 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

**Implementación de sistema IoT en plataforma móvil para el  
monitoreo de variables agroclimáticas en invernaderos con  
capacidad de planeación de trayectorias y navegación autónoma.**

Estudiante:

Lucas Felipe Hernández Palacio

Asesor:

Mateo Mejía Herrera

**INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO**

**Facultad de ingenierías**

**Ingeniería mecatrónica**

**2025**

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## RESUMEN

---

El presente trabajo tiene como objetivo el desarrollo de una plataforma robótica móvil con capacidad de navegación autónoma y adquisición de variables agroclimáticas (CO<sub>2</sub> y humedad), diseñada específicamente para operar en terrenos irregulares dentro de invernaderos. La solución propuesta se basa en la integración de tecnologías de localización mediante módulos UWB (*Ultra-Wideband*), sensores ambientales y una plataforma *IoT* (*Internet of Things*) para la recolección, visualización y análisis de datos en tiempo real. Este sistema busca brindar a los agricultores una herramienta precisa y automatizada para el monitoreo climático del entorno de cultivo, optimizando la toma de decisiones y fortaleciendo las prácticas de agricultura de precisión.

La metodología empleada se estructuró en cinco fases: diseño mecánico y electrónico de la plataforma, integración de sensores y módulos UWB, desarrollo de algoritmos de planeación de trayectorias, implementación de navegación autónoma y validación experimental. El sistema fue sometido a pruebas de campo controladas donde se analizaron las trayectorias generadas y se evaluó la precisión del posicionamiento frente a mediciones de referencia. Además, los datos capturados fueron transmitidos a *Firebase* en tiempo real y posteriormente representados mediante mapas de calor interpolados que permiten visualizar espacialmente la distribución de variables como humedad relativa y concentración de CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono).

Los resultados muestran una precisión aceptable del sistema de posicionamiento UWB en la mayoría de las trayectorias evaluadas, con errores mínimos en condiciones óptimas de calibración. Asimismo, la visualización de datos permitió identificar zonas con condiciones ambientales críticas dentro del invernadero, facilitando su interpretación. Se concluye que la solución desarrollada constituye una herramienta funcional para el monitoreo agroambiental automatizado, con alto potencial de escalabilidad y mejora a través de futuras integraciones de inteligencia artificial y respuesta automática mediante actuadores.

*Palabras clave:* Robótica móvil, UWB, Navegación autónoma, IoT, Monitoreo agroclimático, Agricultura de precisión.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## RECONOCIMIENTOS

Este trabajo ha sido desarrollado en el marco del contrato RC130-2024, correspondiente al proyecto con código 10922, titulado Diversificación de fuentes de proteínas para uso alimentario mediante el empleo de terrazas de cultivo aeropónicas o hidropónicas, integradas con sistemas automatizados, inteligencia artificial y energía renovable para la creación de comunidades autosostenibles, liderado por el Grupo de Sistemas de Control y Robótica COL0123701, en colaboración con el semillero de investigación Aplicaciones de IoT.

	<p style="text-align: center;">INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</p>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

# ACRÓNIMOS

---

UWB Ultra-Wideband

IPS Indoor Positioning System

IoT Internet of Things (Internet de las Cosas)

CAD Computer-Aided Design (Diseño Asistido por Computadora)

IA Inteligencia Artificial

IMU Inertial Measurement Unit (Unidad de Medición Inercial)

UGV Unmanned Ground Vehicle (Vehículo Terrestre No Tripulado)

UAV Unmanned Aerial Vehicle (Vehículo Aéreo No Tripulado)

SLAM Simultaneous Localization and Mapping (Localización y Mapeo Simultáneos)

ODS Objetivos de Desarrollo Sostenible

CO2 Dióxido de carbono

PLA Polylactic Acid (Ácido Poliláctico)

