urbanas

De acuerdo con Urías Borbón y Ochoa de la Torre (2020), esta investigación se centra en el estudio de las múltiples dimensiones de la agricultura urbana y periurbana, priorizando el desarrollo de huertos urbanos y su contribución a la sostenibilidad, resiliencia y seguridad alimentaria en ciudades, principalmente en América Latina y países en desarrollo. Es importante señalar que las zonas verdes no sólo promueven la producción de alimentos a nivel local, sino que además fortalecen la relación social, aumentan las posibilidades económicas y mejoran el entorno. Sin embargo, el autor subraya que se enfrentan a constantes dificultades en la gestión de los recursos, la presencia de normas reguladoras adecuadas y el grado de apoyo institucional que es necesario para su mantenimiento.

Desde el punto de vista social, los huertos urbanos se presentan como lugares que favorecen la comunicación entre los individuos de la comunidad y el sentimiento de pertenencia. Esto es factible debido al estímulo de las relaciones cooperativas, las responsabilidades conjuntas y las iniciativas colectivas dirigidas al avance local. La agricultura urbana proporciona varios beneficios medioambientales. Algunas de estas incluyen la protección de los recursos hídricos y terrestres, el incremento de la biodiversidad, la mejora de la calidad del aire y la estabilidad de los microclimas de la zona.

Además, la incorporación de vegetación en los entornos urbanos contribuye a mitigar el efecto de las islas de calor gracias a la sombra y los microclimas favorables, y también facilita los ciclos de recuperación y reutilización de materiales y energía en el territorio.

Así, con una organización adecuada y la participación de los ciudadanos, la agricultura en las ciudades podría ser una herramienta eficaz para promover metrópolis más sostenibles, resilientes e inclusivas. El objeto de esta investigación es el análisis de la agricultura urbana y periurbana, una práctica muy compleja y diversa, que da prioridad a la promoción de los huertos urbanos y el apoyo a la sostenibilidad, la resiliencia y la seguridad alimentaria en las ciudades.

Entre ellos destacan la fijación de los recursos hídricos y terrestres, el aumento de la variedad biológica, la optimización de la pureza del aire y la estabilización de los microclimas locales. Además, la adición de vegetación a los entornos urbanos ayuda a reducir el impacto de las islas de calor a través de la sombra y los microclimas favorables, y también facilita los ciclos de recuperación y reutilización de materiales y energía dentro del territorio. Así pues, mediante una organización adecuada y la participación de los ciudadanos, la actividad agrícola urbana puede

convertirse en una herramienta eficaz para fomentar metrópolis con mayor sostenibilidad, resistencia e inclusión.

2.1.10 Agricultura doméstica a pequeña escala: dispositivos tipo “matera inteligente”

Los autores Chaparro & Criado (2020), el diseño de macetas inteligentes es una sugerencia de método para promover la agricultura urbana, de pequeña escala y para uso doméstico, enfocada en el cultivo autónomo de vegetales, hortalizas y flores. La propuesta de esta iniciativa se centra en el uso de la tecnología de sensorización y automatización para monitorear variables ambientales; asimismo, se incorporan herramientas de IA y aprendizaje supervisado para mejorar las condiciones de los cultivos a partir de la experiencia anterior y los parámetros agroecológicos. Este enfoque está diseñado de forma específica para aprovechar los espacios disponibles en los hogares (terrazas o patios, por ejemplo) y para facilitar la producción de alimentos frescos que pueden contribuir a garantizar la seguridad alimentaria en entornos con recursos limitados.

Desde el punto de vista de la tecnología, el diseño que se presenta es el de un sistema automático para vigilar las variables (temperatura, humedad, pH, etc.) y los sistemas de vigilancia visual por cámaras. La administración de la temperatura se piensa realizar con la ayuda de un flujo de agua caliente (eléctrico) y se tiene en cuenta el desarrollo de un control del pH, con el soporte de la recolección y el análisis de datos a través de la IA.

La fusión de electrónica, control, modelado 3D y aprendizaje automático se destaca como un elemento clave para lograr condiciones de crecimiento más estables y reducir la carga operativa del usuario. En relación con la contribución, el autor propone que este tipo de soluciones promueve la disponibilidad de alimentos en el hogar al permitir el cultivo en espacios reducidos y reducir la

dependencia de compras externas. Además, la monitorización y el ajuste automático de variables ambientales pueden mejorar la continuidad del cultivo y generar cosechas más constantes. Este precedente es relevante para el presente estudio porque resalta la importancia de la monitorización instrumentada y de la gestión basada en datos para el seguimiento del cultivo urbano, aunque el prototipo desarrollado en este trabajo se enfoca más en la monitorización y trazabilidad que en el control automático.

2.1.11 Agricultura urbana y economía local: evidencias de dinamización y beneficios

La tendencia de la población urbana está creciendo rápidamente en las próximas décadas. El crecimiento de la población urbana va de la mano de un aumento de la industrialización, que atrae a la gente a las ciudades por sus oportunidades, creando nuevas formas de vida territorial y social. Entre las consecuencias del crecimiento de la población urbana y la industrialización se encuentra la disminución gradual de las zonas periféricas que tienen suelos fértiles, lo que restringe el uso de la tierra cerca de las ciudades para producir alimentos y modifica las condiciones relacionadas con la calidad de vida.

A los desafíos anteriores se añaden los que debe afrontar el sector agrícola debido a la disminución de la tierra disponible cerca de los centros urbanos y la reducción de la mano de obra agrícola con el tiempo. Como respuesta a estos problemas, las comunidades urbanas, especialmente de estratos medios y bajos, han buscado alternativas para mejorar su seguridad alimentaria y generar ingresos adicionales. La agricultura urbana se presenta como una alternativa para generar una mayor seguridad alimentaria y, en algunos casos, una mayor estabilidad

económica, utilizando pequeños espacios en zonas urbanas o en el hogar (patio, terraza o zonas disponibles) (Santos Martínez, 2021).

La agricultura urbana se ha convertido en un enfoque importante para el abastecimiento y el desarrollo de la seguridad alimentaria en las ciudades, ya que permite a los residentes de las ciudades acceder a alimentos frescos y, en muchos casos, cultivados utilizando técnicas de gestión doméstica tales como el uso de fertilizantes orgánicos. La agricultura urbana también fomenta una cultura ecológica dentro de las comunidades urbanas, animando a la gente a establecer y restaurar áreas verdes, que son fundamentales para la sostenibilidad de la ciudad y para establecer una relación más saludable entre la gente y el medio ambiente.

2.1.12 Identificación de sitios para agricultura urbana mediante modelos 3D y análisis urbano

En entornos urbanos de alta densidad, como el ejemplo de Singapur, la combinación de modelos urbanos tridimensionales (3D) y datos ambientales ofrece una evaluación más precisa del potencial de la agricultura urbana. Estos métodos permiten simular parámetros fundamentales para el desarrollo de cultivos, como la exposición a la radiación solar, la proyección de sombras por parte de los edificios y las condiciones meteorológicas, con el objetivo de identificar las ubicaciones óptimas para establecer huertas o sistemas de producción. Sin embargo, este enfoque presenta limitaciones.

A pesar de que algunos modelos tienden a simplificar la realidad, que los datos meteorológicos pueden contener errores y que aún existen dificultades para medir la variación de la luz a lo largo del día, la investigación muestra que la combinación de modelos 3D detallados

con datos de campo puede ser muy útil para identificar los lugares óptimos para el cultivo y establecer las mejores estrategias de implementación.

Esto nos permitirá avanzar hacia una producción de alimentos más sostenible en ciudades muy pobladas. También es importante destacar la necesidad de emplear software de código abierto y metodologías reproducibles para ampliar la planificación de la agricultura urbana y facilitar su uso en diversos entornos (Palliwal et al., 2021).

2.1.13 Tendencias y enfoques actuales de agricultura urbana inteligente

Para Aciksoz y Dal (2021), la investigación se focaliza en el panorama de la agricultura urbana y sostenible, evidenciando que las técnicas innovadoras de agricultura urbana y sostenible se han visto potenciadas con la inclusión de técnicas innovadoras, como la agricultura vertical, los tejados verdes o la incorporación de tecnologías de agricultura inteligente.

Estas técnicas integran las tecnologías de última generación como la hidroponía, la aeroponía o los sistemas basados en TIC con el propósito de incrementar la producción de alimentos en la ciudad, favorecer la seguridad alimentaria, reducir los efectos ambientales negativos o aumentar la capacidad de adaptación al cambio climático. Sin embargo, también se presentan dificultades significativas, tales como los elevados costos de inversión inicial, la necesidad de mantenimiento técnico o las necesidades de infraestructura, por lo cual se recomienda una visión integral que incluya políticas públicas, planificación urbana, la correcta infraestructura y la colaboración de diferentes actores con el objetivo de consolidar las prácticas de forma sustentable.

En concreto, los tejados verdes y los jardines en las azoteas contribuyen a la resiliencia urbana al convertir superficies infrautilizadas en espacios ecológicos que mejoran las condiciones medioambientales y refuerzan los ecosistemas locales. Además de favorecer la biodiversidad, pueden ayudar a reducir el efecto de isla de calor gracias al aislamiento y la regulación térmica, y se prevé que sean espacios adicionales para la producción de alimentos, especialmente útiles en situaciones de perturbación o crisis urbanas.

2.1.14 Tecnologías emergentes orientadas al objetivo “Hambre Cero” en Colombia

La Inteligencia Artificial (IA), el Machine Learning (ML) y el Internet de las Cosas (IoT) podrían constituir un elemento clave para lograr el objetivo de Hambre Cero en Colombia al optimizar los procesos productivos del sector agrícola, potenciar la monitorización y la toma de decisiones, y colaborar con la mejora de la seguridad alimentaria en los territorios más desfavorecidos. Para los autores Orjuela Santamaria (2021), se evidencia que es esencial consolidar la articulación entre el Estado, el sector privado y las organizaciones internacionales para adecuar la adopción de las tecnologías emergentes a la realidad colombiana. En este sentido, es necesario consolidar alianzas con empresas tecnológicas, garantizar recursos destinados a la investigación y desarrollo, de manera que las innovaciones puedan ser implementadas con mayor pertinencia y sostenibilidad.

Además, se exponen experiencias internacionales de referencia, se identifican desafíos locales como la pérdida de interés en las actividades rurales, las brechas de capacitación y las limitaciones de capacidades técnicas, las cuales deben ser abordadas para una adopción efectiva y equitativa de estas tecnologías.

IBM es un buen ejemplo de cómo se puede aplicar la tecnología, en su proyecto Green Services. Este proyecto usa herramientas de inteligencia artificial para analizar los suelos, predecir el tiempo, y detectar enfermedades en las plantas. Las soluciones que ofrece este proyecto permiten tomar decisiones sobre la fertilización, el seguimiento de las condiciones climáticas y el control del estado fitosanitario mediante un análisis automático, para evitar problemas en el cultivo.

Los desarrollos aquí mencionados, según se ha informado, posibilitan una disminución considerable (hasta en un 90%) del empleo de productos fitosanitarios; potencian la salud natural de las plantas y aumentan la producción de los cultivos (aproximadamente un 20%), al propiciar un aprovechamiento óptimo de los recursos. Los principales obstáculos para la incorporación de tecnologías emergentes en la agricultura colombiana son: la gran inversión inicial necesaria para tecnificar los procesos; la escasa inversión en I+D; y la reducida adopción tecnológica por parte de determinados grupos de agricultores, que con frecuencia se basan en técnicas tradicionales y en la experiencia personal.

Adicionalmente, se evidencian restricciones de infraestructura y de disponibilidad de recursos para desplegar soluciones basadas en IA y en el aprendizaje automático a gran escala. Por ello, se plantea como clave el fortalecimiento de las alianzas estratégicas con las grandes empresas tecnológicas y el acompañamiento institucional y gubernamental para superar las barreras de implementación.

2.1.15 Plataformas digitales y simulación para toma de decisiones en la agricultura

Los autores Jorge Rueda, Juan Hernández y Andres Castillo (2021), la sección que sigue, tiene como fin explicar cómo se construyó y evaluó una plataforma web, que facilita la toma de

decisiones dentro del sector agrícola y ganadero de Santander (Colombia), con el propósito de crear una plataforma usable y fácil de entender, se utilizaron herramientas digitales junto con modelos de dinámica de sistemas.

La apuesta de esta iniciativa es diseñar interfaces de usuario (interfaces user-friendly), seleccionar las herramientas tecnológicas y construir los simuladores que permitan planificar y gestionar de forma táctica las tareas del campo y la crianza de animales de una manera óptima. Esta forma de abordar la ingeniería de software, el análisis de los requerimientos de los usuarios y la modelización tiene un claro objetivo: conseguir que los agricultores y ganaderos de la zona rindan más, asuman más responsabilidad ambiental y sean más eficientes. La herramienta digital mediante modelos de dinámica de sistemas muestra cómo el clima, en su variabilidad, afecta el rendimiento del ganado. Para ello, se estudian las conexiones entre el acceso al agua, el valor nutricional del forraje y el estado de salud de los animales. De esta manera, se puede estudiar las relaciones complejas que existen en el sistema y se pueden probar diferentes situaciones, y así se ayuda a cambiar los programas de gestión en función de cómo el entorno va cambiando. También se establecen los criterios para elegir y clasificar las herramientas digitales que formarán parte de la plataforma. Esos criterios tienen que ver con el interés del contenido, con la autoría, con la actualidad, con la UEM (user-friendliness), con la calidad de la representación, con la cantidad de interactividad, con la adecuación al contexto, etc., y todo ello para que las herramientas digitales que se incorporen ayuden a tomar decisiones.

Se representa el impacto de los cambios de la dinámica climática en la productividad pecuaria a través de la representación de esquemas de dinámica de sistemas de la herramienta digital. Para cumplir con esta finalidad, se analizó el vínculo entre las fuentes de agua disponibles,

el valor nutritivo del forraje y el estado de salud de los animales. Con esta perspectiva se facilitó el estudio de relaciones complejas que se dan dentro del sistema y la valoración de una gran cantidad de escenarios, lo que posibilita ajustar la gestión en función de las modificaciones del entorno.

Se establecen los criterios para seleccionar y clasificar las herramientas digitales a incluir en la plataforma. Los criterios se basan en aspectos como la relevancia del contenido, la autoridad, la actualidad, la facilidad de uso, la calidad de la presentación, el nivel de interactividad y la idoneidad para el contexto, con el fin de asegurar que las herramientas digitales incluidas contribuyan al proceso de toma de decisiones.

2.1.16 Agricultura y transformación digital: datos, conectividad e innovación tecnológica

De acuerdo con Bellon-Maurel et al. (2022), el significado del término "agricultura digital" hace referencia al uso de un conjunto de tecnologías de la información (TI) que son aplicadas a la producción agrícola con el fin de hacerla más sostenible y eficiente a través del análisis de datos, el Machine Learning (ML), Blockchain y la teledetección. La utilización de las tecnologías antes mencionadas puede mejorar la productividad, proporcionar herramientas para una mejor toma de decisiones y, en general, ayudar a gestionar mejor los recursos naturales. Sin embargo, el uso de las tecnologías de la era digital presenta una serie de problemas éticos, sociales y medioambientales.

Algunos de estos problemas son la falta de equidad en el acceso a la tecnología (brecha tecnológica); la dificultad de establecer marcos normativos adecuados para la gobernanza y la propiedad de los datos generados por el uso de la tecnología; y el elevado coste medioambiental

que supone el despliegue de la infraestructura necesaria para el desarrollo de la tecnología. Por todo lo anterior, se recomienda llevar a cabo una investigación transdisciplinar en colaboración con los diferentes actores de la cadena de valor de la producción agrícola (académicos, productores, legisladores, etc.), con el fin de encontrar la forma de crear modelos de producción agrícola más sostenibles. Los avances tecnológicos han proporcionado a los productores, y en particular a los pequeños productores, una forma de comunicarse entre sí, de gestionar mejor sus procesos logísticos y de encontrar nuevas vías de comercialización de sus productos. Así, por ejemplo, los sitios web de venta en línea les permiten ponerse en contacto directamente con sus consumidores, lo que les permite eliminar intermediarios y, por tanto, reducir los costes asociados a la comercialización de sus productos.

Además, los sitios web de venta en línea también les permiten aumentar la transparencia de sus operaciones. Los productores también tienen acceso a información en tiempo real sobre las tendencias del mercado, la predicción meteorológica y el asesoramiento en la gestión de sus explotaciones. Toda esta información les facilita la toma de decisiones y les permite adaptar sus planes de siembra y comercialización a las condiciones cambiantes del mercado. En cuanto al uso de la tecnología Blockchain como herramienta para la trazabilidad de los alimentos, existen una serie de consideraciones éticas de gran importancia: la privacidad y seguridad de la información confidencial; el elevado consumo de energía que se produce con algunos tipos de redes Blockchain (especialmente las redes públicas); y la necesidad de crear una normativa clara para regular el acceso, el control y la publicación de la información. Asimismo, se debe tener en cuenta que la tecnología Blockchain podría excluir a los pequeños productores debido a la complejidad de la tecnología. Por último, se debe hacer hincapié en la importancia de no confiar ciegamente en la

tecnología Blockchain: si bien la tecnología Blockchain puede garantizar la integridad de los datos, no puede garantizar la veracidad de los datos si no existen procesos de verificación y control de calidad.

2.1.17 IoT para monitoreo de variables climáticas en agricultura urbana: implementación típica

La tesis de Chanchí-Golondrino et al. (2022), en el ámbito de la agricultura urbana, los sistemas IoT se emplean para monitorear de forma continua las variables ambientales que influyen en el crecimiento de las plantas, como la intensidad de la luz, la humedad y la temperatura, en la producción de hortalizas (ejemplo, lechugas), a través del uso de sensores. Estas observaciones suelen integrarse en arquitecturas multicapa que incluyen la adquisición, el almacenamiento, el procesamiento y la visualización de los datos.

Esta estructura facilita el monitoreo en tiempo real y la revisión del historial de los datos. Además, algunos métodos utilizan metodologías de aprendizaje automático, incluyendo técnicas de segmentación como K-Means, para identificar patrones, clasificar las condiciones ambientales y predecir comportamientos repetitivos en los datos recopilados. Para concluir, se hace hincapié en que estas soluciones son adaptables a diferentes condiciones agroclimáticas y constituyen herramientas valiosas en la gestión de cultivos, al transformar las mediciones ambientales en información relevante para el seguimiento.

Finalmente, se destaca la importancia de incorporar hardware y software de código abierto, ya que esto ayuda a reducir los costos, a acelerar la puesta en marcha y a fomentar plataformas de monitoreo accesibles y replicables.

2.1.18 ESP32 en agricultura 4.0: control y monitoreo aplicado a entornos tipo invernadero

En ambientes controlados como los invernaderos, se implementaron soluciones de IoT con microcontroladores ESP32 para el seguimiento y automatización de variables críticas del cultivo, especialmente en vegetales como la lechuga. Estas soluciones utilizan diferentes sensores mediante (DHT22, HW-080 y HC-SR04) se obtienen registros de temperatura, humedad atmosférica, humedad terrestre y nivel de agua.

Mediante ESP-NOW, la información es transmitida de manera inalámbrica hacia un nodo central, donde se registran en tiempo real en plataformas en la nube (como Firebase), lo que permite su acceso inmediato y el seguimiento histórico. Además del monitoreo, también se implementan sistemas de control de actuadores (ventiladores, calefactores y bombas de agua), que pueden ser operados de forma remota y/o automática mediante una herramienta para celulares desarrollada en Android Studio. Este enfoque se ajusta a la agricultura 4.0 al digitalizar el proceso, permitir la supervisión en tiempo real y automatizar las acciones de manejo en el invernadero.

Es importante seleccionar los sensores correctos que cumplan con las especificaciones requeridas, y calibrarlos de forma periódica, verificando continuamente el sistema, y ajustándolo automáticamente para que los parámetros se mantengan dentro de los rangos esperados (Berrios Gomez & Rivera Herrera, 2022).

2.1.19 Agricultura vertical y seguridad alimentaria: resiliencia y sostenibilidad del sistema

La integración de tecnologías avanzadas como IoT, automatización, iluminación LED y métodos de cultivo sin suelo como la hidroponía y la aeroponía, según Oh y Lu (2023), las tecnologías como el IoT para la agricultura vertical y la agricultura urbana ofrecen una solución

innovadora para aumentar la productividad de los cultivos, mejorar la eficiencia en el uso de los recursos y promover un sistema de producción sostenible. Estos métodos de producción están diseñados para producir alimentos a nivel local durante todo el año, especialmente en las zonas urbanas de alta densidad de población con poco espacio para el cultivo, lo que puede contribuir a crear sistemas alimentarios más resistentes. Sin embargo, existen importantes obstáculos económicos y energéticos que limitan su adopción y escalabilidad.

En este sentido, los sistemas de monitorización basados en el IoT permiten una gestión más eficiente de los recursos al proporcionar datos en tiempo real sobre los parámetros del entorno de los cultivos (temperatura, humedad, pH, circulación del agua, etc.). Esta información permite ajustar las condiciones de crecimiento de forma más precisa y optimizar el uso de agua, nutrientes y energía. La automatización basada en datos permite también reducir el desperdicio y aumentar la estabilidad del sistema, contribuyendo a una gestión más eficiente.

No obstante, la implantación de sistemas hidropónicos y acuapónicos en zonas urbanas se enfrenta también a dificultades como el elevado coste de instalación, los requisitos de conocimiento técnico y la necesidad de mantener unas condiciones controladas. A estas dificultades hay que añadir las limitaciones propias del entorno urbano, como la falta de espacio, los requisitos normativos y la disponibilidad fiable de agua y energía, elementos que deben tenerse en cuenta a la hora de planificar e implantar soluciones de este tipo.

2.1.20 Dispositivos IoT con ESP32: diseño, implementación y consideraciones técnicas

El proyecto realizado por Hercog et al. (2023), la robótica y el internet de las cosas (IoT) se han utilizado en entornos educativos con la finalidad de promover el aprendizaje mediante la

práctica y la adquisición de conocimientos en tecnologías emergentes. Estas técnicas utilizan microcontroladores (como el ESP32, Arduino y Raspberry Pi) para implementar proyectos concretos (por ejemplo, monitorización de colmenas o procesos de fermentación) en los cuales se combinan sensores, conexión inalámbrica y plataformas en la nube, con el objetivo de almacenar y supervisar datos de manera remota.

Aparte de los aspectos técnicos, también se tienen en cuenta las interfaces de hardware, los estándares de integración de sensores y el valor pedagógico de introducir el IoT en el currículo, partiendo de la idea de que el aprendizaje práctico ayuda a fortalecer las capacidades, incentiva la innovación y facilita el acceso a la educación. De entre los proyectos mencionados, el ESP32 es el componente clave, puesto que proporciona una elevada capacidad de procesamiento, conexión Wi-Fi/Bluetooth de serie y compatibilidad con diversas interfaces (SPI, I2C, UART y PWM), lo que simplifica la conexión de sensores de diferentes tipos (temperatura, humedad, peso, etc.).