UV Ultravioleta

GPS Global Positioning System

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN .....	7
Objetivo general. ....	10
Objetivos específicos. ....	10
2. MARCO TEÓRICO .....	12
3. METODOLOGÍA.....	15
<b>Revisión del estado del arte</b> .....	15
<b>Plataforma robótica móvil para terrenos irregulares</b> .....	16
<b>Selección de sensores para la adquisición de variables ambientales</b> .....	17
<b>Planificación de trayectorias y navegación autónoma</b> .....	19
<b>Transmisión de datos y visualización en plataforma IoT</b> .....	25
<b>Evaluación del sistema de navegación y validación de trayectorias</b> .....	26
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	27
5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO .....	30
REFERENCIAS .....	33

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## TABLA DE FIGURAS

Figura 1. Diseño plataforma robótica móvil.....	16
Figura 2. Posicionamiento componentes electrónicos en CAD. ....	17
Figura 3. (A) Vista isométrica sistema de adquisición CAD. (B) Vista en sección transversal sistema de adquisición CAD.....	18
Figura 4. Montaje de sistema de adquisición en plataforma móvil.....	19
Figura 5. (A) Vista superior sistema UWB CAD. (B) Vista isométrica sistema UWB CAD. ....	19
Figura 6. (A) Vista superior sistema UWB implementado. (B) Vista panorámica sistema completo UWB. ....	20
Figura 7. Disposición de anclas en el espacio.....	21
Figura 8. Análisis de Modos de operación UWB por Distancia (100 cm).....	22
Figura 9. Análisis de Modos de operación UWB por Distancia (400 cm).....	23
Figura 10. Análisis de Modos de operación UWB por Distancia (800 cm).....	23
Figura 11. Configuración parámetros programación UWB.....	24
Figura 12. Medición de distancias entre anclas (A1, A2, A3, A4) y definición de puntos de referencia para la trayectoria a seguir. ....	24
Figura 13. (A) Datos CO2 obtenidos en la trayectoria. (B) Datos humedad obtenidos en la trayectoria.....	25
Figura 14. Captura de Firebase con datos en tiempo real.....	25
Figura 15. Gráfica de medidas TAG y medidas flexómetro.....	27
Figura 16. Matriz CO2 original e interpolada. ....	29
Figura 17. Matriz de humedad original e interpolada. ....	29
Tabla 1. Tabla de errores porcentuales en cada coordenada.....	28
Ecuación 1. Ecuación de lateración en tres dimensiones. ....	21

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

# 1. INTRODUCCIÓN

---

La agricultura es fundamental para la economía global, proporcionando empleo y sustento a millones de personas (FAO, 2021). En Colombia, este sector es especialmente importante, con 3,5 millones de personas empleadas en actividades agrícolas (UPRA, n.d.). En Antioquia, la agricultura es clave para la economía regional y el sustento de muchas comunidades (DANE, 2022). No obstante, los agricultores enfrentan dificultades para monitorear y controlar las variables agroambientales en los invernaderos, lo que impacta el rendimiento de los cultivos (Maraveas et al., 2023). La falta de claridad en la evolución de los cultivos afecta la planificación y gestión eficiente de las actividades agrícolas (Antón et al., 2013), exponiendo a los cultivos a riesgos como enfermedades o eventos adversos (Herrero et al., 2017). Abordar esta problemática en la predicción es esencial para mejorar la resiliencia y sostenibilidad agrícola en la región.

Las fluctuaciones en la humedad del suelo, temperatura y radiación UV (ultravioleta) pueden impactar significativamente el crecimiento y desarrollo de las plantas (da Silva et al., 2018). Sin embargo, la falta de medición en tiempo real de estas variables dentro de los invernaderos dificulta la toma de decisiones informadas por los agricultores, quienes a menudo dependen de mediciones manuales o dispositivos no especializados. Esta carencia de datos en la monitorización de cultivos puede derivar en situaciones de estrés hídrico, desequilibrios nutricionales y daños por radiación UV, lo cual no solo reduce la calidad y cantidad de la cosecha (Soto Barreneche et al., 2022), sino que también provoca pérdidas económicas, como lo demuestra el desperdicio anual de 3,9 millones de toneladas de cosechas a nivel nacional (ABACO, n.d.). Además, variables ambientales críticas como el CO<sub>2</sub> y la humedad son esenciales para la fotosíntesis y el desarrollo de las plantas, ya que influyen directamente en la disponibilidad de agua y nutrientes para las raíces (Sanyal et al., 2023). Por esta razón, es fundamental realizar un análisis en tiempo real de estas variables con el fin de optimizar su manejo y mejorar la productividad de los cultivos (Hernández et al., 2009).

El crecimiento de las plantas está condicionado principalmente por factores ambientales que limitan su desarrollo, entre los cuales la temperatura y la disponibilidad de agua juegan un papel determinante. A diferencia de la fijación de carbono a través de la fotosíntesis, que generalmente no representa una restricción primaria, la temperatura influye directamente en la actividad metabólica de las plantas, afectando la división y elongación celular, así como la eficiencia de los procesos fotosintéticos. En condiciones de bajas temperaturas, el crecimiento se ralentiza antes de que la fotosíntesis disminuya, lo que genera una mayor liberación de compuestos al suelo. De manera similar, la disponibilidad

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

de agua determina la expansión celular, de modo que la escasez hídrica reduce el crecimiento antes de afectar significativamente la fotosíntesis, provocando una acumulación de azúcares en los tejidos y una mayor expulsión de sustancias por las raíces. Estos procesos reflejan un patrón común en el cual las plantas, ante restricciones de temperatura o humedad, continúan fijando carbono, pero sin poder emplearlo en el crecimiento, lo que conlleva la redistribución o eliminación del carbono excedente en formas secundarias (Prescott et al., 2020).

Las condiciones ambientales, particularmente la temperatura y la humedad, juegan un papel determinante en la propagación del *Black Point* en cultivos. Un estudio realizado por Aktaş y Endes (2025) analizó el impacto de estas variables en el desarrollo de la enfermedad a lo largo de dos años. Durante el primer año del estudio, la combinación de baja humedad y temperaturas más frías en mayo limitó significativamente el desarrollo de la enfermedad, reduciendo su incidencia en los cultivos. En contraste, en el segundo año, el incremento en la humedad relativa y el aumento de la temperatura generaron un ambiente propicio para la proliferación del hongo, lo que resultó en un mayor nivel de infección y severidad de la enfermedad (Aktaş & Endes, 2025).

En sistemas agrícolas expuestos a condiciones de baja humedad, la efectividad de los tratamientos con biofertilizantes y compuestos de crecimiento puede verse considerablemente reducida. Un estudio realizado bajo condiciones de elevadas temperaturas y déficit hídrico en la región de Tyumen demostró que, si bien ciertos bioestimulantes y nutrientes favorecen el desarrollo morfológico del trigo primaveral, su impacto en la productividad se ve limitado cuando la disponibilidad de agua es insuficiente. Este fenómeno sugiere que la temperatura y la humedad juegan un papel crítico en la respuesta de las plantas a los tratamientos, ya que en años con mayor disponibilidad hídrica, estos compuestos podrían expresar beneficios más significativos (Timofeev, 2025).

La temperatura y la humedad son relevantes en la producción de alimentos. Por ejemplo, desde 1951 en Angola, la temperatura media anual ha aumentado 1.4°C, lo que ha afectado directamente los ciclos de crecimiento de los cultivos y la disponibilidad de agua en los suelos. La disminución de la humedad en el suelo, junto con temperaturas más altas, contribuye a la reducción en la productividad agrícola, con proyecciones que indican una disminución de hasta un 7% en el rendimiento para 2050. Este impacto es particularmente severo en cultivos sensibles como el maíz, los frijoles y los cacahuates, que dependen de una disponibilidad estable de humedad para su desarrollo óptimo. En contraste, cultivos más resistentes a la sequía, como la yuca y el mijo, muestran una mayor capacidad de adaptación ante estas condiciones climáticas adversas. Los efectos combinados del aumento de temperatura y la reducción en la humedad del suelo han agravado la crisis

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

alimentaria en el país, afectando a 3.81 millones de personas en el sur de Angola en 2021 (Correia et al., 2024).