Desde el punto de vista de la educación, el conocimiento de los estudiantes a través de la experiencia de la enseñanza, permite a los estudiantes comprender la articulación de un sensor, de un dispositivo y de una red, mediante el desarrollo de proyectos de diseño, de programación y de ejecución de prototipos de IoT. En el itinerario de la enseñanza, se presentan los cursos de introducción a la arquitectura del ESP32, los elementos periféricos y los ambientes de programación (ejemplo, Arduino IDE), los cuales son complementados con una serie de prácticas, en donde los estudiantes deben configurar los sensores, establecer la conectividad (Wi-Fi) para la transferencia de datos y para el control remoto. Este modelo de enseñanza, en su conjunto, potencia la comprensión de la instrumentación y la comunicación inalámbrica en las aplicaciones reales.

2.1.21 Riego inteligente habilitado por IoT con ESP32: enfoque de eficiencia hídrica

Los sistemas de riego por goteo inteligente habilitados para IoT describen el desarrollo, pruebas e implementación de soluciones que integran sensores para automatizar y optimizar el riego. Estas arquitecturas suelen monitorear variables como humedad del suelo, temperatura, humedad ambiental y caudal de agua, utilizando microcontroladores como ESP32 para la adquisición y procesamiento de datos.

A partir del monitoreo en tiempo real, se habilita el control remoto mediante aplicaciones (por ejemplo, Blynk) y se incorporan mecanismos de seguridad para evitar riegos excesivos o insuficientes. Las pruebas de laboratorio y campo reportadas muestran que estas soluciones pueden mantener condiciones favorables del suelo, mejorar la eficiencia hídrica y apoyar el desarrollo del cultivo, con proyecciones de mejora como ampliar el arreglo de sensores, aumentar la portabilidad e integrar fuentes de energía sostenibles.

Respecto al sensado, se destaca la importancia del empleo de sensores capacitivos de humedad del suelo (por ejemplo, el SEN0308) basados en la variación de la capacitancia vinculada al contenido de humedad. Esta técnica minimiza los problemas de corrosión y potencia el desempeño del sensor durante períodos prolongados de uso. Con el fin de garantizar la exactitud de las mediciones, se insiste en la necesidad de calibrar el sensor utilizando volúmenes de agua conocidos. Al seguir un proceso de calibración adecuado, se han registrado errores mínimos (<1%). Comparando ambos sistemas de riego se encontraron diferencias importantes en el control y la automatización: (i) en los dos sistemas se mide la humedad del suelo, sin embargo, en uno de ellos se da mayor importancia a la calibración para alcanzar mayor precisión; (ii) los sensores que utilizan son diferentes (resistivos vs. capacitivos) siendo los capacitivos más resistentes al agua y

a la corrosión; (iii) se puede mejorar la lógica de automatización al incluir otras variables (como la temperatura) y parámetros de tiempo para un control más contextual; (iv) existen sistemas en los que se puede anular de forma manual la operación a través de la interfaz del IoT (como Blynk) lo que permite una mayor flexibilidad de uso; y (v) hay una gran diferencia en la conectividad.

El enfoque IoT con ESP32 facilita la supervisión y el control remoto a través de Wi-Fi, mientras que un enfoque más tradicional puede funcionar con una arquitectura cableada sin un monitoreo remoto explícito. En resumen, el sistema IoT suele ofrecer una mayor integración de variables y más opciones de control, mientras que el otro enfoque se centra en la precisión del sensado mediante la calibración y el control por umbrales (Pereira et al., 2023).

2.1.22 Control y operación de huertos urbanos para producción de hortalizas

Los sistemas automatizados de horticultura urbana son la combinación de microcontroladores, sensores y plataformas IoT que se usan para monitorear, y en ocasiones controlar, las variables ambientales importantes para el cultivo. Algunas de las variables que se monitorean son: la temperatura, la humedad, la conductividad del suelo y el nivel de agua. El objetivo principal de estas soluciones es optimizar el crecimiento de las plantas, fomentar prácticas sostenibles y mejorar la gestión de los recursos mediante el monitoreo remoto y la automatización. Además, estas soluciones están relacionadas con los avances en la tecnología de sensado, monitoreo ambiental y automatización agrícola.

Estos avances destacan la necesidad de una integración eficiente entre hardware y software para desarrollar sistemas de agricultura urbana más funcionales y escalables. Más concretamente, se presenta el seguimiento y control en tiempo real de la humedad del suelo utilizando sensores

que funcionan basándose en las propiedades físicas del sustrato (por ejemplo, la constante dieléctrica o la resistividad). Estos sensores convierten los cambios en el contenido de agua en señales eléctricas. Estas señales son interpretadas por un microcontrolador que permite determinar el estado hídrico del suelo y, si se automatiza, tomar decisiones de manejo basadas en umbrales o condiciones preestablecidas (Reinoso Ramos & Bohórquez Hernández, 2024).

2.1.23 Sistemas acuapónicos inteligentes: diseño e integración IoT en condiciones cálidas

Otro aporte significativo es el desarrollo y prueba de pequeños sistemas acuapónicos inteligentes con IoT, diseñados para la agricultura urbana y orientados a automatizar y monitorear las condiciones ambientales para que tanto las plantas como los peces crezcan de forma óptima. Adi, Sagita y Muhammad (2024), en los sistemas de agricultura urbana y acuicultura de pequeña escala se han creado soluciones basadas en sensores y microcontroladores como ESP32, que permiten monitorear las variables críticas del entorno y del agua (humedad del sustrato, pH, temperatura, niveles de nutrientes), y que pueden unirse a plataformas de gestión a distancia a través de aplicaciones móviles (por ejemplo, Telegram), permitiendo al usuario la monitorización en tiempo real y la toma de decisiones operativas sin tener que estar presente en todo momento. En general, este tipo de propuesta se presenta como escalable y con un gran potencial de sostenibilidad, ya que mezcla el monitoreo continuo con el diseño electrónico en detalle, la calibración de sensores y las evaluaciones del rendimiento del sistema. Los resultados que se han obtenido muestran que las lecturas de los sensores (especialmente de pH y humedad) tienen una concordancia aceptable con los métodos de verificación tradicionales (por ejemplo, pruebas de referencia simples), lo que significa que el nivel de fiabilidad es adecuado para fines de control. No obstante, se enfatiza la necesidad de llevar a cabo calibraciones y validaciones periódicas para

mantener la precisión y evitar las desviaciones que podrían surgir debido al envejecimiento del sensor o a las variaciones en las condiciones ambientales.

Además, se describe la incorporación de funciones de automatización que permiten mantener unas condiciones estables mediante el monitoreo y el control en tiempo real. Estas funciones incluyen la gestión de los parámetros de calidad del agua (pH y temperatura), la circulación, la alimentación y el control de los nutrientes, con el fin de reducir la intervención manual y mantener un entorno adecuado tanto para las plantas como para los peces.

2.1.24 Monitoreo automatizado de humedad del suelo: métodos, sensores y aplicaciones

Según Dos Santos et al. (2024), el control de la humedad del suelo a través de sensores y tensiómetros en diferentes tipos de suelo (por ejemplo, Oxisoles e Inceptisoles) demuestra la necesidad de calibrar y analizar los factores ambientales que afectan la precisión de las mediciones, en particular la temperatura. Los resultados reportan una alta correlación entre las lecturas de los dispositivos y el contenido de humedad real del suelo, con mayor estabilidad durante los períodos más fríos.

En este sentido, la importancia de considerar el efecto de las fluctuaciones térmicas para interpretar mejor los datos y, por tanto, gestionar el riego de forma más eficiente es un aspecto relevante. La temperatura es un factor importante en la variabilidad de las mediciones, sobre todo en suelos con diferentes propiedades físicas. En suelos arenosos o más porosos, como los Oxisoles, los cambios térmicos producen fluctuaciones muy notables tanto en el contenido volumétrico de agua como en la presión registrada por el tensiómetro. Este fenómeno se debe a la expansión y

contracción del suelo y de los componentes del sensor, así como a la expansión del fluido que está dentro del tensiómetro, que son sensibles a la temperatura ambiente.

Por lo tanto, las mediciones son más estables cuando se toman en horas de menor temperatura (por ejemplo, por la mañana), mientras que en los momentos de mayor calor durante el día pueden presentarse fluctuaciones que ponen en riesgo la exactitud de las mismas si no se tienen en cuenta los criterios de calibración y tiempo. Asimismo, se desarrolla un sistema inalámbrico de monitoreo de bajo costo con Arduino, que ofrece un rendimiento estable y la posibilidad de integrarse en sistemas de automatización del riego para optimizar el uso del agua.

Finalmente, se resalta que los tensiómetros ofrecen ventajas sobre otros sensores electrónicos en suelos no saturados, ya que miden directamente el potencial mátrico, tienen menor sensibilidad a interferencias eléctricas y requieren poco mantenimiento, lo que los convierte en una herramienta adecuada para el monitoreo continuo y la toma de decisiones en la gestión del riego.

2.1.25 Agricultura inteligente para una alimentación sostenible: síntesis de desafíos y oportunidades

La transición hacia modelos alimentarios globales que sean más sostenibles, resilientes y saludables, combinando las innovaciones tecnológicas con las prácticas agrarias responsables y los mecanismos de cooperación entre los diferentes actores del sector, es inevitable. Los cambios climáticos, la escasez de recursos naturales y las tensiones geopolíticas pueden poner en peligro, en un futuro, la disponibilidad global de alimentos. Como respuesta a la situación actual, han aparecido estrategias como la agricultura de precisión, la tecnología alimentaria y la agricultura

regenerativa, que tienen como finalidad incrementar la producción, pero reduciendo el impacto ambiental y aumentando la seguridad alimentaria. A estas estrategias se unen otras tendencias emergentes, como las proteínas alternativas y las herramientas digitales, que buscan una alimentación más sana, la reducción del despilfarro alimentario y la conservación de la biodiversidad. No obstante, el autor señala que si se quieren que estas transformaciones alcancen una escala significativa, las políticas públicas, la regulación y la voluntad del consumidor son tan importantes como la propia tecnología. La agricultura de precisión, en las regiones áridas, se diferencia por su posible aportación a la gestión eficiente del agua mediante la aplicación del riego basado en datos.

El uso de sensores de suelo, clima y planta permite ajustar con mayor precisión el suministro de agua, reduciendo las pérdidas; en algunos casos, se han comunicado ahorros de agua de hasta aproximadamente un 30 %. Asimismo, tecnologías como el riego por goteo y los invernaderos tecnificados pueden reducir el consumo de agua (hasta cerca de un 40 %), sobre todo cuando se combinan con estrategias de recirculación y tratamiento del agua, lo que reduce la dependencia de las fuentes de agua dulce. Por otra parte, se han encontrado los mismos obstáculos de desarrollo en el sector de las proteínas alternativas y la carne cultivada, como son los obstáculos reglamentarios, los elevados costes de producción y la aceptación del mercado.

La normativa sigue elaborándose, por lo que podría ralentizar los procesos de aprobación y comercialización. En la misma línea, la necesidad de inversión para disminuir los costes e incrementar la producción es fundamental. Por último, la aceptación de los productos por parte de los consumidores plantea un desafío, ya que las percepciones, preferencias y consideraciones

éticas influyen directamente en la incorporación de estos productos, incluso si se presentan posibles ventajas en términos de sostenibilidad y bienestar animal (Future Trends Forum, 2023).

2.1.26 Síntesis crítica de la revisión documental y vacío de investigación

La Literatura Consultada en este Estudio permite identificar dos grandes líneas de investigación que, a pesar de ser complementarias, abordan temáticas y preguntas de investigación muy diferentes. Por un lado, un primer grupo de autores/investigadores/trabajos/publicaciones/artículos/libros/etc. ha enfocado su trabajo en la seguridad alimentaria y la agricultura urbana desde una perspectiva estructural y social: Bianchi y Szpak (2009); Schinca (2009); Pearson y Pilgrim (2010) y Urías Borbón y Ochoa de la Torre (2020), quienes han estudiado fundamentalmente las políticas públicas; el uso del suelo; los riesgos sanitarios y la cohesión comunitaria, aunque sin estudiar en profundidad la manera de instrumentar técnicamente la información para obtener datos medibles. Por otra parte, un segundo grupo de trabajos técnicos (Zurayyah et al., 2019; Chanchí-Golondrino et al., 2022; Berríos Gómez y Rivera Herrera, 2022; Hercog et al., 2023; Oh y Lu, 2023; Pereira et al., 2023; Adi et al., 2024 y Reinoso Ramos y Bohórquez Hernández, 2024), desarrollan soluciones IoT utilizando ESP32 o Arduino, aunque en la mayoría de los casos se centran en el control automatizado (riego, dosificación de nutrientes, actuadores) y no en la creación de una base de datos de variables ambientales que pueda ser utilizada para tomar decisiones. La importancia de esta distinción radica en que el presente proyecto se ubica en un punto medio entre estas dos líneas de investigación, ya que no tiene como objetivo automatizar el cultivo (como Chaparro y Criado, 2020 o Gilroy Pereira et al., 2023), sino crear una base de datos confiable y trazable siguiendo la propuesta de Martínez Candelaria et al. (2011) para la toma de decisiones basada en evidencia que servirá como referencia para futuras

intervenciones manuales o automatizadas. Con respecto a las variables que se monitorean en este estudio (temperatura, humedad relativa y presión atmosférica), la literatura muestra una gran disparidad en su cobertura. La temperatura y la humedad relativa son las dos variables más estudiadas: aparecen constantemente en Perafán (2018), Zuraiyah et al. (2019), Chanchí-Golondrino et al. (2022), Berríos Gómez y Rivera Herrera (2022), Oh y Lu (2023), Pereira et al. (2023) y Adi et al. (2024), lo que demuestra que ambas variables juegan un papel fundamental en el monitoreo de la agricultura urbana y justifica la elección de sensores como el BME280 para este prototipo. La presión, sin embargo, aparece de forma marginal y casi siempre indirecta: Dos Santos et al. (2024) miden la presión matricial del suelo con un tensiómetro (no la presión atmosférica) y demuestran que esta variable es sensible a la temperatura ambiente, lo que indica que existe una relación de interdependencia entre ambas variables que la mayoría de los trabajos revisados no estudian. Gilroy Pereira et al. (2023) mencionan la presión atmosférica en la arquitectura de sensores, pero no estudian su comportamiento ni la forma en que esta variable puede ser útil para la toma de decisiones en la agricultura. La ausencia de estudios sobre esta variable es muy relevante: de todos los trabajos revisados, ninguno crea una base de datos de presión atmosférica como variable de monitoreo en la agricultura urbana. Por esta razón, la creación de una base de datos de presión atmosférica como variable de monitoreo en la agricultura urbana es una de las principales contribuciones de este trabajo, ya que este trabajo integra las tres variables (temperatura, humedad relativa y presión) en un mismo sistema y las correlaciona en el mismo periodo de observación. El vacío específico que este prototipo pretende llenar en Bogotá tiene dos aspectos. En primer lugar, la literatura sobre tecnologías de monitoreo en Colombia (Orjuela Santamaría, 2021; Rueda, Hernández y Castillo, 2021) se enfoca en escalas productivas más grandes (agricultura tecnificada, ganadería regional) o en políticas nacionales de innovación, pero

no en el monitoreo a pequeña escala en huertas o macetas residenciales, donde la inseguridad alimentaria urbana afecta con mayor intensidad a los hogares (DANE, 2025). En segundo lugar, los prototipos técnicos con ESP32 revisados por Chaparro y Criado (2020), Hercog et al. (2023), Adi et al. (2024), fueron probados en diferentes climas y contextos sociales (educativos, tropicales cálidos, acuapónicos) y no fueron adaptados a las condiciones climáticas y sociales de una ciudad de alta montaña como Bogotá. En una ciudad de alta montaña como Bogotá, la temperatura media es más baja, la humedad relativa es más variable y la presión atmosférica es significativamente más baja debido a la altitud (aproximadamente 2.600 metros sobre el nivel del mar). Todas estas diferencias afectan el comportamiento esperado de los sensores y los umbrales de referencia para los cultivos. Por estas razones, el estudio realizado en el municipio de San Francisco (Cundinamarca) no se considera un reemplazo para el estudio que se realizará en Bogotá, sino un precedente metodológico. San Francisco se encuentra a una altitud mucho menor (aproximadamente 1.500 metros sobre el nivel del mar) y tiene un clima cálido-templado, con temperaturas y presiones atmosféricas de referencia diferentes a las de Bogotá. La altitud y el clima de San Francisco permiten validar, en primer lugar, el funcionamiento técnico del prototipo y la calibración de los sensores; la estabilidad de la transmisión inalámbrica; y la consistencia del almacenamiento en Firebase y del tablero web en un entorno con condiciones ambientales menos exigentes antes de trasladar el sistema a Bogotá D.C. como entorno urbano objetivo. Los datos recolectados en San Francisco no se extrapolan directamente, sino que se utilizan para crear criterios de adaptación (offsets de calibración, ajuste de umbrales y frecuencia de muestreo) que tienen en cuenta explícitamente la altitud y el clima entre ambos entornos, tal como se describe en la Fase 3 de la metodología de este estudio.

2.2 Marco teórico

En el actual marco teórico se exponen los enfoques y conceptos más importantes que respaldan la investigación, haciendo hincapié en la innovación tecnológica aplicada a la agricultura urbana. Estos fundamentos servirán para contextualizar el problema de estudio y dirigir el análisis de sus componentes, teniendo en cuenta la relación que estos tienen con la comunidad y la mejora de las prácticas productivas en zonas urbanas. Además, se aportan teorías que explican los procesos de adopción y apropiación de estas innovaciones, para comprender su alcance, pertinencia y las condiciones de su implementación.

2.2.1 Innovación tecnológica aplicada a la agricultura: tendencias y enfoques actuales

Las TIC han revolucionado varios aspectos de la sociedad, como el ocio, la educación y la industria, y también han impactado en el sector agrícola. El uso de tecnología en la agricultura ha ayudado a optimizar los procesos de producción, a mejorar el manejo de los recursos y a garantizar la seguridad alimentaria en todo el mundo. A pesar de las ventajas que ofrecen estas herramientas, la adopción y el grado de implementación de tecnología en el sector agrícola colombiano son bajos en comparación con otros países, lo que muestra la necesidad de fortalecer las capacidades, la infraestructura y las estrategias de innovación en el sector.

Los autores Jorge Martínez et al. (2024), en un sector agrícola en el que la tecnología todavía no ha podido establecerse, el desarrollo de bases de datos históricas se convierte en una prioridad urgente: solo así se puede comprender la enorme variabilidad que la diversidad de suelos y los distintos climas del país. Y es que las condiciones climáticas no solo afectan cómo crecen los cultivos, sino también cuándo y cómo hay que intervenir en el campo. En este contexto, las

tecnologías aplicadas a la agricultura cumplen un rol estratégico para facilitar el monitoreo, la gestión remota y el seguimiento del cultivo con trazabilidad, lo que contribuye a mejorar la eficiencia del manejo y a reducir la incertidumbre en la toma de decisiones.

Actualmente existen múltiples soluciones tecnológicas para el sector agrícola, cuya pertinencia depende del tamaño del terreno, el tipo de cultivo y los recursos disponibles. No obstante, la incorporación progresiva de innovación tecnológica especialmente en países en desarrollo puede aportar mayor precisión y soporte técnico para fortalecer la producción, optimizar recursos y contribuir a mejorar la disponibilidad de alimentos en los hogares. En esa medida, la adopción de herramientas digitales se relaciona con los esfuerzos orientados al cumplimiento del Objetivo de Desarrollo Sostenible “Hambre Cero”, al favorecer sistemas productivos más eficientes y sostenibles.

2.2.2 La agricultura urbana y su aporte a la seguridad alimentaria en entornos urbanos

La agricultura urbana ha ganado terreno en muchos países como una forma de integrar la producción de alimentos a la vida cotidiana de la ciudad, con el doble propósito de hacer un uso más sostenible del territorio y garantizar que sus habitantes tengan acceso a una alimentación segura. Por lo general, surge en los barrios, donde el trabajo colectivo y la organización comunitaria son el motor que la sostiene.

Sus beneficios van más allá de lo alimentario: estrecha los lazos entre vecinos, acerca a las personas a la naturaleza y tiene un efecto real sobre cómo se ordena y se usa el espacio urbano. También abre la posibilidad de producir alimentos frescos y saludables cerca de casa, y puede convertirse en un punto de partida para procesos más amplios de desarrollo comunitario. En

ciudades grandes de Norteamérica y Europa, estas iniciativas han tomado además un carácter reivindicativo, como respuesta a la pérdida progresiva de áreas verdes.

Las modalidades de agricultura urbana suelen valorarse según el aporte a la seguridad alimentaria, la sostenimiento ambiental y los procesos sociopolíticos locales. En este sentido, los vínculos entre ciudad y campo también se reflejan en proyectos territoriales de mayor escala, donde la producción agrícola puede desempeñar un papel relevante en la planificación y gestión del territorio (Ávila Sánchez & Ávila Sánchez, 2019).

2.2.3 Agricultura inteligente (Smart Farming): conceptos, componentes y alcance

Según González et al. (2024), la agricultura es una de las actividades económicas más importantes en muchas partes del mundo, puesto que la producción de alimentos es un elemento fundamental para garantizar la seguridad alimentaria y el bienestar de la gente. En este contexto, innovar en el modo de producir ya no es una opción. La agricultura inteligente ofrece una solución directa: utiliza información, modelos y tecnología para tomar decisiones más acertadas sobre cómo gestionar los cultivos. Los sistemas de monitoreo y control mediante tecnología digital son una de las maneras más prácticas en que se expresa la agricultura inteligente. Permiten supervisar las condiciones del entorno y del cultivo con un nivel de exactitud que era impensable antes. Estos sistemas pueden incluir sensores inalámbricos y algoritmos de aprendizaje automático para recopilar y analizar datos en tiempo real (temperatura, humedad y otras variables que son vitales para el desarrollo de las plantas), lo que permite utilizar los recursos de forma más eficiente. Asimismo, al incrementar el control de las condiciones del cultivo, este método contribuye a disminuir los residuos y los efectos negativos en el medio ambiente, y dirige la producción hacia

alimentos más seguros y nutritivos. las condiciones del cultivo y orienta la producción hacia alimentos más seguros y nutritivos

2.2.4 Internet de las cosas en la agricultura: arquitectura y flujo de datos

El Internet de las cosas se ha consolidado como una tecnología puntera con un crecimiento vertiginoso en los últimos años, gracias a la capacidad que tiene para la conexión de dispositivos y para la automatización de las tareas más rutinarias. La aplicación que tiene es en muchos sectores y, en especial, está ganando terreno en la agricultura, ya que, por ejemplo, técnicas como la hidroponía se han visto reforzadas por el uso de sistemas digitales para la monitorización y gestión de las variables más relevantes. Los principales aportes que ofrece son la posibilidad de la captura y transmisión de datos en tiempo real, la mejora de los seguimientos de las variables críticas de cada cultivo y el soporte para servicios de supervisión y control remotos que permiten una gestión más eficiente y basada en información.

Un dato clave que menciona el autor Montaña-Blacio et al. (2023), se calcula que la población global llegará a cerca de 9,600 millones para el año 2050, ejerciendo mayor presión sobre los sistemas agroalimentarios y requiriendo procesos de producción aún más eficientes y exactos. A esto se le suma el cambio climático, relacionado con el calentamiento global, que añade otros riesgos a la estabilidad de la producción agrícola y al suministro de alimentos. En este escenario, se propone la aplicación de un sistema de monitoreo IoT confiable a través de Sigfox, para mejorar la administración del cultivo monitoreando variables como la humedad y la temperatura, además de controlar la creación de nutrientes en un sistema hidropónico en áreas urbanas. Estos usos se apoyan en sensores y dispositivos que recogen datos del entorno del cultivo,

dando información que ayuda a entender su funcionamiento y a tomar decisiones sobre su manejo. Asimismo, se sugiere procesar y analizar la información en la nube, para que sea más fácil interpretar los registros y dar apoyo a investigadores y agricultores para tomar decisiones con pruebas.