Por este motivo, es importante conocer cada sector del terreno de una manera óptima y a tiempo real. En este sentido el uso de tecnologías para navegación autónoma, como módulos UWB son una buena alternativa al GPS (*Global Positioning System*), debido a la creciente demanda de precisión en las medidas en aplicaciones como la robótica y automatización, donde se observan las limitaciones del GPS, especialmente en entornos interiores. Este sistema de IPS (*Indoor Positioning System*) con UWB, destaca por su capacidad para ofrecer una precisión de  $\pm 10\text{cm}$ , crucial para tecnologías portátiles. En comparación con los sistemas basados en visión artificial, los dispositivos UWB ofrecen una mayor flexibilidad y menores costos de implementación, además de ser menos susceptibles a problemas de iluminación y escalabilidad (Waqar et al., 2021).

La combinación de enfoques tradicionales y tecnológicos proporciona a los agricultores una visión integral y detallada de las condiciones de crecimiento de sus cultivos, permitiéndoles tomar decisiones informadas y oportunas para optimizar la productividad y la sostenibilidad de sus operaciones agrícolas.

Para abordar la problemática, se propone implementar un sistema de sensores que adquiera datos de humedad relativa, temperatura y CO<sub>2</sub>, en tiempo real desde múltiples ubicaciones dentro de los invernaderos. Estos datos se procesarán en la nube y se representarán visualmente mediante *heatmaps* (mapas de calor), facilitando la interpretación de las condiciones ambientales y apoyando la toma de decisiones de los agricultores. Se propondrá un sistema de planeación de trayectorias en tiempo real para variables agroclimáticas, que se instalará en una plataforma móvil terrestre preexistente. La integración de navegación autónoma en el sistema permitirá que la plataforma con sensores se desplace de manera independiente dentro de los invernaderos, obteniendo mediciones de las condiciones ambientales en diferentes áreas del cultivo.

En este sistema se evaluará la obtención de datos y creación de *heatmaps*, optimizando así la monitorización ambiental en los invernaderos. La plataforma permitirá la captura precisa de variables ambientales y enviará esta información a una plataforma IoT, proporcionando a los agricultores datos valiosos para la planificación y gestión de sus actividades. Esta propuesta está alineada con los principios de la agricultura de precisión, que optimiza el manejo de cultivos mediante sensores para monitorear y controlar las variables ambientales y las necesidades de los cultivos. Este enfoque permitirá a los propietarios de invernaderos monitorear remotamente el estado de sus cultivos y tomar decisiones informadas a partir de datos en tiempo real, ofreciendo una visión detallada de las condiciones ambientales, contribuyendo a una agricultura más eficiente y sostenible en Antioquia. Así mismo, impactando directamente en el cumplimiento del ODS (Objetivo de

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Desarrollo Sostenible) número 2: "Hambre Cero" (Naciones Unidas, n.d.), mejorando la eficiencia y sostenibilidad de la agricultura en la región de Antioquia. Al garantizar una producción agrícola más eficiente y sostenible, se fortalece la seguridad alimentaria y se impulsan sistemas agrícolas que preserven los recursos naturales y la biodiversidad, apoyando así los objetivos más amplios de desarrollo sostenible.

**Objetivo general.**

- Desarrollar una plataforma robótica móvil para terrenos irregulares, con planificación de trayectorias, que permita la adquisición y transmisión de datos agroclimáticos a internet.