2.2.5 Monitoreo de variables ambientales en agricultura: medición, trazabilidad y análisis

De acuerdo con Capraro Flavio, Tosetti S. y Vita Serman F. (2010), El monitoreo de variables como la humedad del suelo con el uso de sensores, además de mejorar la supervisión y manejo del cultivo, tiene un valor educativo destacable. Al integrar los datos obtenidos por los sensores a los procesos de enseñanza, las fórmulas y teorías se materializan en experiencias concretas que ocurren en el campo. Por lo tanto, las condiciones físicas y el comportamiento de los sistemas agrícolas se convierten en objetos de estudio, potenciando la capacidad de análisis y la toma de decisiones basada en información real.

Especialmente en la gestión del riego, las herramientas de simulación permiten evaluar diferentes estrategias sin afectar los cultivos existentes. Las estrategias se definen en función de valores de referencia de humedad, establecidos en función de los requerimientos del cultivo y las condiciones ambientales, lo que facilita la comparación de escenarios y la selección de alternativas de gestión más eficientes.

2.2.6 Estaciones meteorológicas y sensado ambiental: fundamentos y aplicaciones en cultivo

Los cambios en el clima han puesto en evidencia la necesidad de contar con sistemas meteorológicos capaces de monitorear las condiciones atmosféricas de manera confiable. En esa

línea Hernandez Rodriguez et al. (2023), abordan el desarrollo de estaciones meteorológicas ya que las estaciones meteorológicas inteligentes han adquirido un gran interés porque pueden obtener y enviar datos en tiempo real, lo que le da una gran cantidad de aplicaciones en diferentes ámbitos como la predicción de fenómenos meteorológicos, la gestión de energía, la edificación inteligente, la agricultura de precisión y el control de la calidad del aire, en particular en el entorno rural. Los sistemas permiten conectar varios tipos de sensores que miden las variables atmosféricas y requieren de poca interacción humana para recoger información ambiental de forma continua.

En cuanto a conectividad, es común el uso de tecnologías como Wi-Fi o GPRS para el envío de datos; sin embargo, ambas dependen de la disponibilidad de cobertura de telecomunicaciones, lo cual puede limitar su implementación en áreas rurales. Como alternativa, se emplean protocolos de largo alcance como LoRa, que permiten establecer enlaces de comunicación a distancias de varios kilómetros mediante redes privadas, favoreciendo el monitoreo ambiental en escenarios con conectividad restringida

2.2.7 Agricultura optimizada basada en datos: apoyo a la toma de decisiones y mejora del manejo

Saez Rojas et al. (2024) proponen un sistema de riego inteligente basado en IoT que busca hacer un uso más eficiente del agua en la agricultura, con aplicaciones pensadas específicamente para el cultivo de arándanos en pequeñas y medianas explotaciones de Chile. Los sistemas inteligentes de riego basados en IoT integran microcontroladores, por ejemplo; Arduino MKR1000 junto con sensores de humedad del suelo, relés y conectividad Wi-Fi, con el objetivo de automatizar la irrigación a partir de lecturas en tiempo real y condiciones operativas definidas. Este tipo de soluciones se enfoca en incrementar la eficiencia del riego y la administración de los

recursos, con un énfasis especial en aspectos como el costo, la sustentabilidad ecológica y la posibilidad de expandir la solución. Lo que se refiere al futuro, está previsto añadir otros sensores y utilizar métodos de análisis de datos más avanzados, a fin de mejorar la eficacia del sistema. El algoritmo de la situación particular de cultivo del arándano define un valor umbral de humedad del suelo de aproximadamente 530: si el sensor detecta un valor de humedad superior a este umbral, el sistema de riego se activa en el momento definido en el calendario de riego; si el sensor detecta un valor de humedad igual o inferior a 530, el riego se interrumpe. El control mediante umbral garantiza que se mantengan los niveles de humedad adecuados para el cultivo, reduce la necesidad de intervención manual y garantiza la coherencia en el manejo. En el sistema utiliza principalmente un sensor de la hidratación terrestre, un procesador Arduino y un sistema IoT para guardar, observar y administrar la información.

3 METODOLOGÍA

El presente estudio emplea una metodología cuantitativa centrada en la evaluación de factores ambientales propios de un prototipo de agricultura urbana inteligente, proceso que integra la captura y el acopio de información sobre la temperatura, la humedad relativa y la presión atmosférica fue realizado mediante el sensor BME280; el sensor fue incorporado a una plataforma de monitoreo que permite rastrear los cambios a lo largo del tiempo. Esto facilita la supervisión ininterrumpida del estado de la plantación, proveyendo los datos pertinentes para el examen y la explicación de los hallazgos logrados.

Fundamentándose en la información que surgió de la cuantificación de dichos parámetros, se evalúa el desempeño del sistema de monitoreo y su utilidad para apoyar decisiones de manejo

del cultivo en entornos urbanos. Por lo tanto, el estudio proporciona información técnica que respalda el fortalecimiento de prácticas agrícolas sostenibles basadas en datos, especialmente en escenarios donde se requiere seguimiento y control informativo del microclima del cultivo.

3.1 Paradigma investigativo

El modelo positivista se sustenta en el concepto de que el saber científico tiene que ser construido mediante la observación, la medición y la verificación empírica de los fenómenos. De esta forma, la investigación prioriza el análisis de variables observables y cuantificables para describir y explicar relaciones objetivas, a través de procedimientos sistemáticos.

Debido a esto, el positivismo tiende a delimitar el fenómeno de estudio en componentes medibles, lo que facilita obtener resultados con un alto nivel de control metodológico y replicabilidad. Sin embargo, esta tendencia puede limitar la comprensión de dimensiones mayores o contextuales del fenómeno. A pesar de ello, su principal fortaleza está en la obtención de conclusiones basadas en evidencia verificable, en consonancia con los criterios de validez del método científico (Sarasola, 2025).

El paradigma positivista sirve de marco para este estudio ya que este paradigma fundamenta el empleo de una metodología cuantitativa, en función de la problemática planteada. Desde la óptica del positivismo, los fenómenos se estudian de forma objetiva, es decir, mediante la medición de variables observables, dejando a un lado la valoración subjetiva. Por lo tanto, esta investigación realizará un acopio organizado de los factores del entorno asociados a la siembra, lo que nos va a permitir aplicar análisis estadísticos para identificar relaciones correlacionales o asociativas entre los datos obtenidos y el comportamiento del entorno estudiado.

3.2 Instrumentos de recolección

* Sensor BME280: medición de temperatura (°C), humedad relativa (%) y presión atmosférica (hPa).

* Microcontrolador ESP32: adquisición, procesamiento básico y transmisión vía Wi-Fi.

* Base de datos + plataforma web/app: almacenamiento y visualización en tiempo real e histórico.

* Bitácora de pruebas/operación: registro de incidentes, reinicios, caídas de red, ajustes y observaciones del cultivo.

A fin de calificar la relevancia y los parámetros técnicos, se presentó el instrumento/prototipo ante un comité de especialistas. Los expertos analizaron la arquitectura del sistema, la coherencia del monitoreo, la integridad del flujo de datos, la trazabilidad, la seguridad básica y la consistencia metodológica. Las observaciones se consolidaron y se ajustó la redacción, la estructura y los aspectos técnicos documentales. En los anexos del documento se incluyen las cartas de validación firmadas. Previo a la validación en el escenario real, se realizó un pilotaje para verificar:

1. Lectura estable del BME280,
2. Conectividad Wi-Fi y reconexión,
3. Recepción y almacenamiento correcto en la base de datos,
4. Visualización adecuada en la plataforma,

Los resultados del pilotaje permitieron ajustar el intervalo de medición, manejo de errores (reintentos) y consistencia de marca de tiempo.

3.3 Enfoque, alcance, temporalidad y tipo de investigación

La aproximación metodológica usada en la presente investigación es de índole cuantitativa, y se apoya en un prototipo físico para la monitorización ambiental. El prototipo físico incorpora elementos de medición y registro de variables como los niveles de temperatura, humedad relativa, y la presión atmosférica. Los registros que se obtienen se guardan con trazabilidad temporal, y se procesan para describir el comportamiento del entorno de cultivo bajo condiciones reales.

El alcance del estudio es descriptivo-correlacional, debido a que se busca detallar los cambios que ocurren en variables supervisadas, así como determinar las asociaciones que se dan entre ellas, lo que implica la identificación de patrones y relaciones en el microclima del cultivo, pero sin establecer causalidad experimental. El esquema de investigación es de carácter longitudinal por varios días, puesto que la obtención de información se realiza en distintas ocasiones temporales, lo cual posibilita observar la evolución del comportamiento ambiental y valorar la continuidad operativa del sistema de monitoreo a lo largo del período de estudio.

Finalmente, el estudio se enmarca en una perspectiva aplicada, ya que busca generar y verificar una solución tecnológica funcional que permita realizar el seguimiento de las variables ambientales en la agricultura urbana. A través del diseño, implementación y validación del prototipo, se busca generar evidencia que resulte relevante para la toma de decisiones relacionadas con el manejo del cultivo y para el fortalecimiento de prácticas sostenibles en entornos urbanos.

3.4 Población y muestra

Este trabajo se ocupa en el estudio para los sectores urbanos de Bogotá y municipios urbanos, en la implementación de este prototipo es realizado en una vivienda urbana en el municipio de San Francisco ya que se tiene acceso a una huerta reducida. En ambos casos, el cultivo urbano podría convertirse en una estrategia eficaz para fortalecer una producción de alimentos sostenible.

3.4.1 Caracterización de la población o área de estudio

Población objetivo y unidad de análisis

El público meta se integra por sistemas de agricultura urbana en proporciones limitadas (p. ej., materas, camas de siembra o huertas domésticas) ubicadas en entornos residenciales, donde sea viable realizar la supervisión constante de parámetros ambientales. El módulo de análisis corresponde a los registros ambientales capturados por el sistema de monitoreo (temperatura, humedad relativa y presión atmosférica) asociados a una marca temporal.

Muestra y criterios de selección

Debido a que la investigación corresponde al diseño y validación de un prototipo tecnológico, no se realiza un muestreo estadístico. La validación se efectúa mediante pruebas funcionales del prototipo en un entorno controlado.

Se utiliza un muestreo de conveniencia no probabilístico, determinado por la disponibilidad del espacio y la posibilidad de operación continua del prototipo en la huerta en una vivienda en el

municipio de San Francisco (Cundinamarca). Para la selección de la unidad de cultivo se consideran los siguientes criterios:

- Disponibilidad de conectividad Wi-Fi para transmisión de datos.
- Acceso a energía eléctrica para operación del prototipo.
- Espacio mínimo aproximado de 2 m² o un área suficiente para instalación segura del sistema.
- Ubicación con exposición al aire libre o condiciones de ventilación y luz natural suficientes para el cultivo.
- Posibilidad de mantener la recolección de datos durante un periodo.

Área de estudio

El área de estudio corresponde a la zona urbana del municipio de San Francisco (Cundinamarca, Colombia), utilizado como escenario de validación operativa del prototipo. Este escenario permite determinar pautas de ajuste para la implementación futura en Bogotá D.C. tras analizar el rendimiento del sistema de seguimiento en escenarios auténticos como contexto urbano objetivo.

Cultivos seleccionados

El seguimiento de este estudio se realiza mediante la selección de cultivos en la unidad de cultivo urbano, los cuales se definen por la disponibilidad y la relevancia para el contexto

doméstico/residencial, con la finalidad de examinar la conducta del microclima del cultivo en el período de seguimiento.

3.4.2 Cálculo y definición del tamaño muestral

Se empleó un muestreo intencional, no probabilístico y por conveniencia; los sitios se seleccionaron por la simplicidad para montar el prototipo y su representatividad de las plantaciones en entornos urbanos. El estudio integra cuatro módulos de siembra, cada uno vinculado a una clase vegetal específica (hoja, fruto, raíz y aromática), lo que permite monitorear las condiciones ambientales propias de cada tipo de planta.

Los lugares donde se otorga este sistema, es considerado en zonas reducidas para cultivos; terraza, patio, huerta, etc., con el objetivo de implementar cosechas pequeñas, destacando las mediciones en ese entorno que se encuentran. Posteriormente poseer un entorno seguro para el montaje del prototipo y disponer de conexión a Internet; garantizando un periodo de observación de 5 días, esto es lo que se tiene previsto para el proyecto como modelo demostrativo (demo).

Los datos de temperatura, humedad ambiental y presión se recolectaron cada 30 minutos durante cinco días continuos, lo que permitió construir un sistema de datos consistente para examinar indicadores ambientales esenciales y generar su visualización, tanto en tiempo real como de forma histórica, a través de una plataforma web.

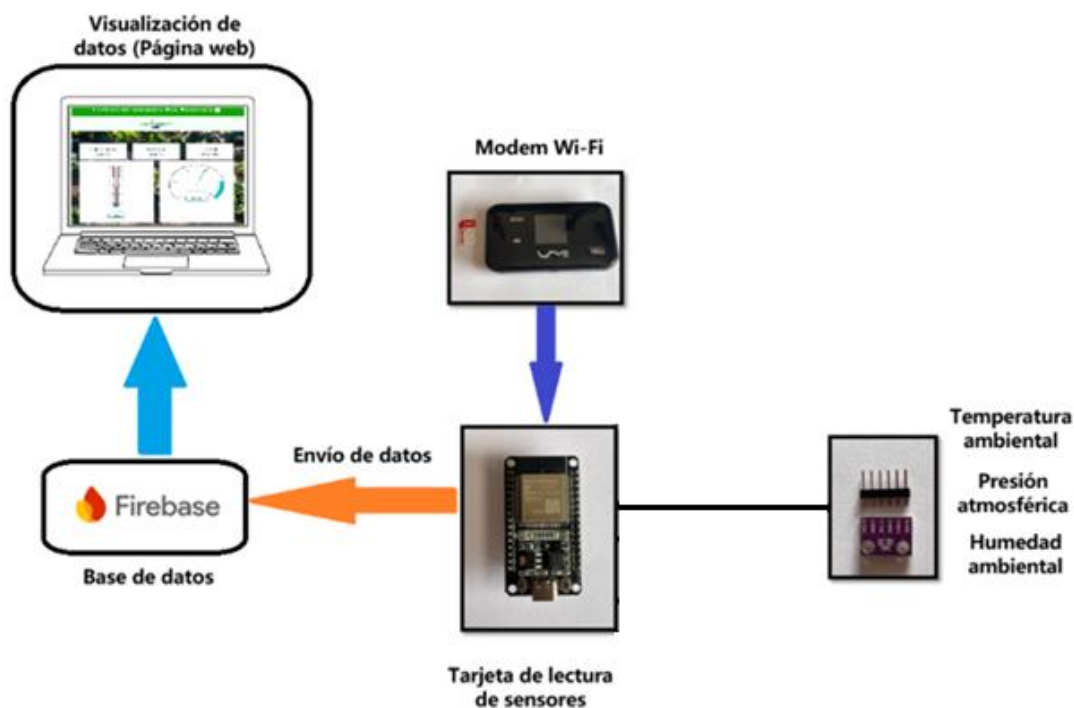
El conjunto de individuos investigados se identifica como unidades de cultivo urbano en entorno residencial, en las cuales se monitorean variables ambientales. Para este proyecto, la unidad de análisis es la unidad de cultivo en el escenario, definiendo criterios de adaptación al contexto urbano objetivo Bogotá D.C.

3.5 Diseño metodológico

El planteamiento metodológico se fundamenta en cuantificar técnicamente los factores del medio captados por dispositivos, remitiendo estos datos a un portal digital para su guardado y monitoreo inmediato o histórico.

Figura 1

Arquitectura del sistema de monitoreo y visualización de variables ambientales.



Nota. Elaboración propia.

Este estudio adopta un formato no experimental y longitudinal; los elementos analizados no se intervienen, sino que se monitorean y evalúan constantemente en un tiempo establecido, con el fin de describir cómo se comportan en el tiempo y evaluar qué tan bien funciona el sistema de monitoreo en distintas condiciones.

La investigación también tiene un carácter aplicado, ya que no se queda en la teoría: pretende crear y verificar un modelo inicial que solucione una dificultad específica, que es el de incentivar la producción agrícola en entornos urbanos mediante el uso de tecnología inteligente. El enfoque cuantitativo garantiza que la información generada sea objetiva, confiable y replicable.

3.5.1 Fase 1: Identificación de los factores y variables a medir.

Para alcanzar el primer objetivo específico, la información se capturará directamente de los sensores definidos para el proyecto, encargados de registrar humedad ambiental, temperatura y presión. El almacenamiento, procesamiento y visualización de tales variables en la plataforma buscan facilitar el proceso de decidir e impulsar la optimización de las labores agrarias. Se trata de una configuración adecuada para muchas aplicaciones agrícolas como monitoreo de suelo y aire, riego y agricultura de ambiente (Chanchí-Golondrino et al., 2022).

Previo a su implementación, los dispositivos de medición se someterán a un proceso de calibración para ser colocados posteriormente en un área urbana dentro perteneciente a San Francisco (Cundinamarca) y en Bogotá, durante el semestre final del 2025. El diseño del esquema considerará elementos tales como el espacio existente, la concentración de los cultivos y el grado de integración técnica de la zona.

Con el fin de asegurar la fiabilidad en la captura de información, resulta esencial emplear herramientas de medición apropiadas que aseguren resultados exactos, así como un intercambio de datos constante y ágil entre el microcontrolador y la plataforma de visualización en vivo.

Utilizando los registros obtenidos, se pretende elaborar un cuadro que muestre la importancia de cada factor ambiental, además de determinar los umbrales de riesgo para las parcelas de siembra definidas.

3.5.2 Fase 2: Desarrollo base de datos, registro de variables y análisis/seguimiento de variables para cada cultivo.

Los datos iniciales provienen de las mediciones realizadas por los dispositivos ambientales del modelo de agricultura urbana inteligente. Este es el primer paso: recoger datos fundamentales sobre las variables que afectan al desarrollo de la vegetación en la ciudad. El sistema almacena automáticamente estos datos numéricos. También incluye información técnica sobre el rendimiento, incluida la superficie total en m² y la densidad de los cultivos (número de plantas por m²). La duración del seguimiento de días continuos, utilizando un método longitudinal y no experimental para estudiar la evolución del sistema en diferentes condiciones meteorológicas.

Se estudiarán cuatro tipos de plantas en función de su parte comestible: hojas (lechuga), frutos (fresas), raíces (zanahorias) y hierbas aromáticas (romero, manzanilla y té). Esta selección nos permite probar el prototipo con diferentes velocidades de desarrollo y en diferentes condiciones ambientales. Se utilizará un muestreo específico, eligiendo parcelas con sustratos y ubicaciones similares para reducir los efectos de las variables externas.

Una vez recogidos, los datos se estandarizarán, limpiarán y clasificarán por entorno, lote, especie y tipo de cultivo. A continuación, se realizará un análisis descriptivo de los factores ambientales (mediante regresiones lineales por planta) y un análisis de correlación para determinar cómo afecta la tecnología utilizada. Se espera construir una base de datos estructurada que sirva

como referencia para futuras decisiones, así como documentación técnica que establezca los rangos climáticos de referencia para cada especie vegetal.

Por último, se desarrollará un panel de exploración con visualizaciones históricas y en tiempo real, gráficos de progreso y sistemas de alerta. Esta herramienta facilitará la toma de decisiones, sin ajustes automatizados, en función del estado ambiental de los cultivos. El objetivo es proporcionar una interfaz fácil de usar que permita el análisis técnico y la participación de la comunidad.

3.5.3 Fase 3: Diseño de prototipo de agricultura urbana para la ciudad de Bogotá y para el municipio de San Francisco (Cundinamarca).

Para Gilroy Pereira, Mohamed Chaari y Fawwad Daroge (2023), dentro del marco de la agricultura de precisión, se han puesto en marcha redes de sensores IoT destinados a supervisar la calidez y la condición húmeda del terreno. Tales dispositivos emplean herramientas como los módulos ADC, el DS18B20 y el DHT22, los cuales pasaron por un proceso de calibración para asegurar que los registros sean precisos y uniformes. El procesamiento de estas cifras se realiza a través de microprocesadores de las familias ESP32 y Arduino MKR. Posteriormente, los datos se almacenan en servicios como Firebase, MySQL o ThingSpeak, facilitando así un examen organizado y una vigilancia persistente en el tiempo.

El monitoreo continuo de los elementos que interactúan en el medio ambiente permite cultivar plantas sanas y con un tamaño similar, utilizar los recursos (insumos) de manera más eficiente y anticipar situaciones adversas que pudieran afectar negativamente la producción de los cultivos. Esta iniciativa se basa en la creación de un sistema de operación que monitorea las

condiciones del medio ambiente en los cultivos urbanos. Un microcontrolador y una red de sensores de bajo consumo de energía se utilizarán para recoger mediciones de temperatura, humedad y presión atmosférica en tiempo real.

Este sistema incorporará software diseñado específicamente para él, un registro de mediciones, interfaces para dispositivos móviles y web, así como un manual técnico para su implementación y adaptación en regiones con clima templado. Un informe de evaluación mostrará todos estos elementos y explicará cómo contribuyen a la seguridad alimentaria, el aprovechamiento de recursos y el fortalecimiento de las relaciones comunitarias.

Durante la etapa vigente, la prioridad reside en la concepción, elaboración y testeo del ejemplar inicial, prescindiendo de funciones de automatización. La finalidad única es la recolección, envío y presentación de información climática actual y pasada. Estas actividades se realizarán en un sector urbano dentro del municipio de San Francisco, Cundinamarca, empleando variedades vegetales habituales de esa región.

El prototipo se basa en un microcontrolador ESP32 conectado a sensores que miden la temperatura, humedad ambiental y presión atmosférica. La información se envía de forma inalámbrica (WiFi) a una plataforma digital donde se almacena en una base de datos y se muestra en forma de gráficos históricos y en tiempo real.

Los registros se efectúan en intervalos de media hora para asegurar una vigilancia continua y veraz del ambiente. Dicha información se obtendrá de variadas clases de vegetación urbana (hojas, frutos, raíces y aromáticas) localizadas en zonas municipales, buscando detectar las tendencias del entorno propias de cada espécimen. En la plataforma dispondrá de un panel

interactivo al que se podrá acceder desde cualquier dispositivo, y desde el cual se podrán consultar tanto el historial de registros como los datos en tiempo real. Esto tiene como objetivo fomentar la transparencia, facilitar un seguimiento continuo y respaldar la toma de decisiones con información concreta.

Tras concluir esta etapa, se proyecta la creación de un repositorio de información ecológica organizado, una plataforma digital que exhiba datos actuales y registros pasados, manuales técnicos detallando medias y escalas según la variedad vegetal, y un estudio evaluativo con vínculos preliminares y sugerencias prácticas para la planificación posterior de la red.

4 HIPÓTESIS

Establecer una red de vigilancia ecológica mediante dispositivos de medición conectados a un portal digital facilita la observación minuciosa y efectiva del estado de las plantaciones en áreas metropolitanas, ofreciendo la posibilidad de evaluar indicadores del medio tanto al instante como de manera retrospectiva. Por lo tanto, es útil en ciudades como Bogotá y en municipios urbanos.

Aparte de lo técnico, supervisar estos indicadores ejerce una influencia real en la existencia de los ciudadanos: al producir sus propios alimentos, se reduce la dependencia de compras externas y por lo tanto, los gastos de la casa. Asimismo, recolectar lo sembrado puede constituir una labor comunitaria que robustece las conexiones entre quienes residen en el mismo entorno de ciudad.

4.1 Hipótesis tecnológica

La agricultura urbana enfrenta el reto para la adaptación a espacios reducidos y a condiciones variables ambientales. La implementación de captadores, circuitos de control, supervisión instantánea, repositorios de información y la representación mediante sitios de red o programas informáticos, permite medir de manera eficiente las variables críticas (humedad, temperatura, presión). Con base en estas mediciones permite mejorar la productividad en las plantas.

- El prototipo construido con ESP32 y sensores integrados demostró ser capaz de registrar de forma continua y confiable datos de temperatura, humedad ambiental y presión atmosférica, parámetros fundamentales para la supervisión de los cultivos.

Tabla 1

Indicadores de precisión y frecuencia de medición

Indicador	Descripción	Meta proyectada
Frecuencia de medición	Captura de información en intervalos de 30 minutos.	≥ 95 % de las mediciones esperadas registradas (sin pérdida de datos)
Precisión del sensor: BME280 (Temperatura)	Sensor digital con precisión típica de ± 0.5 °C en rango -40 a +85 °C	Desviación máxima $\leq \pm 0.5$ °C respecto a valor de referencia
Precisión del sensor: BME280 (Humedad ambiental)	Sensor con precisión típica de ± 3 % HR (20–80 % de humedad relativa)	Desviación máxima $\leq \pm 3$ % HR respecto a valor de referencia

Precisión del sensor: BME280 (Presión atmosférica)	Sensor barométrico con precisión típica de ±1 hPa en rango 300–1100 hPa	Desviación máxima ≤ ±1 hPa respecto a valor de referencia
---	---	---

Nota. Elaboración propia con base en la ficha técnica del sensor BME280 (Bosch Sensortec GmbH, 2024)

- Disponer de un portal en línea que presente información actual y de archivo optimiza la habilidad de evaluar y monitorear el estado de las plantaciones en zonas metropolitanas.

Tabla 2

Indicadores de desempeño de la plataforma digital

Indicador	Descripción actual	Descripción propuesta
Disponibilidad de la plataforma	Porcentaje del tiempo en línea sin interrupciones	Proporción del tiempo en que la plataforma opera de manera estable y accesible para el usuario
Accesibilidad a datos históricos	Número de días con registros visualizados correctamente	Cantidad de días en que los registros almacenados pueden consultarse sin errores desde la interfaz

Nota. Elaboración propia.

Que el sistema esté construido con tecnologías económicas y de fácil acceso abre la puerta a que este modelo pueda replicarse y expandirse a otras zonas urbanas con condiciones climáticas parecidas.

4.2 Hipótesis económica

Tradicionalmente, la agricultura urbana ha sido percibida como un ejercicio de alto costo y baja eficiencia, debido a las restricciones de superficie, los requerimientos de instalaciones técnicas y el condicionamiento por suministros como el agua y la electricidad. Sin embargo, el avance de las tecnologías inteligentes ha abierto la posibilidad de optimizar las actividades agrícolas a través del seguimiento y control detallado de variables ambientales con el propósito de aumentar la producción de cultivos.

En este ámbito, el despliegue de sistemas basados en sensores, plataformas web y diversas herramientas permiten optimizar el aprovechamiento de insumos, renovando así el cultivo en las ciudades, en una actividad con capacidad económica y sostenible. Aunque la inversión inicial en dispositivos tecnológicos (sensores ambientales, sistemas de adquisición de datos y herramientas digitales de control), pueda ser considerable, ésta podría verse compensada a mediano y largo plazo por los ahorros que generan en agua, energía e insumos agrícolas. Adicionalmente, disponer de datos precisos y actualizados al instante favorece resoluciones fundamentadas, lo cual reduce los desperdicios y eleva la productividad de las siembras.

Tabla 3*Estimación de los costos de implementación del prototipo de monitoreo ambiental.*

Concepto	Costo (COP)
ESP32 Wroom	\$35.000
Sensor BME280	\$25.000
Modem 4G	\$100.000
Tarjeta SIM con plan de datos (1 mes)	\$40.000
Cables, fuente de alimentación y PCB	\$15.000
Total	\$215.000

Nota. Elaboración propia con base en los costos de adquisición de los componentes utilizados en el desarrollo del prototipo.

La Tabla 3 presenta los costos aproximados de los componentes requeridos para la implementación del prototipo. Se observa que el desarrollo puede realizarse con una inversión cercana a los \$215.000 COP, lo que evidencia la viabilidad económica del sistema para aplicaciones de monitoreo en agricultura urbana a pequeña escala. Este análisis corresponde a los costos de implementación del prototipo y no constituye una evaluación de rentabilidad ni de retorno de la inversión. El costo del prototipo resulta inferior al de soluciones comerciales de monitoreo agrícola, lo que evidencia su viabilidad económica para aplicaciones de pequeña escala.

Así pues, se pretende demostrar que la tecnología inteligente contribuye a la sostenibilidad ambiental y a la rentabilidad económica de los proyectos de agricultura urbana. En consecuencia, el proyecto intenta comprobar si la adopción de herramientas tecnológicas en un modelo urbano de cultivo es una alternativa económicamente más eficaz a los métodos tradicionales, por la cual

la inversión inicial se justifica mediante una gestión óptima de recursos además de elevar el rendimiento productivo, fomentando así la formación de modelos económicos locales sustentables.

4.3 Hipótesis social

Para garantizar la disponibilidad de alimentos, el cultivo urbano constituye una estrategia que acerca la producción al lugar de consumo y puede favorecer la interacción entre los habitantes de una comunidad.

Sin embargo, el potencial de cambio social que aún debe recorrer un largo camino es la integración de tecnologías inteligentes para facilitar el seguimiento de cultivos, la educación y el fomento del involucramiento de la colectividad, lo cual podría generar un cambio importante en la manera en que estos proyectos repercuten en la vida de la gente.

Por otra parte, disponer de reportes precisos y sencillos de consultar acerca del estado de las plantaciones y los logros alcanzados hace más sencillo el impulso del trabajo conjunto en la administración de cultivos urbanos, potenciando el desarrollo de nexos vecinales cimentados en la transferencia de experiencias y el compromiso ecológico colectivo.

El presente estudio no evaluó directamente variables sociales, tales como la participación comunitaria, la percepción de los usuarios o la apropiación tecnológica; por tanto, los posibles beneficios sociales identificados corresponden a un potencial de aplicación que deberá validarse mediante investigaciones futuras con participación de la comunidad.

4.4 Variables o categorías de análisis

Tabla 4

Variables

Nombre de la variables	Tipo de enfoque	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Escala de medición
Temperatura ambiente	Cuantitativo (Variable independiente)	Grado de temperatura en el aire que rodea el cultivo, es factor metabólico vegetal.	Datos en °C recopilados cada 30 min mediante el sensor BME280, ubicado a 2m del sustrato.	Valor mínimo, medio, máximo. Diario.	Razón, si se requiere formula
Humedad relativa	Cuantitativo (Variable independiente)	Porcentaje de vapor de agua presente en el aire respecto al máximo que puede contener a una temperatura determinada; influye en la evapotranspiración y el microclima del cultivo.	Datos en % recopilados cada 30 min mediante el sensor BME280, ubicado a 2 m del sustrato.	Valor mínimo, medio y máximo. Diario.	Si se requiere, aplicar la fórmula correspondiente.
Presión atmosférica	Cuantitativo (Variable independiente)	Fuerza ejercida por la masa de aire sobre la superficie terrestre; puede influir en las condiciones ambientales del cultivo.	Datos en hPa recopilados cada 30 min mediante el sensor BME280, ubicado a 2 m del sustrato.	Valor mínimo, medio y máximo. Diario.	Si se requiere, aplicar la fórmula correspondiente.

Nota. Elaboración propia

Las variables disponibilidad de espacio, densidad de siembra, ciclo del cultivo y frecuencia de adquisición de datos fueron variables declaradas del estudio, utilizadas para describir las condiciones experimentales y el protocolo de monitoreo. Estas variables no fueron objeto de medición ni de análisis estadístico, dado que permanecieron constantes durante el desarrollo del experimento.

5 DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

5.1 Instrumentos de recolección de información

El presente estudio se fundamenta esencialmente en un dispositivo de seguimiento desarrollado y construido por los mismos investigadores. Dicha herramienta integra un módulo recolector de información, diversos detectores de parámetros físicos y un portal digital destinado a la observación de los datos obtenidos, ya sea en el momento actual o mediante registros pasados. Bajo una metodología cuantitativa y no experimental, este mecanismo posibilita el almacenamiento de los indicadores fundamentales para la agricultura urbana en Bogotá y regiones de temperaturas moderadas.

Con el propósito de asegurar la fiabilidad del recurso, se solicitará el juicio de un mínimo de dos especialistas independientes con trayectoria en ingeniería electrónica, agronomía, gestión ambiental, la automatización operativa o la arquitectura de sistemas empujados. Tales expertos analizarán la idoneidad, lógica y robustez técnica del dispositivo, verificando que los indicadores registrados coincidan con las metas de la investigación y analizando el impacto potencial de la tecnología en el progreso de las plantaciones.

• **Procedimiento de pilotaje**

Antes de dar comienzo a la obtención oficial de información, el mecanismo de seguimiento atravesará un periodo de ensayo bajo escenarios auténticos dentro del área urbana de la población de San Francisco (Cundinamarca). Esta evaluación inicial posibilitará:

Tabla 5

Resumen del conjunto de datos analizado

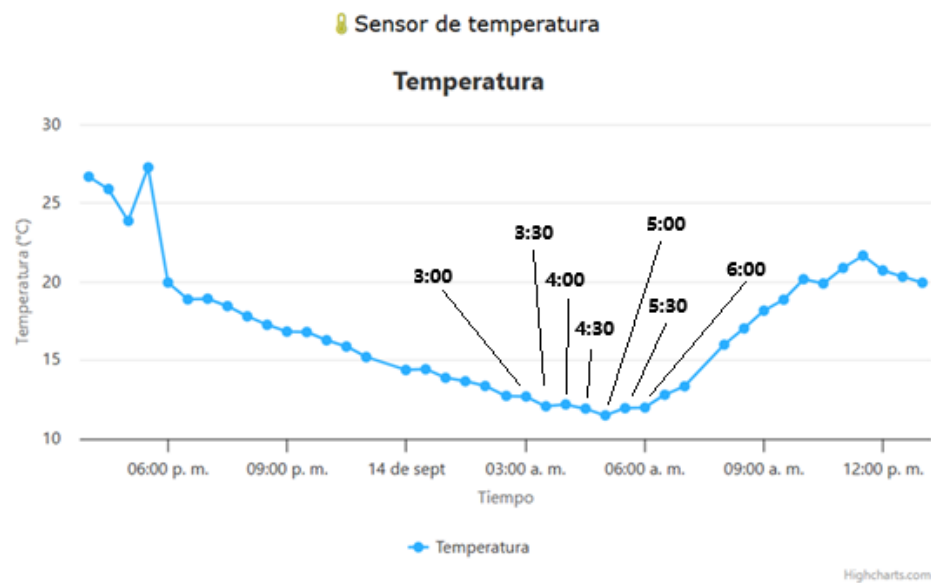
Sensor principal	BME280 integrado a ESP32-WROOM-32
Periodo analizado	23/09/2025 19:09 a 26/09/2025 10:08
Número de lecturas válidas	124 lecturas reales de temperatura, humedad relativa y presión

Nota. Elaboración propia

- Comprobar que el sistema adquiere y transmite datos de forma estable cada 30 minutos.

Figura 2

Medición de temperatura



Nota. Elaboración propia

- Identificar posibles fallas en la conectividad, la alimentación eléctrica o el registro de datos en la base de datos.
- Contrastar la precisión de las mediciones del sistema de acuerdo con instrumentos de referencia o de lectura manual.

Figura 3

Medición de variables: temperatura, humedad y presión



Nota. Elaboración propia

- Verificar que la interfaz de la plataforma web muestre correctamente tanto los datos históricos como los registros en tiempo real.

Figura 4

Ingreso a página web, monitoreo de sensores en Bogotá



Nota. Elaboración propia

Figura 5

Ingreso a página web, monitoreo de sensores en San Francisco



Nota. Elaboración propia

El examen de los hallazgos experimentales consistirá en verificar la constancia de los datos, contrastarlos con parámetros de referencia y calificar el desempeño integral del esquema.

Partiendo de ello, se realizaron las correcciones pertinentes antes del despliegue con las diversas clases de plantaciones.

El instrumento principal de recolección fue un sistema propio de monitoreo ambiental compuesto por un microcontrolador ESP32-WROOM-32, un sensor BME280, Un repositorio alojado en la nube junto a una interfaz en línea facilitaron el acceso a información histórica y actual. El mecanismo mencionado hizo posible la recolección de presión ambiental, humedad relativa y temperatura del aire con sellos cronológicos en intervalos nominales de 30 minutos.

De manera complementaria se utilizó una bitácora de observación para registrar eventos de manejo como riego manual, cambios de ubicación, mantenimiento y observaciones generales del estado del montaje.

Tabla 6

Instrumentación empleada en el prototipo de monitoreo. Fuente: elaboración propia

Componente	Función	Variable asociada	Observación metodológica
ESP32-WROOM-32	Adquisición, procesamiento y transmisión de datos	Nodo de monitoreo	Opera como plataforma de captura y envío vía Wi-Fi.
BME280	Sensado ambiental	Temperatura, humedad relativa y presión	Sensor principal del estudio; no mide variables de sustrato.
Firebase / base de datos	Almacenamiento de registros	Históricos y trazabilidad	Conserva cada lectura con marca temporal para consulta posterior.

Componente	Función	Variable asociada	Observación metodológica
Interfaz web	Visualización y consulta	Series históricas y estado general	Permite seguimiento del sistema y revisión del comportamiento temporal.

Nota. Elaboración propia

Adicionalmente se implementa otro sistema en la ciudad de Bogotá D.C., así para verificar el comportamiento de los dos sistemas. Esta evaluación tiene como objetivo obtener más datos, ya que presenta en una zona urbana con mayor facilidad de internet:

Tabla 7

Resumen del conjunto de datos analizado

Sensor principal	BME280 integrado a ESP32-WROOM-32
Periodo analizado	07/08/2025 10:49 a 10/12/2025 20:07
Número de lecturas válidas	5664 lecturas reales de temperatura, humedad relativa y presión

Nota. Elaboración propia

5.2 Selección de plantas a monitorear

Se escogieron los ejemplares vegetales priorizando la diversidad de funciones y requerimientos con el propósito de analizar el sistema en diversos contextos ambientales. Se incluyeron cultivos de raíz (zanahoria), fruto (fresa o tomate), hoja (lechuga) y aromáticas (romero, manzanilla y té), cada uno con ventanas óptimas diferenciadas de temperatura y humedad relativa. Esta variedad permite observar respuestas contrastantes del cultivo ante las mismas condiciones

urbanas y afinar umbrales de alerta por tipo de planta. En particular, la tabla de referencia del proyecto recoge rangos operativos como la temperatura, humedad y presión:

Tabla 8

Rangos de referencia de variables ambientales por cultivo seleccionado

Categoría	Planta	Temperatura óptima (°C)	Humedad relativa (%)	Presión atmosférica (hPa)	Imagen
Raíz	Zanahoria	16 – 22 °C	60 – 70 %	820 – 830 hPa	
Fruta	Fresa	18 – 24 °C	65 – 80 %	820– 830 hPa	
Aromática	Romero	15 – 25 °C	50 – 60 %	820 – 830 hPa	
Aromática	Manzanilla	18 – 22 °C	55 – 65 %	820–830 hPa	
Aromática	Té	13 – 20 °C	70 – 90 %	820 – 830 hPa	

Hoja	Lechuga	15 – 20 °C	60 – 70 %	820 – 830 hPa	
------	---------	------------	-----------	---------------	---

Nota. Elaboración propia con base en rangos de referencia de variables ambientales para cultivos seleccionados.

El montaje real incorporó unidades de cultivo con especies de interés práctico para el entorno urbano, entre ellas fresa, un frutal joven y especies complementarias establecidas en llantas reutilizadas. No obstante, para el análisis agronómico comparativo se emplearon tres especies de referencia con requerimientos contrastantes: lechuga, albahaca y tomate.

Esta decisión metodológica permite evaluar, a partir del microclima observado, qué tan favorable resulta el entorno para un cultivo de hoja, uno aromático y uno de fruto. Dado que en esta etapa solo se midieron variables ambientales, la comparación por especie se interpreta como una referencia técnica de adecuación del ambiente y no como una medición fisiológica directa del cultivo.

5.3 Selección de sensores y plataforma de monitoreo

Dentro del actual estudio se determinan los factores listados, tanto principales como complementarios:

Tabla 9

Variables primarias y secundarias

Tipo de información	Instrumento sugerido	Naturaleza
Primaria	- Módulo de sensado ambiental BME280 para la captura automática de datos. - Seguimiento directo de las unidades de	Cuantitativa

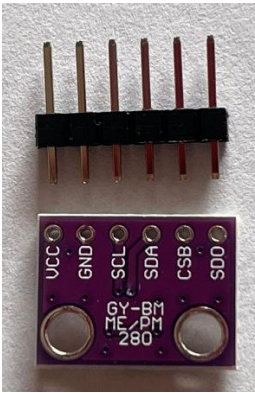
	cultivo mediante registro fotográfico y bitácora del ciclo productivo.	
Secundaria	- Repositorios de información climática regional (IDEAM, SIAC o AccuWeather) para la consulta de condiciones históricas y actuales del entorno.	Cuantitativa

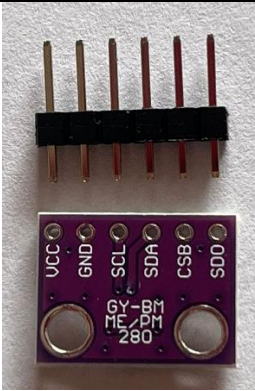
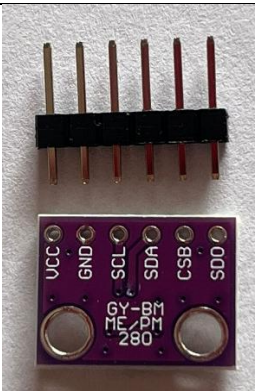
Nota. Elaboración propia

A partir de la definición y operacionalización de las variables del estudio, se diseñaron los instrumentos necesarios para recopilar información tanto primaria como secundaria. Para hacer seguimiento a las condiciones ambientales, se seleccionaron herramientas electrónicas aptas para el microcontrolador ESP32 Wroom, encargado de recolectar y gestionar los datos. Sobresale el detector BME280, que registra de forma independiente la temperatura, presión del aire y humedad del entorno, garantizando así un flujo constante de información numérica.

Tabla 10

Instrumentos

Variable	Instrumento	Descripción	Imagen
Temperatura ambiental	Sensor BME280	Dispositivo electrónico de medición que permite registrar con alta exactitud las variaciones térmicas del entorno de cultivo.	
Presión atmosférica	Sensor BME280	Parámetro ambiental capturado de forma integrada junto con la temperatura y la humedad en una sola lectura del módulo.	

			
Humedad ambiental	Sensor BME280	Indicador del nivel de vapor de agua presente en el ambiente, fundamental para el seguimiento de las condiciones óptimas del cultivo.	
Registro de datos	Base de datos y visualización web, Fire Base	Servicio basado en el cloud que guarda y muestra al instante los datos obtenidos por sensores, simplificando su revisión y estudio posterior.	

Nota. Elaboración propia. Fotografías propias del módulo sensor BME280 utilizado en el prototipo.

Se seleccionó el sensor BME280 por su compatibilidad con la plataforma ESP32, su estabilidad de medición y su capacidad para integrar en un solo módulo las variables ambientales más relevantes para esta fase: temperatura, humedad relativa y presión atmosférica. La presión se utilizó como variable contextual para describir la estabilidad atmosférica del periodo analizado.

La solución de almacenamiento y consulta se apoyó en Firebase y en una interfaz web, lo cual permitió registrar las lecturas en la nube y revisar su evolución histórica. Esta arquitectura resulta adecuada para prototipos IoT de bajo costo y rápida implementación.