**Objetivos específicos.**

- Diseñar y desarrollar un sistema de robótica móvil capaz de desplazarse de manera autónoma en terrenos irregulares para la recolección de variables agroclimáticas.
- Implementar algoritmos de planificación de trayectorias que permitan al robot navegar de manera eficiente y segura a través de los terrenos agrícolas.
- Integrar un sistema de comunicación en tiempo real para la transmisión y publicación automática de las variables agroclimáticas recolectadas en una plataforma de IoT.
- Evaluar la planificación de trayectorias mediante porcentaje de error máximo y mínimo en coordenadas establecidas.

Se presenta el contexto general del problema agrícola en invernaderos, destacando la necesidad de monitoreo ambiental en tiempo real para optimizar la productividad de los cultivos. Se aborda la importancia de variables como la humedad, temperatura, CO2 y luz, y se identifican las limitaciones de los métodos tradicionales. Además, se justifica el uso de tecnologías emergentes como la navegación autónoma e IoT en sistemas agrícolas. Esto concluye con la formulación del objetivo general y los objetivos específicos del proyecto, enmarcados en la agricultura de precisión y su contribución a la sostenibilidad agrícola regional.

Se expone el estado del arte sobre tecnologías aplicadas al monitoreo ambiental y la automatización agrícola. Se hace una revisión de estudios relacionados con sensores ambientales, plataformas móviles, sistemas UWB y planificación de trayectorias. Además, se abordan fundamentos sobre agricultura de precisión, sistemas IoT, interpolación de datos y representación espacial mediante mapas de calor.

Posteriormente se describe el proceso para el diseño, desarrollo e implementación del sistema propuesto. Se detallan las fases del trabajo, desde la revisión bibliográfica y diseño CAD de la estructura, hasta la integración electrónica, montaje de sensores, instalación de

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

módulos UWB y planificación de trayectorias. También se incluyen las pruebas experimentales realizadas en laboratorio, las cuales permitieron validar la adquisición de datos y la transmisión a la plataforma IoT *Firebase*.

Se presentan los datos obtenidos durante la validación del sistema. Se analiza la precisión del posicionamiento UWB comparado con mediciones reales, destacando las trayectorias con menor error y aquellas con desviaciones significativas. Además, se muestra la publicación de los datos en tiempo real en *Firebase* y se visualiza la información mediante matrices interpoladas para CO2 y humedad.

Finalmente se mencionan conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro sintetiza los hallazgos del proyecto en relación con los objetivos planteados. Se presentan conclusiones generales y específicas basadas en la precisión del sistema, la efectividad de la navegación autónoma y el desempeño del monitoreo IoT. A su vez, se proponen recomendaciones técnicas para mejorar el sistema y se plantean diversas líneas de trabajo futuro, incluyendo la incorporación de inteligencia artificial, expansión de variables adquiridas, integración de actuadores y validación en escenarios reales.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## 2. MARCO TEÓRICO

---

El método convencional y ampliamente utilizado para el análisis del suelo en los cultivos es el muestreo y análisis, como se describe en "*The Nature and Properties of Soils*" de Brady y Weil (Weil & Brady, 2016). Este proceso implica tomar muestras de suelo de diferentes áreas de cultivo y analizarlas en laboratorio para evaluar su composición. Aunque este enfoque proporciona información valiosa sobre las condiciones del suelo, enfrenta desafíos debido a los tiempos de análisis, ya que las muestras deben ser enviadas a un laboratorio, lo que ralentiza el proceso y no permite obtener datos en tiempo real. La falta de obtención efectiva de datos impulsa la necesidad de emplear diversas herramientas, el documento "Actualidad en el agro colombiano y aprovechamiento de los recursos visto desde la robótica" (Becerra Mora & Soto Gaona, 2019) examina el estado actual del sector agrícola en Colombia y subraya la importancia de la robótica en la agricultura de precisión como una herramienta esencial para mejorar la productividad. Este artículo destaca el potencial de Colombia en la agroindustria y aborda tanto los desafíos como las oportunidades del sector, enfatizando la necesidad de desarrollar la agricultura de precisión, una estrategia centrada en la observación, medición y respuesta a la variabilidad de los cultivos.