Figura 6

Historial de medición de sensores

Marca de tiempo	Temp (°C)	Hum (%)	Pres (hPa)
2025/10/30 19:18:47	17.77	79.40	754.86
2025/10/30 18:48:47	18.24	77.96	754.28
2025/10/30 18:18:47	17.76	80.12	754.04
2025/10/30 17:48:47	18.13	79.47	753.69
2025/10/30 17:18:48	18.88	76.61	753.26
2025/10/30 16:48:48	20.20	67.58	752.91
2025/10/30 16:18:48	21.54	59.46	752.49
2025/10/30 15:48:48	22.55	57.96	752.39
2025/10/30 15:18:48	24.75	50.63	752.44
2025/10/30 14:48:48	25.62	48.21	752.62
2025/10/30 14:18:48	23.54	53.83	753.03
2025/10/30 13:48:48	23.02	55.08	753.47
2025/10/30 13:18:48	22.85	55.52	753.96
2025/10/30 12:48:48	22.39	55.53	754.43
2025/10/30 12:18:48	21.79	55.44	754.87
2025/10/30 11:48:48	21.17	57.33	755.51
2025/10/30 11:18:48	20.57	58.66	755.94
2025/10/30 10:48:48	19.68	60.96	756.34
2025/10/30 10:18:48	19.97	59.49	756.62
2025/10/30 09:48:48	19.76	61.31	756.62

Marca de tiempo	Temp (°C)	Hum (%)	Pres (hPa)
2025/09/26 10:08:58	25.88	42.21	842.88
2025/09/26 09:38:58	23.98	46.76	843.32
2025/09/26 09:08:58	25.59	45.44	843.45
2025/09/26 08:38:58	23.25	53.24	843.43
2025/09/26 08:08:58	21.09	57.15	843.41
2025/09/26 07:38:58	20.08	61.73	843.08
2025/09/26 07:08:58	18.48	63.01	842.91
2025/09/26 06:38:58	16.20	71.14	842.49
2025/09/26 06:08:58	15.32	68.93	841.99
2025/09/26 05:38:58	15.16	71.75	841.63
2025/09/26 05:08:58	14.92	73.34	841.36
2025/09/26 04:38:58	15.78	67.67	841.21
2025/09/26 04:08:59	14.98	74.07	840.96
2025/09/26 03:38:59	15.64	67.95	841.04
2025/09/26 03:08:59	17.28	60.38	841.23
2025/09/26 02:38:59	15.76	67.93	841.55
2025/09/26 02:08:59	16.09	67.15	841.96
2025/09/26 01:38:59	16.14	69.07	842.19
2025/09/26 01:08:59	16.53	67.02	842.15
2025/09/26 00:38:59	16.70	67.68	842.28
2025/09/26 00:08:59	16.49	68.12	842.51
2025/09/25 23:38:59	16.58	67.92	842.69
2025/09/25 23:08:59	16.87	70.04	842.81
2025/09/25 22:38:59	17.23	68.87	843.04
2025/09/25 22:08:59	17.13	69.97	842.83
2025/09/25 21:38:59	17.65	67.26	842.74
2025/09/25 21:08:59	17.96	64.67	842.37
2025/09/25 20:38:59	19.07	62.86	841.99
2025/09/25 20:08:59	18.94	68.29	841.97
2025/09/25 19:38:59	19.15	71.04	841.70
2025/09/25 19:08:59	20.17	67.64	841.23
2025/09/25 18:38:59	20.55	65.21	840.64

Nota. Elaboración propia

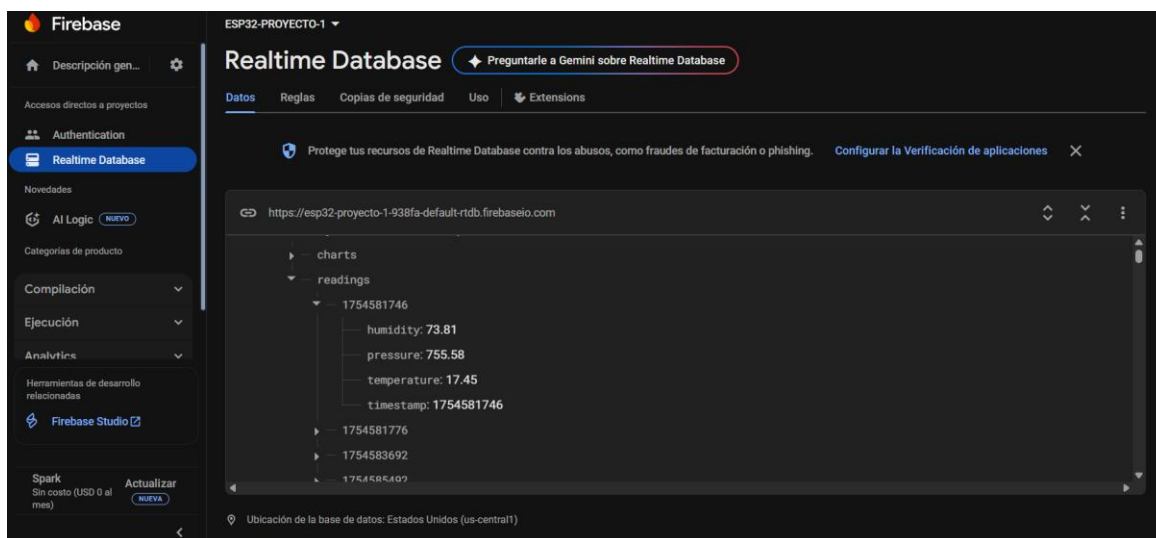
5.4 Envío de datos al servidor y visualización

Una vez finalizada la obtención de información, los registros se guardan en el sistema Firebase para mantener un seguimiento de varios días y horas. Estos contenidos se muestran en el sitio web, sirviendo como herramienta para localizar tendencias o comportamientos repetitivos.

El flujo de datos parte de los sensores hacia el ESP32 (lectura y preprocesamiento), luego por Wi-Fi al servicio en la nube y finalmente a la interfaz web. En esta arquitectura, cada lectura se persiste en Firebase con marca temporal y metadatos del nodo, habilitando series históricas por variable y por cultivo, a la vez, gráficas en tiempo real para el usuario. Esta estructura soporta consultas por rango de fechas y la generación de alertas simples (p. ej., superar umbrales definidos por especie).

Figura 7

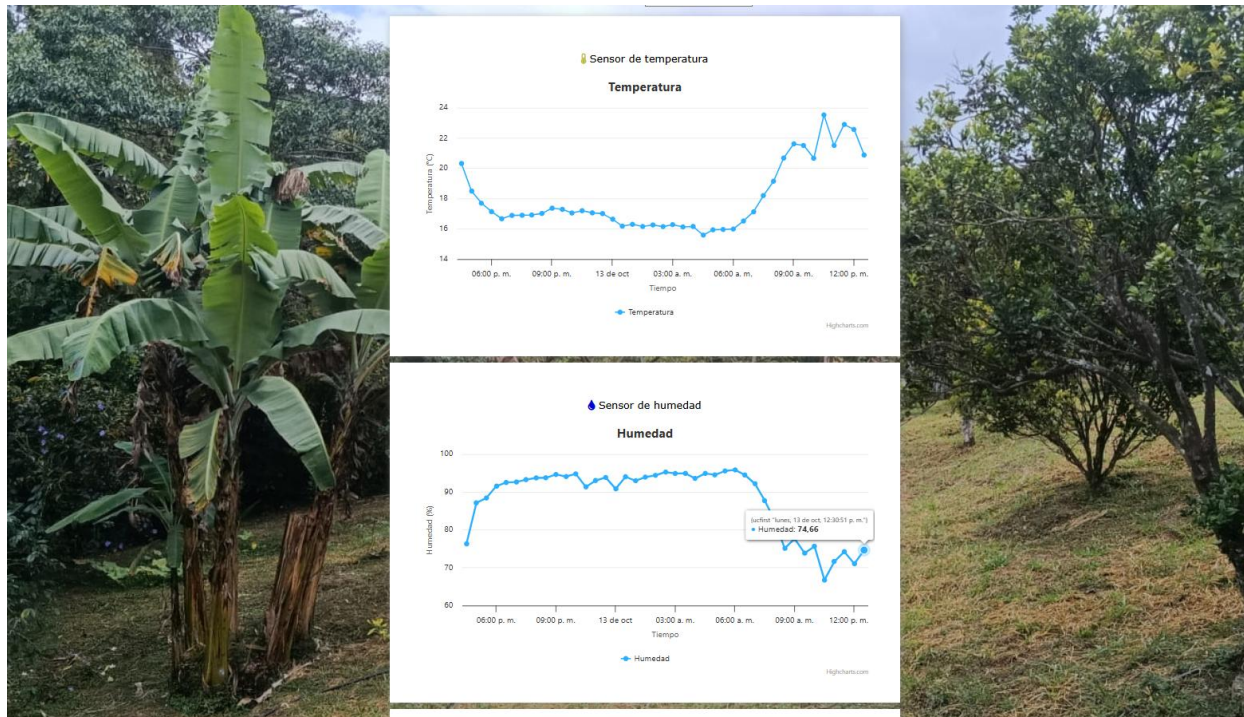
Plataforma de base de datos Firebase Realtime Database utilizada para el almacenamiento de registros.



Nota. Captura de pantalla de la consola de Firebase Realtime Database del sistema desarrollado (elaboración propia).

Figura 8

Entorno de instalación del prototipo y visualización de variables ambientales (temperatura y humedad relativa).



Nota. Composición y elaboración propia a partir de fotografía del sitio de validación y capturas de pantalla del sistema de monitoreo.

El flujo de datos parte del sensor BME280 hacia el ESP32, donde se realiza la lectura y el preprocesamiento básico. Posteriormente, los datos se transmiten por Wi-Fi hacia el servicio en la nube y quedan almacenados con marca temporal. Finalmente, la plataforma web consulta estos registros para construir series históricas y visualizaciones de apoyo a la toma de decisiones.

5.5 Montaje inicial del prototipo

Objetivo. Se implementa en un nodo de monitoreo ambiental con ESP32-WROOM-32 + BME280 funcionando de forma estable.

Componentes

- ESP32-WROOM-32 (Wi-Fi).
- Módulo BME280 (I²C) – mide Temperatura (°C), Humedad relativa (%), Presión (hPa).
- Jumpers Dupont,
- 1 condensador 100 nF entre VCC–GND del BME280 (desacoplo).
- Modem con SimCard, este se usará para dar internet al equipo en dado caso que no hay WiFi.

Cableado (I²C, 3.3 V)

- VCC → 3V3, GND → GND, SCL → GPIO22, SDA → GPIO21.

Montaje físico

- Colocación BME280 en una zona cubierta (protegido del sol/lluvia, con ventilación).
- Separado de 2 a 3 cm del ESP32 y de reguladores/calor para reducir autocalentamiento.
- Se mantiene cables I²C cortos (<30 cm) y con GND común

Tabla 11

Asignación de pines y tipo de señal para la conexión del sensor al ESP32-WROOM-32

Sensor	Pines del sensor	Pin ESP32-WROOM-32	Tipo de señal
BME280 (I2C)	VCC, GND, SCL, SDA	VCC → 3.3V GND → GND SCL → GPIO22 SDA → GPIO21	I2C

Nota. Elaboración propia

El montaje físico se desarrolló en un espacio exterior del municipio de San Francisco (Cundinamarca) y adicionalmente otro circuito en Bogotá D.C., empleando llantas reutilizadas como unidades de cultivo, soportes metálicos y un arreglo compacto de plantas. El sensor se ubicó

próximo al follaje y en una condición de sombra ventilada, con el fin de caracterizar el microclima cercano al sistema sin exponer el módulo directamente al sol o a la lluvia.

La disposición del montaje evidencia un enfoque de agricultura urbana con aprovechamiento de materiales reutilizados, bajo costo de implementación y facilidad de réplica en espacios domésticos o periurbanos.

Figura 9

Evidencia fotográfica del montaje real del prototipo: a) montaje general; b) unidad con fresa; c) unidad con frutal joven; d) especies complementarias en llanta reutilizada.



a) Montaje general del prototipo



b) Unidad de cultivo con fresa



c) Unidad de cultivo de frutal joven



d) Especies complementarias en llanta reutilizada

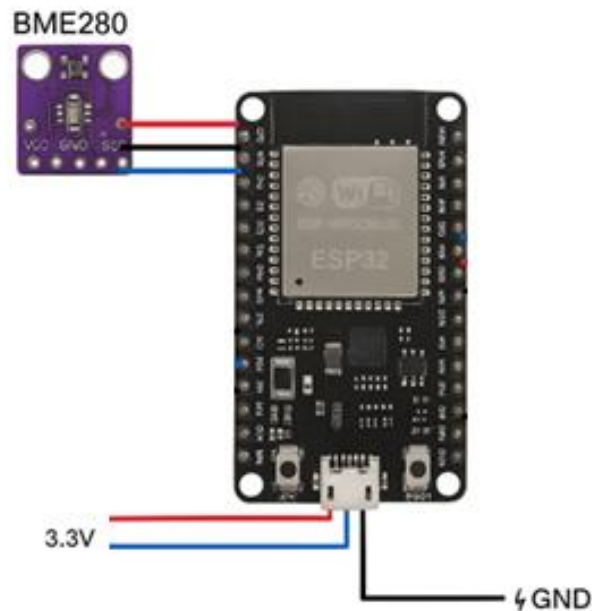
Nota. Elaboración propia.

5.6 Implementación de sensores y pruebas de conexión

El sistema cuenta con una tarjeta microcontroladora ESP32, conectada al sensor y alimentación, esta a su vez se conectada a internet para enviar datos de las variables del sensor.

Figura 10

Conexión de la tarjeta, capa física



Nota. Elaboración propia

La integración del nodo consistió en la conexión del BME280 al ESP32 mediante protocolo I²C, con alimentación a 3.3 V y una configuración estable para lectura periódica. Antes de la captura formal de datos se realizaron pruebas de energización, conexión de red, almacenamiento y consistencia temporal de las lecturas.

Estas pruebas permitieron verificar que el sistema era capaz de registrar y transmitir información con periodicidad aproximada de 30 minutos, así como identificar de manera temprana posibles problemas de conectividad.

5.7 Desarrollo de base de datos inicial

Una vez finalizado el registro de datos, la información queda almacenada permanentemente en la base Firebase. Este proceso facilita la conservación de un seguimiento cronológico de registros durante múltiples horas y jornadas, el cual se examina y se muestra después mediante la plataforma web.

Cada lectura fue almacenada en la base de datos con su respectiva marca de tiempo. Este diseño facilitó la construcción de históricos, la exportación de registros y el posterior análisis en Excel. A nivel metodológico, la base de datos se comportó como el repositorio primario para consolidar la evidencia cuantitativa del prototipo.

5.8 Pruebas con cultivos

Para el presente corte analítico se trabajó con 124 lecturas válidas registradas entre el 23/09/2025 19:09 y el 26/09/2025 10:08. La frecuencia nominal fue de 30 minutos, lo cual permitió capturar variaciones diurnas y nocturnas del microclima. En esta fase no se incluyeron sensores de humedad o temperatura del sustrato, por lo que el diagnóstico se limita al ambiente cercano al sistema de cultivo.

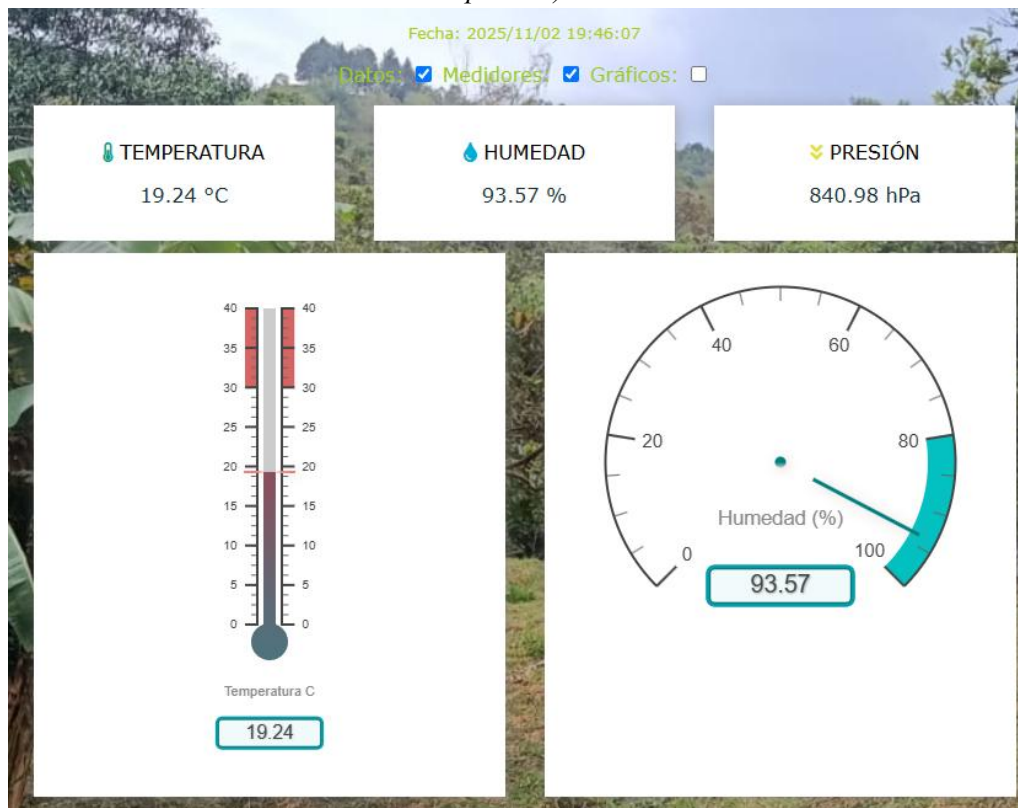
La bitácora de seguimiento se orientó a observaciones de manejo y estado general del montaje, especialmente riego manual, ubicación, exposición a radiación y percepción del estado de las plantas.

5.9 Ajuste del sistema y calibraciones

Tomando las mediciones del sensor se compara con las mediciones de Google, clima para tener en cuenta el estado de los sensores estén dentro del rango y realizar las respectivas calibraciones.

Figura 11

Visualización de variables ambientales en la interfaz del sistema (temperatura, humedad relativa y presión).



Nota. Captura de pantalla del sistema desarrollado (elaboración propia).

Figura 12

Lectura meteorológica de referencia (Google Clima) para el periodo de observación.



Nota. Nota. Captura de pantalla de Google Clima (Google, s/f) ,recuperada el 2 de noviembre de 2025, de <https://www.google.com/search?q=clima+san+francisco+cundinamarca>

Las lecturas obtenidas se contrastaron cualitativamente con referencias meteorológicas locales y con el comportamiento esperado del sensor, buscando detectar desviaciones evidentes o fallas de estabilidad. Más que una calibración metrológica exhaustiva, esta fase correspondió a un ajuste operativo del sistema para garantizar coherencia y continuidad en el registro.

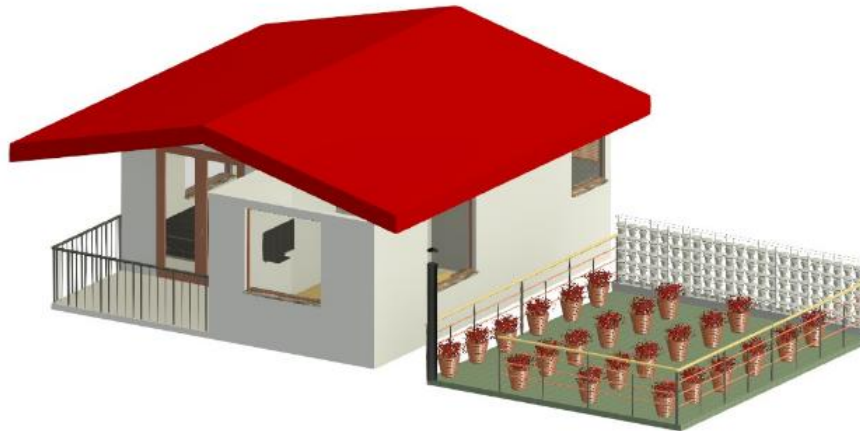
5.10 Validación del prototipo en condiciones reales

La validación del prototipo se fundamentó en tres evidencias:

- i) Captura efectiva de datos ambientales durante un periodo continuo de observación.
- ii) Correspondencia del patrón medido con la dinámica climática esperada para el entorno.
- iii) Existencia de un montaje físico funcional en un contexto real de agricultura urbana. Sobre esta base se desarrolló el análisis cuantitativo presentado en el capítulo siguiente.

Figura 13

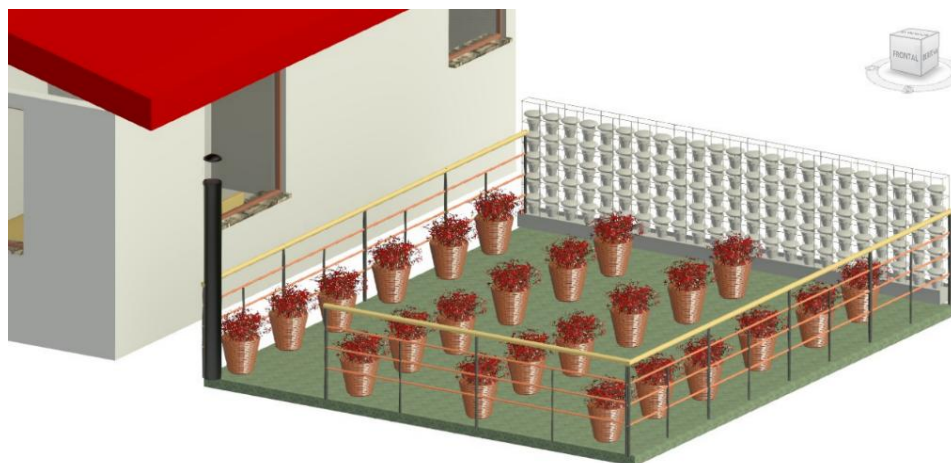
Simulación 3D del escenario de siembra del prototipo en entorno urbano.



Nota. Elaboración propia. Modelo 3D desarrollado en SketchUp

Figura 14

Simulación 3D del escenario de siembra y distribución de unidades de cultivo.



Nota. Elaboración propia. Modelo 3D desarrollado en Revit.

Se realiza un plano del área a sembrar, en una simulación cuantas plantas se pueden sembrar, posteriormente se escoge un lugar donde cumple los requisitos de siembra

Figura 15

Espacio de instalación del área de siembra en San Francisco (Cundinamarca).



Nota. Elaboración propia.

6 RESULTADOS

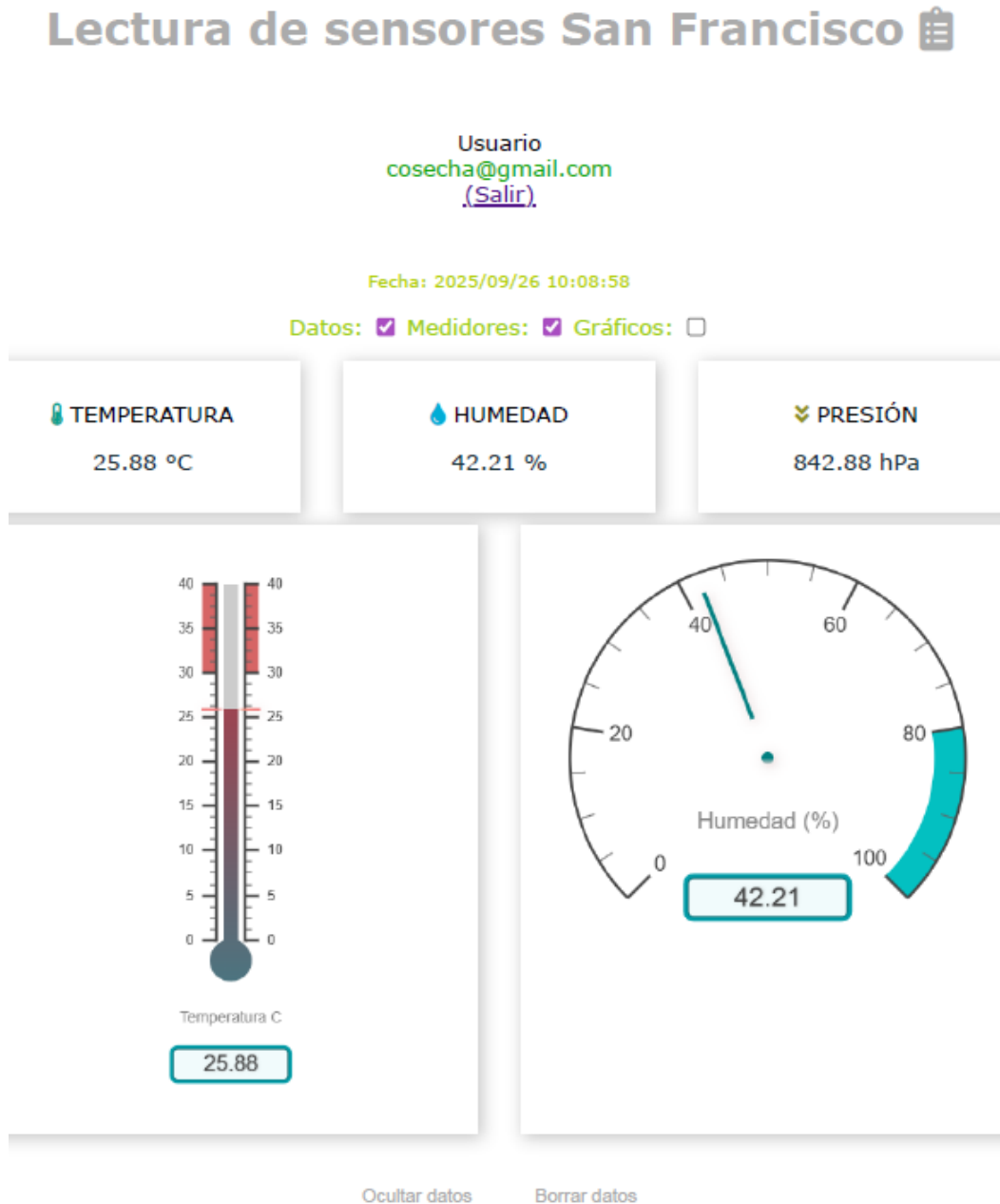
6.1 Resultados — Objetivo específico 1 (Identificar factores determinantes)

124 lecturas reales del sensor BME280 entre el periodo cubierto fue de 63.0 horas, desde el 23/09/2025 19:09 hasta el 26/09/2025 10:08. Para una frecuencia ideal de 30 minutos, la ventana analizada esperada habría producido 126 registros; en consecuencia, la integridad observada del conjunto de datos fue de 98.41 %, equivalente a dos lecturas faltantes.

A pesar de esta pequeña discontinuidad, el archivo presenta suficiente continuidad para describir el comportamiento del microclima y sustentar una primera interpretación agronómica del sistema.

Figura 16

Evidencia de visualización y consulta de datos del sistema de monitoreo.



(a) Panel de medidores

Marca de tiempo	Temp (°C)	Hum (%)	Pres (hPa)
2025/09/26 10:08:58	25.88	42.21	842.88
2025/09/26 09:38:58	23.98	46.76	843.32
2025/09/26 09:08:58	25.59	45.44	843.45
2025/09/26 08:38:58	23.25	53.24	843.43
2025/09/26 08:08:58	21.09	57.15	843.41
2025/09/26 07:38:58	20.08	61.73	843.08
2025/09/26 07:08:58	18.48	63.01	842.91
2025/09/26 06:38:58	16.20	71.14	842.49
2025/09/26 06:08:58	15.32	68.93	841.99
2025/09/26 05:38:58	15.16	71.75	841.63
2025/09/26 05:08:58	14.92	73.34	841.36
2025/09/26 04:38:58	15.78	67.67	841.21
2025/09/26 04:08:59	14.98	74.07	840.96
2025/09/26 03:38:59	15.64	67.95	841.04
2025/09/26 03:08:59	17.28	60.38	841.23
2025/09/26 02:38:59	15.76	67.93	841.55
2025/09/26 02:08:59	16.09	67.15	841.96
2025/09/26 01:38:59	16.14	69.07	842.19
2025/09/26 01:08:59	16.53	67.02	842.15
2025/09/26 00:38:59	16.70	67.68	842.28
2025/09/26 00:08:59	16.49	68.12	842.51
2025/09/25 23:38:59	16.58	67.92	842.69
2025/09/25 23:08:59	16.87	70.04	842.81
2025/09/25 22:38:59	17.23	68.87	843.04
2025/09/25 22:08:59	17.13	69.97	842.83
2025/09/25 21:38:59	17.65	67.26	842.74
2025/09/25 21:08:59	17.96	64.67	842.37
2025/09/25 20:38:59	19.07	62.86	841.99
2025/09/25 20:08:59	18.94	68.29	841.97
2025/09/25 19:38:59	19.15	71.04	841.70
2025/09/25 19:08:59	20.17	67.64	841.23
2025/09/25 18:38:59	20.55	65.21	840.64
2025/09/25 18:08:59	20.55	65.84	840.02
2025/09/25 17:38:59	21.73	62.94	839.50
2025/09/25 17:08:59	24.67	51.14	839.22

(b) Registros (parte 1)

2025/09/25 16:38:59	25.29	49.05	839.02
2025/09/25 16:09:00	27.61	43.08	838.48
2025/09/25 15:39:00	30.42	36.03	838.52
2025/09/25 15:09:00	30.60	35.26	838.68
2025/09/25 14:39:00	31.29	34.03	839.11
2025/09/25 14:09:00	28.66	39.72	839.90
2025/09/25 13:09:00	28.81	40.48	840.66
2025/09/25 12:09:01	29.27	39.63	841.89
2025/09/25 11:39:01	28.74	41.71	842.43
2025/09/25 11:09:01	27.77	43.33	842.84
2025/09/25 10:39:01	24.90	50.16	843.53
2025/09/25 10:09:01	23.75	55.33	844.15
2025/09/25 09:39:01	23.29	58.31	844.34
2025/09/25 09:09:01	23.32	58.59	844.56
2025/09/25 08:39:01	22.18	61.05	844.46
2025/09/25 08:09:01	21.67	65.45	844.13
2025/09/25 07:39:01	19.99	70.79	844.11
2025/09/25 07:09:01	19.55	73.32	844.22
2025/09/25 06:39:01	18.41	79.07	844.08
2025/09/25 06:09:01	16.58	84.82	843.76
2025/09/25 05:39:01	16.45	84.73	843.69
2025/09/25 05:09:01	16.60	83.76	843.20
2025/09/25 04:39:01	16.97	81.78	842.96
2025/09/25 04:09:01	17.55	79.46	842.73
2025/09/25 03:39:01	17.93	79.33	842.80
2025/09/25 03:09:01	18.56	76.20	842.93
2025/09/25 02:39:01	18.92	73.47	842.68
2025/09/25 02:09:01	18.72	74.37	842.28
2025/09/25 01:39:01	18.60	76.11	842.23
2025/09/25 01:09:01	19.38	71.12	842.57
2025/09/25 00:39:02	19.83	68.85	842.82
2025/09/25 00:09:02	19.66	68.85	842.89
2025/09/24 23:39:02	19.60	70.74	843.07
2025/09/24 22:39:02	19.77	62.78	843.11
2025/09/24 22:09:02	21.04	55.11	842.40
2025/09/24 21:39:02	21.01	56.70	842.39
2025/09/24 21:09:02	20.39	63.74	842.58

(c) Registros (parte 2)

2025/09/24 20:39:02	20.60	69.21	842.43
2025/09/24 20:09:02	20.61	71.23	841.85
2025/09/24 19:39:02	20.71	69.61	841.22
2025/09/24 19:09:02	21.07	69.16	840.86
2025/09/24 18:39:02	21.31	67.30	840.55
2025/09/24 18:09:02	21.40	60.39	839.69
2025/09/24 17:39:02	23.89	48.79	839.42
2025/09/24 17:09:02	24.94	44.02	839.31
2025/09/24 16:39:02	25.56	46.35	839.23
2025/09/24 16:09:02	27.78	43.64	838.94
2025/09/24 15:39:02	28.33	44.83	838.65
2025/09/24 15:09:02	28.26	42.49	838.75
2025/09/24 14:39:02	29.10	41.80	838.76
2025/09/24 14:09:02	29.99	39.55	838.90
2025/09/24 13:39:02	26.99	43.20	839.50
2025/09/24 13:09:02	30.57	36.04	839.93
2025/09/24 12:39:02	28.61	40.62	840.61
2025/09/24 12:09:02	27.78	44.04	841.26
2025/09/24 11:39:02	29.52	38.60	841.78
2025/09/24 11:09:02	26.29	46.44	841.93
2025/09/24 10:39:02	26.60	46.16	842.03
2025/09/24 10:09:02	27.02	43.62	842.34
2025/09/24 09:39:02	27.99	40.78	842.42
2025/09/24 09:09:02	23.28	54.75	842.56
2025/09/24 08:39:03	23.87	54.90	842.32
2025/09/24 08:09:03	22.54	59.97	842.01
2025/09/24 07:39:03	20.74	68.49	841.94
2025/09/24 07:09:03	19.14	76.22	841.99
2025/09/24 06:39:03	17.25	81.64	841.50
2025/09/24 06:09:03	15.77	87.13	841.45
2025/09/24 05:39:03	15.97	86.97	841.16
2025/09/24 05:09:03	16.04	86.84	840.80
2025/09/24 04:39:03	16.11	86.79	840.54
2025/09/24 04:09:03	16.90	84.71	840.64
2025/09/24 03:39:03	17.19	82.80	840.95
2025/09/24 03:09:03	17.58	83.28	841.08
2025/09/24 02:39:03	17.52	84.33	841.15

(d) Registros (parte 3)

2025/09/24 02:09:03	17.29	84.73	841.01
2025/09/24 01:39:03	17.40	83.66	841.44
2025/09/24 01:09:03	17.48	84.87	841.74
2025/09/24 00:39:03	18.06	81.77	841.94
2025/09/24 00:09:03	18.20	81.66	841.94
2025/09/23 23:39:04	18.29	83.08	841.99
2025/09/23 23:09:04	18.20	85.94	842.23
2025/09/23 22:39:04	18.19	85.04	842.15
2025/09/23 21:39:04	18.50	83.58	841.69
2025/09/23 21:09:04	19.05	82.86	841.38
2025/09/23 20:39:04	19.57	79.41	840.95
2025/09/23 20:09:04	19.82	78.57	840.74
2025/09/23 19:39:04	20.22	76.18	840.47
2025/09/23 19:09:04	20.17	77.51	839.91

(e) Registros (parte 4)

Nota. (a) Vista de medidores del sistema; (b–e) listado de registros históricos (fragmentos). Capturas de pantalla del sistema desarrollado (elaboración propia).

Tabla 12

Caracterización básica del conjunto de datos analizado en San Francisco (Cundinamarca).

Periodo de observación	23/09/2025 19:09 a 26/09/2025 10:08
Frecuencia nominal	30 minutos
Lecturas válidas	124
Lecturas teóricas esperadas	126
Integridad del registro	98.41 %

Nota. Elaboración propia con base en Datos.xlsx.

El conjunto de datos correspondiente al despliegue en Bogotá comprendió un periodo de monitoreo de 125 días, 9 horas, 18 minutos y 24 segundos (07/08/2025 10:49:06–10/12/2025 20:07:30), durante el cual se registraron 5664 mediciones del sensor BME280. Bajo una frecuencia

de adquisición nominal de 30 minutos, se esperaban 6019 registros. La completitud del conjunto de datos fue del 94.10 %, con una pérdida de 355 registros (5.90 %).

Figura 17

Primeros y ultimos datos en Bogotá

2025/08/07 13:51:32	16.52	80.32	754.13
2025/08/07 13:21:32	15.87	83.83	754.40
2025/08/07 12:21:32	16.89	79.61	755.33
2025/08/07 11:51:32	17.13	82.89	755.51
2025/08/07 11:21:32	16.48	81.93	755.67
2025/08/07 10:49:36	17.45	73.93	755.57
2025/08/07 10:49:06	17.45	73.81	755.58

Marca de tiempo	Temp (°C)	Hum (%)	Pres (hPa)
2025/12/10 20:07:30	17.82	68.68	753.14
2025/12/10 19:37:30	17.87	68.77	752.65
2025/12/10 19:07:30	18.62	66.90	752.24
2025/12/10 18:37:30	18.68	65.95	752.04
2025/12/10 17:07:30	23.94	50.50	751.03
2025/12/10 16:37:30	30.96	40.90	751.06
2025/12/10 16:07:30	23.48	51.58	751.07
2025/12/10 15:37:30	22.01	55.51	751.13

Nota. Elaboración propia

Tabla 13

Caracterización básica del conjunto de datos analizado en Bogotá D.C.

Periodo de observación	07/08/2025 10:49 a 10/12/2025 20:07
Frecuencia nominal	30 minutos
Lecturas válidas	5664
Lecturas teóricas esperadas	6019
Integridad del registro	94.10 %

Nota. Elaboración propia con base en Datos.xlsx.

6.2 Resultados — Objetivo específico 2 (Óptimos vs. condiciones observadas)

La temperatura osciló entre 14.92 °C y 31.29 °C, con un promedio de 21.77 °C. La humedad relativa se ubicó entre 34.03 % y 84.82 %, con promedio de 59.94 %. La presión atmosférica mostró menor variabilidad, entre 838.48 y 844.56 hPa.

El análisis de correlación evidenció una relación inversa fuerte entre temperatura y humedad relativa ($r = -0.92$), coherente con el comportamiento esperado del microclima: en los periodos de mayor calentamiento ambiental la humedad relativa tiende a disminuir.

Tabla 14

Resumen estadístico de temperatura, humedad relativa y presión atmosférica

Variable	Mínimo	Máximo	Promedio	Mediana	Desv. estándar
Temperatura (°C)	14.92	31.29	21.77	20.66	4.62
Humedad relativa (%)	34.03	84.82	59.94	63.38	13.48
Presión atmosférica (hPa)	838.48	844.56	841.81	842.21	1.59

Nota. Elaboración propia con base en Datos.xlsx.

Los datos obtenidos para la ciudad de Bogotá D.C., la temperatura osciló entre 11.07 °C y 36.99 °C, con un promedio de 17.18 °C. La humedad relativa se ubicó entre 32.22 % y 95.45 %, con un promedio de 74.50 %. La presión atmosférica presentó una menor variabilidad, con valores entre 749.89 y 758.25 hPa, y un promedio de 754.26 hPa.

Antes del análisis descriptivo se aplicó un procedimiento de control de calidad de los datos, consistente en la identificación y eliminación de registros atípicos. En este proceso se encontró

una única observación con una temperatura de 184.13 °C, valor físicamente inviable para las condiciones del estudio, por lo que fue descartado del análisis estadístico.

El análisis de correlación evidenció una relación inversa fuerte entre la temperatura y la humedad relativa ($r = -0.90$), coherente con el comportamiento esperado del microclima, en el que el incremento de la temperatura se asocia con una disminución de la humedad relativa.

Tabla 15

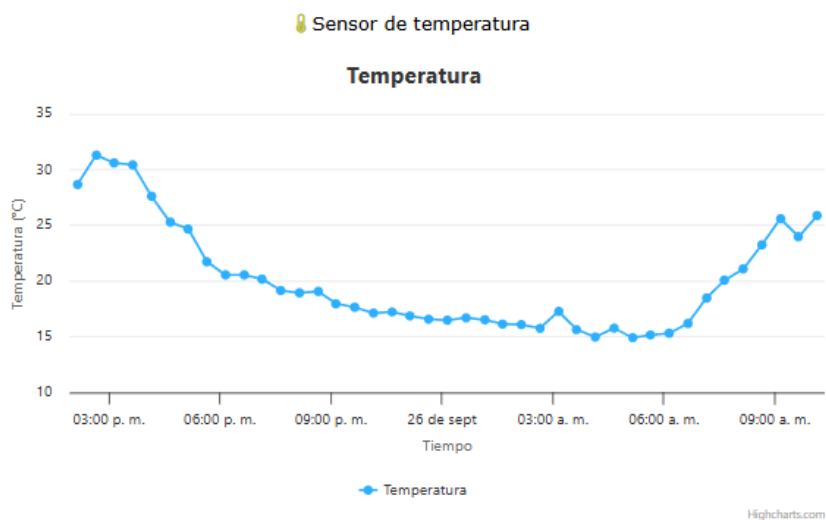
Resumen estadístico de temperatura, humedad relativa y presión atmosférica

Variable	Mínimo	Máximo	Promedio	Mediana	Desv. estándar
Temperatura (°C)	11.07	36.99	17.18	16.58	3.12
Humedad relativa (%)	32.22	95.45	74.50	76.85	10.96
Presión atmosférica (hPa)	749.89	758.25	754.26	754.33	1.41

Nota. Elaboración propia con base en Datos.xlsx.

Figura 18

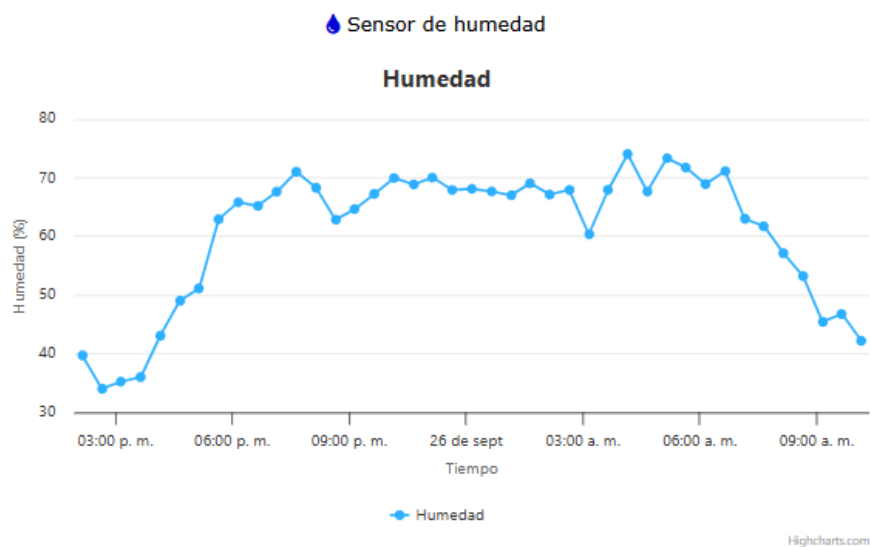
Serie temporal de temperatura registrada por el prototipo (BME280).



Nota. Captura de pantalla del sistema de monitoreo desarrollado (elaboración propia).

Figura 19

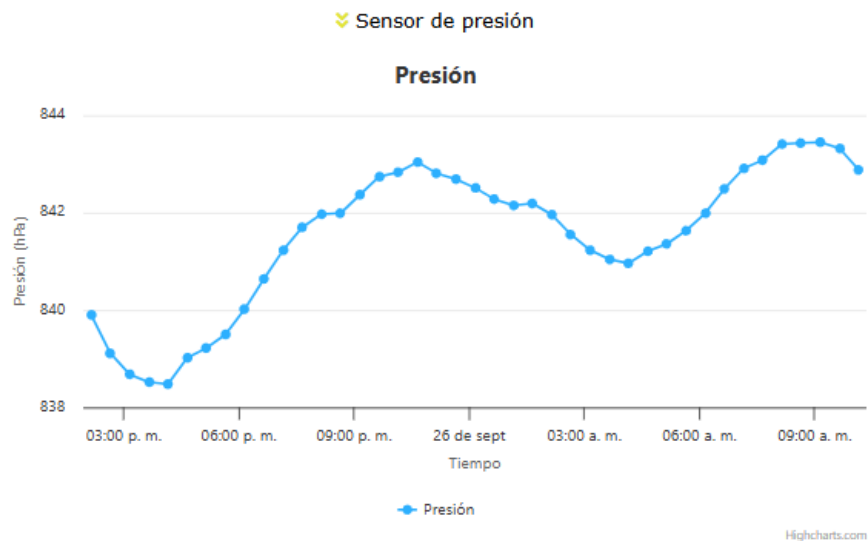
Serie temporal de humedad relativa registrada por el prototipo (BME280).



Nota. Captura de pantalla del sistema de monitoreo desarrollado (elaboración propia).

Figura 20

Serie temporal de presión atmosférica registrada por el prototipo (BME280).

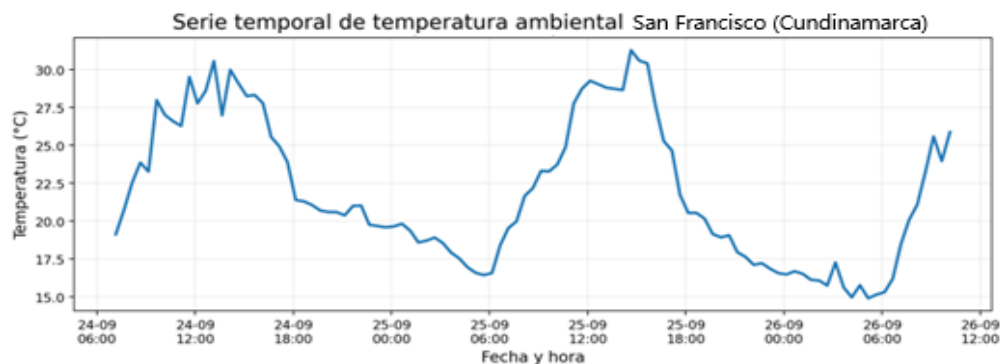


Nota. Captura de pantalla del sistema de monitoreo desarrollado (elaboración propia).

6.3 Resultados — Objetivo específico 3 (Desempeño del prototipo y flujo de datos)

Figura 21

Serie temporal de temperatura ambiental registrada por el sistema de monitoreo.

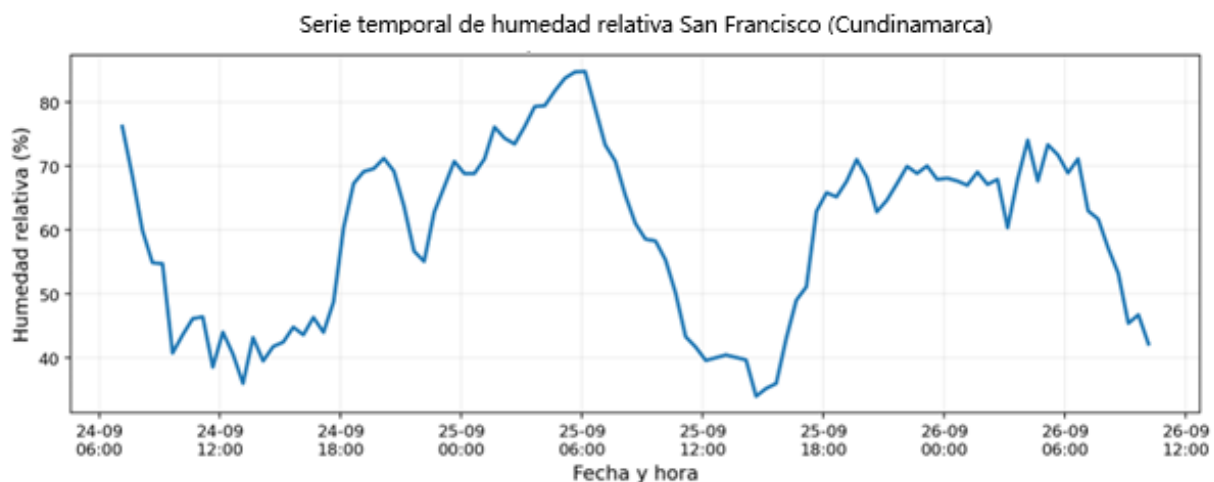


Nota. Elaboración propia con base en Datos.xlsx.

La temperatura presentó un ciclo diurno marcado. El valor máximo del periodo se registró el 25/09/2025 a las 14:39 con 31.29 °C, mientras que el mínimo ocurrió el 26/09/2025 a las 05:08 con 14.92 °C. En conjunto, el comportamiento evidencia ascensos en horas de la mañana y primeras horas de la tarde, con descensos progresivos durante la noche y la madrugada.

Figura 22

Serie temporal de humedad relativa registrada por el sistema de monitoreo.

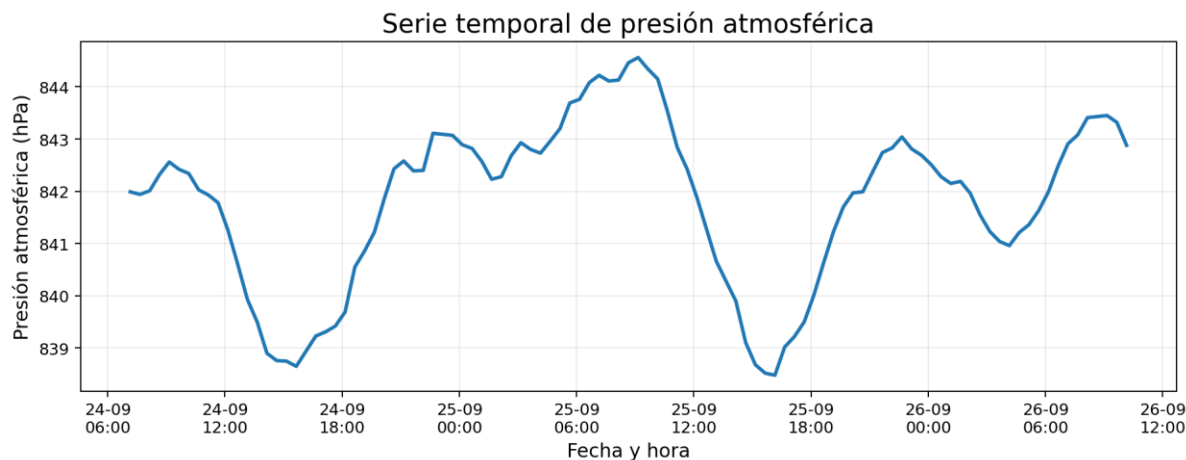


Nota. Elaboración propia con base en Datos.xlsx.

La humedad relativa mostró un patrón inverso al de la temperatura. El máximo del periodo fue de 84.82 % el 25/09/2025 a las 06:09, mientras que el mínimo fue de 34.03 % el 25/09/2025 a las 14:39. Este comportamiento indica que las horas frías acumulan mayor humedad, mientras que la radiación diurna favorece el descenso de la HR.

Figura 23

Serie temporal de presión atmosférica registrada por el sistema de monitoreo.

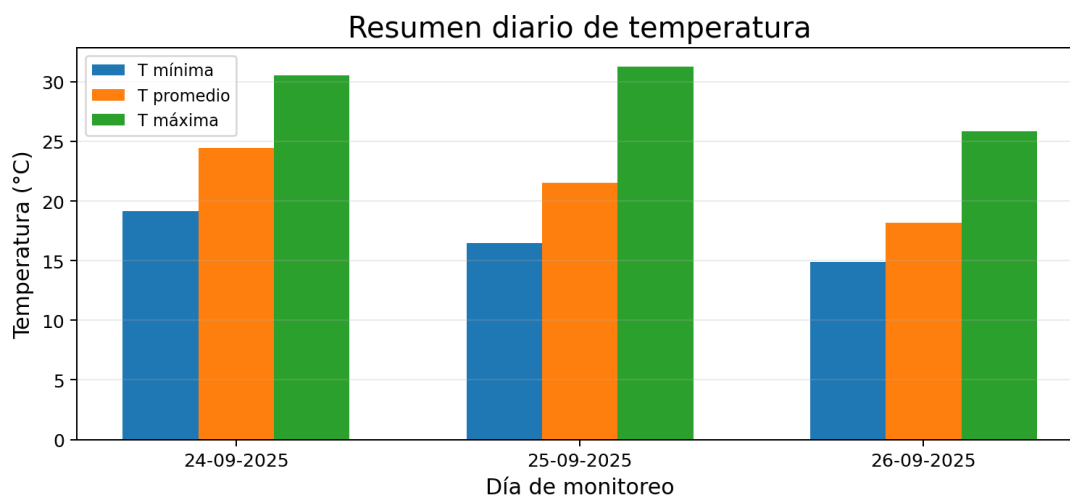


Nota. Elaboración propia con base en Datos.xlsx.

La presión atmosférica presentó una variación moderada en comparación con las otras variables, lo que confirma que su principal utilidad en este estudio es contextualizar la estabilidad ambiental del periodo y no actuar como variable de decisión agronómica directa.

Figura 24

Resumen diario de temperatura mínima, media y máxima.



Nota. Elaboración propia con base en Datos.xlsx.

Tabla 16*Resumen diario de temperatura y humedad relativa durante el periodo observado.*

Fecha	T mín	T prom	T máx	HR mín	HR prom	HR máx	Lecturas
24/09/2025	19.14	24.43	30.57	36.04	53.37	76.22	33
25/09/2025	16.45	21.51	31.29	34.03	63.06	84.82	46
26/09/2025	14.92	18.16	25.88	42.21	63.42	74.07	21

Nota. Elaboración propia con base en Datos.xlsx.

6.4 Análisis de resultados

6.4.1 Análisis – OE1: Factores determinantes

Los resultados obtenidos de las mediciones realizadas con el sensor BME280 muestran que el microclima del cultivo presenta un patrón diurno-nocturno muy evidente. Durante el periodo de monitorización (aproximadamente 63 horas y 124 registros), la temperatura del aire estuvo comprendida en el rango de 14,92°C a 31,29°C (lo que representa una diferencia de 16,37°C).

En cambio, la humedad relativa estuvo en el rango de 34,03% a 84,82% (lo que representa una diferencia de 50,79%). Esta evolución es compatible con la acción de la radiación solar y de la ventilación local. Los valores máximos de temperatura se registraron en las horas de la tarde y los valores mínimos en las horas de la madrugada. Se identificó un vínculo opuesto extremadamente fuerte entre la temperatura y la humedad relativa. Esto implica que, conforme el calor se eleva, dicha humedad suele descender, y sucede lo contrario al enfriarse.

Este hecho permite seleccionar las variables de control más relevantes en entornos urbanos o periurbanos, como la elección del lugar del cultivo, el uso de elementos de sombra, la aireación transversal y el resguardo frente al impacto solar directo o ante un grado de confinamiento exagerado.

6.4.2 Análisis – OE2: Óptimos vs. condiciones observadas.

Para evaluar el microclima en términos agronómicos se compararon las condiciones registradas con los límites de referencia de tres especies: lechuga, albahaca y tomate. La Tabla 5 presenta la proporción de registros situados por debajo, dentro y por encima del rango de referencia para la temperatura y la humedad relativa.

Tabla 17

Porcentaje de lecturas por debajo, dentro y por encima del rango de referencia por especie.

Especie	Variable	Rango de referencia	% bajo	% en rango	% sobre rango
Lechuga	Temperatura (°C)	15–22	2.0	58.0	40.0
Lechuga	Humedad relativa (%)	50–70	30.0	47.0	23.0
Albahaca	Temperatura (°C)	20–30	43.0	53.0	4.0
Albahaca	Humedad relativa (%)	55–65	35.0	17.0	48.0
Tomate	Temperatura (°C)	20–26	43.0	34.0	23.0

Tomate	Humedad relativa (%)	60–70	42.0	35.0	23.0
--------	----------------------	-------	------	------	------

Nota. Elaboración propia con base en Datos.xlsx.

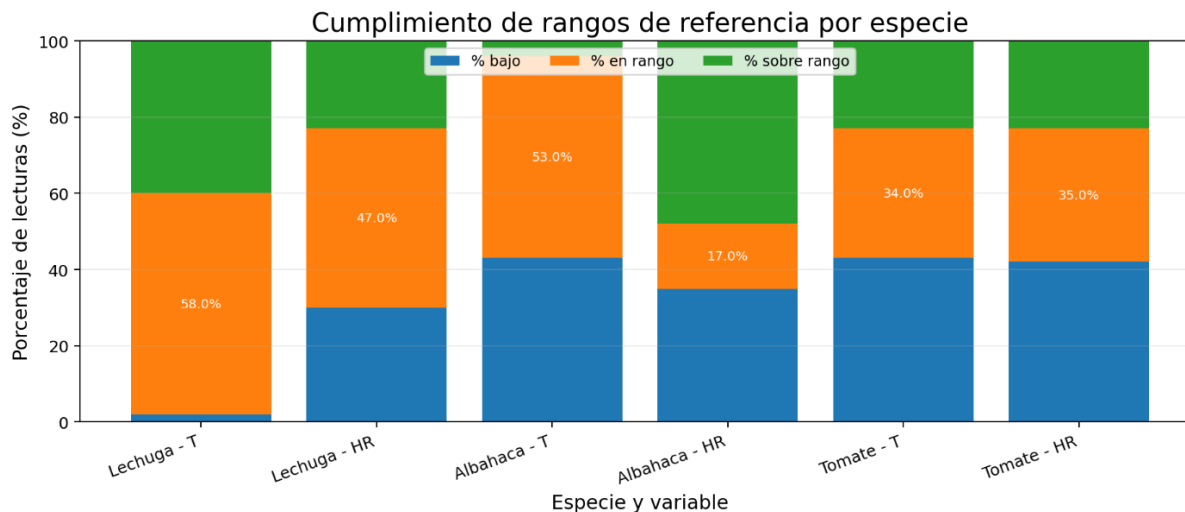
El mejor ajuste térmico se observó en la lechuga, donde el 58,0 % de las lecturas de temperatura se encontraron en el rango de referencia (15–22 °C), y solo el 2,0 % estuvo por debajo del umbral. Sin embargo, la humedad relativa estuvo en el rango (50–70 %) únicamente el 47,0 % del tiempo, lo que indica que hubo periodos de déficit y de exceso de humedad durante el tiempo de estudio.

En la albahaca, la temperatura se mantuvo en el rango (20–30 °C) el 53,0 % del tiempo. No obstante, la humedad relativa mostró la mayor desviación, ya que solo el 17,0 % de las lecturas se ubicaron en el rango (55–65 %) y el 48,0 % estuvo por encima, lo que sugiere que el ambiente fue más húmedo de lo recomendado para esta especie.

En el caso del tomate, el ajuste fue más limitado. La temperatura estuvo en el rango (20–26 °C) el 34,0 % del tiempo, y la humedad relativa estuvo en el rango (60–70 %) el 35,0 %. En general, los resultados sugieren que, bajo las condiciones microclimáticas estudiadas, los cultivos de hoja son más compatibles con el entorno que los cultivos que requieren una mayor demanda térmica.

Figura 25

Cumplimiento de rangos de referencia para lechuga, albahaca y tomate



Nota. Elaboración propia con base en Datos.xlsx.

6.4.3 Análisis – OE3: Desempeño del prototipo y flujo de datos

En el área técnica, el prototipo ha evidenciado la capacidad de obtener una muestra de forma continua, en un período de tiempo real de 63,0 horas, con 124 registros correctos. Si se estima una frecuencia nominal de muestreo de 30 minutos, se calculaba un total aproximado de 126 lecturas; por lo tanto, la integridad del registro estuvo cercana al 98,41 %, evidenciando la pérdida de dos lecturas asociadas a brechas de aproximadamente 60 minutos entre muestras.

En la plataforma web de visualización se ha detectado una limitación operativa relevante: al graficar series históricas con más de ~80–100 puntos por variable, la interfaz tiende a ralentizarse o bloquearse. Esta restricción se interpreta como un problema de escalabilidad del renderizado en el cliente y/o del proceso de consulta, por lo que se documenta como oportunidad de mejora en la arquitectura de visualización (paginación temporal, carga por bloques y/o

agrupación de datos). Finalmente, la duración del monitoreo en este corte (≈ 51 horas) permite describir con claridad el patrón diurno del microclima, pero no captura variabilidad semanal, episodios de precipitación ni cambios estacionales. Se recomienda ampliar el período de observación para robustecer conclusiones.

7 DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y RECOMENDACIONES

7.1 OE1 – Factores determinantes en entorno urbano

Los hallazgos del análisis comprueban que los aspectos determinantes para definir el microclima en entornos agrícolas urbanos/periurbanos son la radiación solar y la ventilación del sitio. Los datos del patrón diario de temperatura y humedad obtenidos por el sistema de monitoreo sugieren que la elección del sitio (orientación, exposición y altitud), la aplicación de sombra parcial y la ventilación cruzada pueden cambiar radicalmente el entorno ambiental que rodea a los cultivos. Por otro lado, en relación con el planeamiento urbano, estos resultados apoyan la idea de implementar instrumentos en los huertos urbanos para convertir las observaciones cualitativas en datos cuantitativos que permitan tomar decisiones de gestión.

7.2 OE2 – Óptimos por especie vs. condiciones observadas

El microclima estudiado favorece más el crecimiento de cultivos de hoja (lechuga) que el de especies con una gran demanda de calor (tomate) o que son intolerantes al exceso de agua (albahaca). No se trata de una medición de la productividad porque el sistema no considera variables del sustrato ni indicadores fisiológicos. Sin embargo, proporciona una base objetiva para seleccionar las especies que mejor se ajusten al microclima existente y para priorizar las acciones

correctivas (ventilación/sombreado) según la desviación predominante (temperatura o humedad). La validación se realizó en San Francisco (Cundinamarca), que actuó como escenario operativo. Dado que Bogotá D.C. es el entorno urbano objetivo, los rangos de referencia y los porcentajes de cumplimiento pueden servir como criterio de adaptación: en entornos más fríos, la desviación por déficit térmico podría intensificarse, mientras que en entornos más cálidos podría aumentar la proporción de lecturas por encima del rango en especies sensibles.

7.3 OE3 – Desempeño del prototipo y flujo de datos

El prototipo ha conseguido su objetivo funcional, que era el de captar, transmitir, almacenar y mostrar las variables ambientales de forma continuada. La integridad del 98.41 % se considera suficiente para esta primera validación, pero las brechas existentes en el muestreo muestran que hay que mejorar la fiabilidad. Por eso, se sugiere: la confirmación de la recepción (ACK), los reintentos, un buffer local en el dispositivo y alertas cuando se pierda la conexión.

En la plataforma de visualización, la limitación al graficar más de unos 80-100 puntos debe ser resuelta para poder llevar a cabo análisis de semanas o meses. Para eso, se propone: (i) filtros por rango de fechas y vistas predefinidas (24 h/7 días/30 días), (ii) agrupar los datos (promedios por hora/día) en consultas extensas, (iii) paginación o carga incremental, y (iv) optimizar la librería de gráficas (deshabilitar los marcadores, reducir animaciones o utilizar módulos de aceleración).

7.4 Evaluación del proyecto como innovación social y tecnológica desde la perspectiva de la gerencia de proyectos

Este trabajo va más allá del diseño y construcción de un sistema de monitorización ambiental; es una propuesta de doble innovación –tecnológica y social- a través de una solución

de bajo coste, orientada a la agricultura urbana en aquellas comunidades que disponen de pocos recursos. A continuación, se examinará su potencial desde las tres perspectivas principales de la dirección de proyectos: la viabilidad de la inversión económica (replicabilidad); el riesgo de la obsolescencia y la metodología de desarrollo utilizada.

7.4.1 Replicabilidad para familias de estrato bajo

Una de las premisas fundamentales de la innovación social es la accesibilidad económica de la solución propuesta. En el contexto colombiano, el costo estimado de replicabilidad del prototipo para una familia de estrato socioeconómico bajo (estratos 1 y 2) se sitúa entre \$150.000 y \$280.000 COP, considerando los componentes principales:

- Microcontrolador ESP32 Wroom: \$25.000–\$40.000 COP
- Sensor BME280: \$15.000–\$25.000 COP
- Fuente de alimentación USB o batería recargable: \$20.000–\$40.000 COP
- Estructura de soporte o madera: \$10.000–\$30.000 COP
- Cableado, resistencias y componentes pasivos: \$5.000–\$15.000 COP

La conectividad se apoya en redes Wi-Fi domésticas existentes o en planes de datos básicos, cuyo costo incremental es mínimo dado el bajo consumo de datos de los protocolos IoT empleados (MQTT/HTTP hacia Firebase).

Este rango de inversión resulta accesible en comparación con sistemas comerciales de monitoreo agrícola, cuyo precio supera frecuentemente los \$500.000 COP por módulo básico. En

términos de retorno social, la inversión se justifica por la reducción de pérdidas en cultivos derivadas de condiciones ambientales no controladas, el fomento de la soberanía alimentaria a escala doméstica y la generación de competencias digitales en los usuarios. Desde la perspectiva de escalabilidad, una eventual producción por lotes de 50 o más unidades permitiría reducir el costo unitario en aproximadamente un 30–40 %, fortaleciendo aún más la viabilidad para poblaciones vulnerables.

En la fase de desarrollo e implementación del prototipo se adoptó un enfoque iterativo-incremental cercano al marco Scrum: ciclos cortos de desarrollo (sprints de dos a tres semanas), integración progresiva de funcionalidades (primero la adquisición de datos del sensor, luego la transmisión Wi-Fi, finalmente la sincronización con Firebase y la visualización web), y validación continua mediante pruebas en condiciones reales en San Francisco, Cundinamarca.

7.4.2 Conocimientos obtenidos tras el cambio rural-urbano: ajuste del modelo de San Francisco, Cundinamarca, a medios citadinos como Bogotá D.C.

El prototipo de monitoreo ambiental se instaló en San Francisco, Cundinamarca, donde se encuentra a 1.730 msnm, clima húmedo subtropical de montaña, alta irradiación solar directa y baja contaminación atmosférica. Este despliegue permitió identificar un conjunto de lecciones aprendidas para escalar el sistema a entornos urbanos de alta densidad como Bogotá D.C. (2.625 msnm). Las diferencias climáticas, ambientales y urbanas entre ambos contextos no son triviales y requieren ajustes explícitos tanto en los rangos de referencia del software como en la lógica de interpretación del prototipo.

- **Diferencias climáticas y ambientales entre San Francisco y Bogotá D.C.**

San Francisco, Cundinamarca, tiene mucha luz solar directa, la humedad relativa promedio es de 70 % a 85 %, las temperaturas varían de 12 °C a 22 °C, y el aire está mucho más limpio que en Bogotá. Por otro lado, Bogotá D.C. tiene una variación de temperatura diaria más grande (generalmente de 6 °C a 18 °C en las afueras y de 8 °C a 16 °C en áreas muy urbanizadas), la contaminación del aire a veces supera los límites de la OMS, especialmente el material particulado PM2.5 y PM10 en calles con mucho tráfico, y recibe menos luz solar directa en áreas con muchos edificios, ya que estos hacen sombra por mucho tiempo, lo que impide que las plantas hagan fotosíntesis en los momentos más importantes del día. Todas estas diferencias crean tres problemas técnicos principales para adaptar nuestro prototipo.

- **Adaptación de los rangos de referencia ante la contaminación atmosférica**

El sensor BME280 utilizado en el prototipo mide temperatura, humedad relativa y presión barométrica, sin embargo, no detecta contaminantes atmosféricos. Para el caso de San Francisco, este es suficiente para caracterizar las condiciones de cultivo. No obstante, en Bogotá D.C., la calidad del aire impacta directamente la salud foliar de los cultivos urbanos, particularmente en especies sensibles como la lechuga y las aromáticas, las cuales acumulan partículas en sus superficies y pueden ver afectada su tasa de intercambio gaseoso.

Como lección aprendida, se identificó la necesidad de incorporar, en versiones futuras del sistema, un sensor de calidad del aire (por ejemplo, el MQ-135 o el SDS011 para material particulado) que permita generar alertas cuando los niveles de contaminación superen umbrales críticos para los cultivos. En tanto no se integre este sensor, el software debe implementar una

lógica de advertencia contextual basada en la ubicación geográfica del usuario: si el dispositivo se registra en una zona urbana de alta densidad, el sistema debe notificar al usuario que los datos de temperatura y humedad deben interpretarse en conjunto con el índice de calidad del aire local (disponible a través de APIs públicas como la del IDEAM o AirVisual), y que ciertas lecturas óptimas de humedad y temperatura pueden no ser suficientes para garantizar el desarrollo saludable del cultivo en presencia de contaminación elevada.

- **Adaptación ante la reducción de radiación solar directa**

En Bogotá D.C., la geometría urbana —especialmente en apartamentos, terrazas con obstrucciones o balcones orientados al norte— reduce drásticamente la disponibilidad de luz solar directa para los cultivos. En San Francisco, el prototipo fue calibrado asumiendo niveles de irradiación propios de un entorno semirural con exposición directa al sol durante 6 a 8 horas diarias.

La lección aprendida en este punto es que el sistema debe incorporar un módulo de clasificación del entorno al momento de la configuración inicial. El usuario debe indicar el tipo de exposición solar disponible (plena luz solar, semisombra o sombra dominante), y el software debe ajustar los rangos de temperatura óptima y humedad relativa recomendados en función de esta variable. Por ejemplo, en condiciones de semisombra o sombra, especies como la lechuga y algunas aromáticas pueden desarrollarse aceptablemente con temperaturas entre 14 °C y 18 °C y humedades del 65 %–80 %, mientras que el tomate o la fresa —incluida en el estudio— requieren luz directa y verían comprometido su rendimiento en estas condiciones, lo cual el sistema debe indicar explícitamente mediante alertas en la interfaz web.

Adicionalmente, si en versiones futuras se integra un sensor de luminosidad (como el BH1750 o el TSL2591), el software podría calcular de forma autónoma la disponibilidad lumínica real y ajustar dinámicamente los rangos de referencia sin depender de la declaración manual del usuario.

- **Adaptación ante las variaciones térmicas de la capital**

Bogotá D.C., a diferencia de San Francisco, tiene variaciones térmicas intradiarias más pronunciadas con descensos nocturnos que pueden llegar a ser de 6°C-8°C en algunas épocas del año. Esta variabilidad tiene un efecto directo sobre el estrés térmico de los cultivos y sobre la tasa de evapotranspiración que, a su vez, afecta los requerimientos de riego.

Lección aprendida: el prototipo debe incorporar una lógica para realizar seguimiento a la amplitud térmica diaria (la cual se obtiene de los datos históricos almacenados en Firebase) y generar recomendaciones de riego y protección nocturna cuando la diferencia entre la temperatura máxima y mínima del día sea superior a los 10°C.

8 CONCLUSIONES

Cumplimiento del objetivo general y a partir del interrogante de investigación. Se desarrolló e implementó un esquema experimental de índole tecnológica, el cual se basó en un prototipo de siembra y cosecha que posibilitó el seguimiento de variables ambientales (temperatura, humedad relativa y presión) con trazabilidad temporal, suministrando información relevante para orientar resoluciones sobre agricultura urbana y su adecuación a espacios metropolitanos como Bogotá D.C.

Objetivo específico 1: Variables que afectan la respuesta de la plantación. La investigación del intervalo evaluado evidenció que el clima local posee oscilaciones entre el día y la noche muy definidas, donde la correlación opuesta vinculando el nivel térmico y la humedad relativa constituye la norma ambiental predominante. En consecuencia, para la supervisión de huertas urbanas en la situación analizada, las decisiones deben centrarse en regular la ventilación, la exposición y la ubicación, puesto que estos aspectos repercuten de forma directa en las variables señaladas previamente.

Objetivo específico 2: Rangos de referencia vs. condiciones observadas. La comparación de las mediciones con los rangos de referencia por especie demostró que el ajuste ambiental no se produce de la misma manera en todos los cultivos: se identificaron especies con una mayor afinidad con las condiciones observadas (por ejemplo, un mejor ajuste térmico en lechuga) y otras con mayores limitaciones. En general, la humedad relativa se convirtió en una variable crítica común para el cumplimiento de los rangos en diversas especies, lo que permite orientar las acciones de gestión de manera más eficaz (ventilación, ubicación, cobertura y tiempo de exposición).

Objetivo específico 3: Funcionamiento del prototipo y flujo de datos. El prototipo demostró su capacidad operativa como sistema de monitoreo: durante el periodo analizado se obtuvieron 124 lecturas válidas y una integridad del registro del 98,41% y en Bogotá se obtuvieron 5664 lecturas validadas y una integridad del registro del 94.10%, lo que respalda la fiabilidad básica del flujo adquisición, almacenamiento y visualización. Por tanto, se puede afirmar que el sistema puede ser la base tecnológica replicable y de bajo costo para el monitoreo ambiental en la agricultura urbana.

Aporte de evidencia aplicable. El principal aporte del prototipo es la generación de datos cuantitativos y trazables que permiten describir el entorno, identificar las desviaciones con respecto a los rangos de referencia y justificar las decisiones de gestión. En este sentido, el modelo no se limita a "mostrar datos", sino que permite un enfoque de evaluación comparativa y seguimiento sistemático en condiciones reales.

De manera integral, las enseñanzas de esta transición revelan que el modelo originado en San Francisco, Cundinamarca, ofrece un fundamento técnico sólido y reproducible, aunque requiere una configuración situada para actuar con rigor en zonas urbanas. Dicha adaptación no exige transformar el hardware, sino optimizar la programación interna y, en ediciones posteriores, añadir sensores de apoyo para la luminosidad y calidad del aire. Esta capacidad de crecimiento modular representa una virtud del esquema inicial y confirma la factibilidad del proyecto como una solución tecnológica aplicable a diversas realidades geográficas y socioeconómicas en el territorio de Colombia.

8.1 Recomendaciones de mejora

Las necesidades y mejoras adicionales para consolidar el modelo. Para incrementar el valor analítico y la aplicación del sistema en un periodo prolongado y en diversas unidades de cultivo, es necesario:

- Ampliar el periodo de monitorización hasta un mínimo de 30 días para obtener información sobre la variabilidad climática semanal y los episodios de lluvia.
- Mejorar la fiabilidad del flujo de datos mediante mecanismos de reintento en el envío, almacenamiento local temporal, confirmación de recepción y notificación de posibles problemas en la integridad de los registros.
- Optimizar la plataforma web para permitir el acceso eficiente a un mayor volumen de datos históricos mediante paginación temporal, carga por bloques o agrupación de registros.
- Comparar las mediciones obtenidas por el prototipo con instrumentos o estaciones de referencia previamente calibrados, con el fin de determinar la precisión y confiabilidad de los datos registrados.
- Incorporar sensores adicionales para variables como humedad del suelo, pH o conductividad eléctrica, con el propósito de ampliar el alcance del monitoreo ambiental.
- Complementar la validación técnica con indicadores del desarrollo del cultivo, como altura de la planta, biomasa, rendimiento o producción, para analizar la relación entre las condiciones ambientales registradas y el comportamiento del cultivo.

- Realizar un análisis de costos, mantenimiento y escalabilidad del sistema que permita evaluar su viabilidad para futuras implementaciones y facilite la planificación de su operación a largo plazo.

REFERENCIAS

- Aciksoz, S., & Dal, I. (2021). *Smart Urban Agriculture*.
<https://www.researchgate.net/publication/351692811>
- Andres Perafan, M. C. (2018). *Agrodroyd: sistema de monitoreo para cuidado y riego de productos agrícolas en cultivos urbanos*.
- Ávila Sánchez, H., & Ávila Sánchez, H. (2019). Agricultura urbana y periurbana: Reconfiguraciones territoriales y potencialidades en torno a los sistemas alimentarios urbanos. *Investigaciones geográficas*, (98). <https://doi.org/10.14350/RIG.59785>
- Bellon-Maurel, V., Brossard, L., Garcia, F., Mitton, N., & Termier, A. (2022). *Agricultura y tecnología digital*. <https://doi.org/10.17180/wmkb-ty56-en>
- Berrios Gomez, S., & Rivera Herrera, H. J. (2022). Sistema IoT basado en ESP32 para el control y monitoreo de cultivos en invernadero con enfoque de agricultura 4.0. *INGENIERÍA INVESTIGA*, 4. <https://doi.org/10.47796/ing.v4i0.624>
- Bianchi, E., & Szpak, C. (2009). *Seguridad Alimentaria y el Derecho a la Alimentación Adecuada*.
- Bosch Sensortec GmbH. (2024). *BME280 – Data sheet*.
- Camilo, J., Marchena, R., Manuel, J., Ardila, H., Sebastian, A., & Reyes, C. (2021). *Prototipo de plataforma de recursos digitales de modelos y simulación con dinámica de sistemas, orientados a la toma de decisiones del sector agropecuario de Santander (Colombia)*.
- Capraro, F., Tosetti, S., & Vita Serman, F. (2010). Laboratorio Virtual y Remoto para Simular, Monitorizar y Controlar un Sistema de Riego por Goteo en Olivos. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, 7(1), 73–84. [https://doi.org/10.1016/S1697-7912\(10\)70010-8](https://doi.org/10.1016/S1697-7912(10)70010-8)
- Chanchí-Golondrino, G.-E., Ospina-Alarcón, M.-A., & Saba, M. (2022). Sistema IoT para el monitoreo de variables climatológicas en cultivos de agricultura urbana. *Revista Científica*, 44(2), 257–271. <https://doi.org/10.14483/23448350.18470>
- Chaparro, J., & Criado, A. (2020). *Materas inteligentes; una aproximación a la agricultura en pequeña escala para uso doméstico*.
- Comunicaciones BCV. (2025, junio 11). *Cómo Vamos en Seguridad Alimentaria - Bogotá Cómo Vamos*. Bogotá Cómo Vamos. <https://bogotacomovamos.org/como-vamos-en-seguridad-alimentaria/>

- DANE. (2025, mayo 22). *DANE - Escala de experiencia de inseguridad alimentaria (FIES)*. DANE. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/salud/escala-de-experiencia-de-inseguridad-alimentaria-fies?>
- Dos Santos, M. M., de Sousa Neto, O. N., Guerra Filho, P. A., Dias, N. da S., de Aragão, A. R., Souza, Y. C. D. S., Duarte, S. N., Sá, F. V. da S., & Moreno-Pizani, M. A. (2024). Intelligent system for automated soil moisture monitoring. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 29(2), e279856. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/AGRIAMBI.V29N2E279856>
- FAO. (2024, julio 24). *Las cifras del hambre se mantienen persistentemente altas por tres años consecutivos, mientras se agravan las crisis mundiales: informe de la ONU*. Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe. <https://www.fao.org/americas/news/news-detail/sofi-2024/>
- FAO. (2025a, mayo 22). *Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura: Cae inseguridad alimentaria en la zona urbana, pero persiste en zonas rurales y hogares vulnerables*. FAO en Colombia. <https://www.fao.org/colombia/noticias/detail-events/en/c/1738232/>
- FAO. (2025b, julio 28). *Global hunger declines, but rises in Africa and western Asia: UN report*. World Health Organization (WHO) – News Release (Joint News Release). <https://www.who.int/news/item/28-07-2025-global-hunger-declines-but-rises-in-africa-and-western-asia-un-report>
- Forero, R. A., Parra, H. G., Luna, R. A., & Rivera, E. R. (2011). *Agricultura urbana: Sistemas de implementación de cultivos hidropónicos*.
- Future Trends Forum. (2023). *Agricultura inteligente: el desafío de la alimentación sostenible*.
- Gavito, M. E., van der Wal, H., Aldasoro, E. M., Ayala-Orozco, B., Bullén, A. A., Cach-Pérez, M., Casas-Fernández, A., Fuentes, A., González-Esquivel, C., Jaramillo-López, P., Martínez, P., Masera-Cerruti, O., Pascual, F., Pérez-Salicrup, D. R., Robles, R., Ruiz-Mercado, I., & Villanueva, G. (2017). Ecología, tecnología e innovación para la sustentabilidad: retos y perspectivas en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 88, 150–160. <https://doi.org/10.1016/J.RMB.2017.09.001>
- González, M. L., Peña, A. T., Caballero, Y. L., & Vargas Ricardo, A. (2024). *Agricultura inteligente, una alternativa con más eficiencia y calidad*.
- Google. (s/f). *Google Clima: Pronóstico del tiempo para San Francisco (Cundinamarca)*. Recuperado el 29 de marzo de 2026, de <https://www.accuweather.com/es/co/san-francisco/1357051/weather-forecast/1357051>

- Hercog, D., Lerher, T., Truntiĉ, M., & Težak, O. (2023). Design and Implementation of ESP32-Based iot Devices. *Sensors*, 23(15). <https://doi.org/10.3390/s23156739>
- Hernandez-Rodriguez, V., Kairuz-Cabrera, D., Martinez-Laguardia, A., Merino-Laso, P., & Schalm RESUMEN, O. (2023). Estación meteorológica IoT basada en TTGO T-Beam y comunicación LoRa Title: IoT weather station based on TTGO T-Beam and LoRa communication. *RIELAC*, 44(3), 2302.
- Martínez Candelaria, B., Ruíz Rosado, O., Gallardo López, F., Pérez Hernández, P., Martínez Becerra, Á., & Vargas Villamil, L. (2011). Tropical and Subtropical Agroecosystems. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 14, 999–1010. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93921493004>
- Martinez, J. L. D., Salcedo, D., Mercado, T., Quiñonez, Y., & de la Hoz, A. M. (2024). Internet de las cosas aplicado a la agricultura: estado actual y su aplicación mediante un prototipo. *RISTI - Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologias de Informação*, 2024(53), 106–121. <https://doi.org/10.17013/RISTI.53.106-121>
- Montaño-Blacio, M., González-Escarabay, J., Jiménez-Sarango, Ó., Mingo-Morocho, L., & Carrión-Aguirre, C. (2023). Design and deployment of an IoT-based monitoring system for hydroponic crops. *Ingenius*, 2023(30), 9–18. <https://doi.org/10.17163/ings.n30.2023.01>
- Oh, S., & Lu, C. (2023). Vertical farming - smart urban agriculture for enhancing resilience and sustainability in food security. En *Journal of Horticultural Science and Biotechnology* (Vol. 98, Número 2, pp. 133–140). Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.1080/14620316.2022.2141666>
- Orjuela Santamaria, L. N. (2021). *Alcanzando el hambre cero en Colombia con tecnologías emergentes*.
- Palliwal, A., Song, S., Tan, H. T. W., & Biljecki, F. (2021). 3D city models for urban farming site identification in buildings. *Computers, Environment and Urban Systems*, 86. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2020.101584>
- Pearson, C. J., & Pilgrim, S. (2010). *Urban agriculture: Diverse activities and benefits for city society*.
- Pereira, G. P., Chaari, M. Z., & Daroge, F. (2023). IoT-Enabled Smart Drip Irrigation System Using ESP32. *Internet of Things*, 4(3), 221–243. <https://doi.org/10.3390/iot4030012>
- Reinoso Ramos, A. F., & Bohórquez Hernández, G. W. (2024). *Diseño del control de un huerto urbano para la producción de hortalizas*.

- Saez Rojas, J. I., Pantoja, J. M., Matamala, M., Briceno, I. C., Vasconez, J. P., & Romero-Conrado, A. R. (2024). An IoT-Based Prototype for Optimizing Agricultural Irrigation: A Case Study in the Biobío Region of Chile. *Procedia Computer Science*, 238, 1009–1014. <https://doi.org/10.1016/J.PROCS.2024.06.127>
- Santos Martínez, E. (2021). *Economía local dinamizada con agricultura urbana*.
- Sarasola, J. (2025, marzo 5). *Paradigma positivista - qué es, definición y preguntas frecuentes - Ikusmira*. <https://ikusmira.org/p/paradigma-positivista>
- Schinca, N. (2009). El estado de la inseguridad alimentaria en el mundo. *Actividad Dietética*, 13(2), 49–50. [https://doi.org/10.1016/S1138-0322\(09\)71733-X](https://doi.org/10.1016/S1138-0322(09)71733-X)
- Secretaría Distrital de Integración Social. (2025, mayo 23). *En Bogotá 564 mil ciudadanos salen de la condición de inseguridad alimentaria severa y moderada*. Secretaría Distrital de Integración Social – Noticias (Seguridad Alimentaria). <https://www.integracionsocial.gov.co/>
- Sihombing, R., Azizah, A., Arifin, Z., Sari, E., Wiramsya Oscar, A., Rochman, P., & Putra, S. (2025). *Design of Automatic Irrigation System for Post-Mining Land Reclamation*. www.joiv.org/index.php/joiv
- Surabaya, A. B., Rochman, S., & Hidayat, M. A. (2024). *Design and Build a Mini Aquaponic Smart System for Subtropical Plants Based on the Internet of Things (IOT)*.
- UNICEF. (2025, agosto 8). *The State of Food Security and Nutrition in the World 2025 - UNICEF DATA*. UNICEF Data. <https://data.unicef.org/resources/sofi-2025/>
- United Nations Department of Economic and Social Affairs Population Division. (2018, mayo 16). *2018 Revision of World Urbanization Prospects | United Nations*. UN DESA Publications. <https://www.un.org/en/desa/2018-revision-world-urbanization-prospects>
- United Nations Human Settlements Programme. (2024, noviembre). *World Cities Report 2024: Cities and Climate Action | UN-Habitat*. UN-Habitat. <https://unhabitat.org/world-cities-report-2024-cities-and-climate-action>
- Urías Borbón, D. S., & Ochoa de la Torre, J. M. (2020). Huertos urbanos como estrategia de resiliencia urbana en países en desarrollo. *Vivienda y Comunidades Sustentables*, (8), 81–102. <https://doi.org/10.32870/RVCS.V0I8.143>
- Zuraiyah, T. A., Suriansyah, M. I., & Pakhrizal Akbar, A. (2019). Smart Urban Farming Berbasis Internet Of Things (IoT). *Information Management For Educators And Professionals*, 3(2), 139–150.

Anexos

Anexo 1. Carta de validación experto #1

Bogotá D.C., 06 de abril de 2026

Señores

CORPORACIÓN UNIVERSITARIA MINUTO DE DIOS – UNIMINUTO

Programa de Maestría en Gerencia de la Innovación en Proyectos

Ciudad

Asunto: Carta de validación por juicio de experto – Proyecto de grado

Cordial saludo,

En mi calidad de Ingeniero Electrónico y de Telecomunicaciones, certifico que he leído, revisado y validado de manera satisfactoria el proyecto de grado titulado “Modelo Experimental Tecnológico para la Seguridad Alimentaria Urbana: Evaluación de un Prototipo de Siembra y Cosecha”, desarrollado por el estudiante John Manuel Silva Torres, como requisito para optar por el título del Programa de Maestría en Gerencia de la Innovación en Proyectos.

La validación realizada comprendió la revisión del modelo experimental propuesto y del prototipo de monitoreo de variables ambientales (temperatura, humedad relativa y presión atmosférica) mediante la integración de un sensor BME280 con un microcontrolador ESP32, así como el flujo de adquisición, transmisión, almacenamiento y visualización de los datos en la plataforma digital. Adicionalmente, se verificaron evidencias de pruebas de funcionamiento en el escenario de validación (San Francisco, Cundinamarca) y los criterios de adaptación para su aplicación en Bogotá D.C. como contexto urbano objetivo.

Con base en lo anterior, considero que el trabajo presentado es pertinente, viable y coherente con los objetivos de la investigación, y aporta evidencia aplicable para apoyar la toma de decisiones en entornos urbanos.

Cordialmente,



Álvaro Hernando López

Ingeniero Electrónico y de Telecomunicaciones

Tel. 3002644451

Anexo 2. Carta de validación experto #2

Bogotá D.C., 6 de abril de 2026

Señores

CORPORACIÓN UNIVERSITARIA MINUTO DE DIOS – UNIMINUTO

Programa de Maestría en Gerencia de la Innovación en Proyectos

Ciudad

Asunto: Carta de validación por juicio de experto – Proyecto de grado

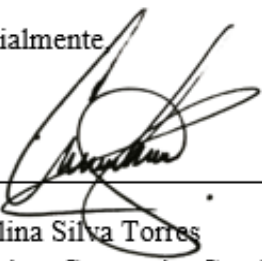
Cordial saludo,

En mi calidad de Ingeniera Catastral y Geodesta, Especialista en Avalúos, estudiante de la Especialización en Sistemas de Información Geográfica y estudiante de la Maestría en Inteligencia de Negocios, certifico que he leído, revisado y validado de manera satisfactoria el proyecto de grado titulado “Modelo Experimental Tecnológico para la Seguridad Alimentaria Urbana: Evaluación de un Prototipo de Siembra y Cosecha”, desarrollado por el estudiante John Manuel Silva Torres, como requisito para optar por el título del Programa de Maestría en Gerencia de la Innovación en Proyectos. La revisión se enfocó en la pertinencia del modelo para el contexto urbano, su coherencia con la seguridad alimentaria urbana y los criterios de adaptación/replicabilidad desde un enfoque territorial.

La validación realizada comprendió la revisión del modelo experimental propuesto y del prototipo de monitoreo de variables ambientales (temperatura, humedad relativa y presión atmosférica) mediante la integración de un sensor BME280 con un microcontrolador ESP32, así como el flujo de adquisición, transmisión, almacenamiento y visualización de los datos en la plataforma digital. Adicionalmente, se verificaron evidencias de pruebas de funcionamiento en el escenario de validación (San Francisco, Cundinamarca) y los criterios de adaptación para su aplicación en Bogotá D.C. como contexto urbano objetivo.

Con base en lo anterior, considero que el trabajo presentado es pertinente, viable y coherente con los objetivos de la investigación, y aporta evidencia aplicable para apoyar la toma de decisiones en entornos urbanos.

Cordialmente,



Carolina Silva Torres
Ingeniera Catastral y Geodesta
Cel.: 3223014659

Anexo 3. Carta de validación experto #3

Bogotá D.C., 6 de abril de 2026

Señores

CORPORACIÓN UNIVERSITARIA MINUTO DE DIOS – UNIMINUTO

Programa de Maestría en Gerencia de la Innovación en Proyectos

Ciudad

Asunto: Carta de validación por juicio de experto – Proyecto de grado

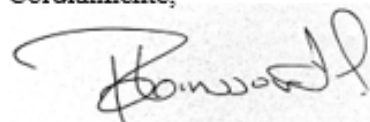
Cordial saludo,

En mi calidad de Ingeniero electrónico y Coordinador de Proyectos, certifico que he leído, revisado y validado de manera satisfactoria el proyecto de grado titulado “Modelo Experimental Tecnológico para la Seguridad Alimentaria Urbana: Evaluación de un Prototipo de Siembra y Cosecha”, desarrollado por el estudiante John Manuel Silva Torres, como requisito para optar por el título del Programa de Maestría en Gerencia de la Innovación en Proyectos.

La validación realizada comprendió la revisión del modelo experimental propuesto y del prototipo de monitoreo de variables ambientales (temperatura, humedad relativa y presión atmosférica) mediante la integración de un sensor BME280 con un microcontrolador ESP32, así como el flujo de adquisición, transmisión, almacenamiento y visualización de los datos en la plataforma digital. Adicionalmente, se verificaron evidencias de pruebas de funcionamiento en el escenario de validación (San Francisco, Cundinamarca) y los criterios de adaptación para su aplicación en Bogotá D.C. como contexto urbano objetivo.

Con base en lo anterior, considero que el trabajo presentado es pertinente, viable y coherente con los objetivos de la investigación, y aporta evidencia aplicable para la toma de decisiones en agricultura urbana.

Cordialmente,



Robinson Lorenzo Hernández

Coordinador de Proyectos de ~~Deinteko~~ SAS

Tel.: 3112589641

Anexo 4. Ficha técnica del sensor implementado



BME280

Combined humidity and pressure sensor



BME280 – Data sheet

Document revision	1.6
Document release date	September 2018
Document number	BST-BME280-DS002-15
Technical reference code	0 273 141 185
Notes	Data and descriptions in this document are subject to change without notice. Product photos and pictures are for illustration purposes only and may differ from the real product appearance

BME280

Digital humidity, pressure and temperature sensor

Key features

- Package 2.5 mm x 2.5 mm x 0.93 mm metal lid LGA
- Digital interface I²C (up to 3.4 MHz) and SPI (3 and 4 wire, up to 10 MHz)
- Supply voltage V_{DD} main supply voltage range: 1.71 V to 3.6 V
V_{DDIO} interface voltage range: 1.2 V to 3.6 V
- Current consumption 1.8 µA @ 1 Hz humidity and temperature
2.8 µA @ 1 Hz pressure and temperature
3.6 µA @ 1 Hz humidity, pressure and temperature
0.1 µA in sleep mode
- Operating range -40...+85 °C, 0...100 % rel. humidity, 300...1100 hPa
- Humidity sensor and pressure sensor can be independently enabled / disabled
- Register and performance compatible to Bosch Sensortec BMP280 digital pressure sensor
- RoHS compliant, halogen-free, MSL1

Key parameters for humidity sensor

- Response time ($\tau_{63\%}$) 1 s
- Accuracy tolerance ± 3 % relative humidity
- Hysteresis ± 1 % relative humidity

Key parameters for pressure sensor

- RMS Noise 0.2 Pa, equiv. to 1.7 cm
- Offset temperature coefficient ± 1.5 Pa/K, equiv. to ± 12.6 cm at 1 °C temperature change

Typical application

- Context awareness, e.g. skin detection, room change detection
- Fitness monitoring / well-being
 - Warning regarding dryness or high temperatures
 - Measurement of volume and air flow
- Home automation control
 - control heating, venting, air conditioning (HVAC)
- Internet of things
- GPS enhancement (e.g. time-to-first-fix improvement, dead reckoning, slope detection)
- Indoor navigation (change of floor detection, elevator detection)
- Outdoor navigation, leisure and sports applications
- Weather forecast
- Vertical velocity indication (rise/sink speed)

Target devices

- Handsets such as mobile phones, tablet PCs, GPS devices
- Navigation systems
- Gaming, e.g. flying toys
- Camera (DSC, video)
- Home weather stations
- Flying toys
- Watches

General Description

The BME280 is a combined digital humidity, pressure and temperature sensor based on proven sensing principles. The sensor module is housed in an extremely compact metal-lid LGA package with a footprint of only $2.5 \times 2.5 \text{ mm}^2$ with a height of 0.93 mm. Its small dimensions and its low power consumption allow the implementation in battery driven devices such as handsets, GPS modules or watches. The BME280 is register and performance compatible to the Bosch Sensortec BMP280 digital pressure sensor (see chapter 5.2 for details).

The BME280 achieves high performance in all applications requiring humidity and pressure measurement. These emerging applications of home automation control, in-door navigation, fitness as well as GPS refinement require a high accuracy and a low TCO at the same time.

The humidity sensor provides an extremely fast response time for fast context awareness applications and high overall accuracy over a wide temperature range.

The pressure sensor is an absolute barometric pressure sensor with extremely high accuracy and resolution and drastically lower noise than the Bosch Sensortec BMP180.

The integrated temperature sensor has been optimized for lowest noise and highest resolution. Its output is used for temperature compensation of the pressure and humidity sensors and can also be used for estimation of the ambient temperature.

The sensor provides both SPI and I²C interfaces and can be supplied using 1.71 to 3.6 V for the sensor supply V_{DD} and 1.2 to 3.6 V for the interface supply V_{DDIO} . Measurements can be triggered by the host or performed in regular intervals. When the sensor is disabled, current consumption drops to 0.1 μA .

BME280 can be operated in three power modes (see chapter 3.3):

- sleep mode
- normal mode
- forced mode

In order to tailor data rate, noise, response time and current consumption to the needs of the user, a variety of oversampling modes, filter modes and data rates can be selected.

Please contact your regional Bosch Sensortec partner for more information about software packages.