En los últimos años, la robótica agrícola ha emergido como una solución clave para abordar desafíos como la escasez de mano de obra estacional y la necesidad de prácticas agrícolas más sostenibles. Se han desarrollado robots para tareas específicas como monitoreo, pulverización, cosecha y transporte, con distintos niveles de autonomía y eficiencia. No obstante, el uso de equipos cooperativos de robots en la agricultura es aún un campo en desarrollo, aunque con gran potencial. La cooperación entre UGV (*Unmanned Ground Vehicle*) y UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) ha demostrado mejorar la precisión y eficiencia en actividades como la detección de plagas y enfermedades, donde los UAV identifican áreas críticas y los UGV realizan intervenciones de precisión. (Lytridis et al., 2021)

La implementación de tecnologías emergentes en la agricultura ha permitido optimizar el monitoreo y control de cultivos a través de herramientas basadas en el IoT. En particular, los sistemas de monitoreo ambiental han demostrado ser una solución eficaz para mejorar la gestión de variables críticas en cultivos como la fresa. Mediante el uso de sensores interconectados, es posible recopilar en tiempo real datos sobre humedad relativa, temperatura y pH del suelo, facilitando así la toma de decisiones basada en información precisa. La integración de estos sistemas con plataformas de procesamiento y almacenamiento de datos en la nube permite una supervisión continua y una mejor planificación de los recursos agrícolas. Además, la capacidad de estos sistemas para identificar condiciones ambientales desfavorables y prevenir pérdidas en la producción

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

representa un avance significativo en la automatización de la agricultura. (Juan Carlos et al., 2020)

Por otro lado, en el artículo "Estudio del uso de técnicas de inteligencia artificial aplicadas al análisis de suelos para el sector agrícola" (Bonilla Segovia et al., 2021) expone cómo la IA (Inteligencia Artificial) puede revolucionar la agricultura al automatizar procesos y mitigar problemas como el manejo inadecuado del suelo, enfermedades y plagas. Técnicas como sensores remotos para la detección de humedad, temperatura y pH del suelo, así como el riego automatizado con GPS, son ejemplos de cómo la IA optimiza el manejo de cultivos y el uso de recursos, como agua y pesticidas.

El desarrollo de sistemas automatizados en la agricultura ha permitido optimizar el monitoreo y control de cultivos mediante tecnologías de bajo costo. En este contexto, se han implementado sistemas web integrados con sensores y microcontroladores que facilitan la supervisión de invernaderos en tiempo real. Estos sistemas capturan variables climatológicas clave, como temperatura, humedad y luz, permitiendo su visualización remota a través de aplicaciones web. Además, se ha integrado un protocolo de comunicación que posibilita la activación de dispositivos de alto voltaje para regular las condiciones ambientales dentro del invernadero. La principal ventaja de estas soluciones radica en su accesibilidad y costo reducido en comparación con sistemas comerciales extranjeros, lo que facilita su adopción por parte de pequeños y medianos productores. (Mamani et al., 2017)

El uso de tecnologías móviles en la agricultura ha permitido la automatización de procesos de monitoreo de cultivos y plagas, facilitando la toma de decisiones basada en datos en tiempo real. En este contexto, se ha desarrollado PulAm, una aplicación móvil basada en Android diseñada para asistir en la supervisión de cultivos, particularmente en la detección y manejo del pulgón amarillo en cultivos de sorgo en Nayarit, México. Esta herramienta permite a los técnicos registrar inspecciones de campo, capturar coordenadas geográficas de parcelas y evaluar niveles de infestación de manera sistemática. A través de la sincronización con una base de datos centralizada, PulAm busca reducir errores en la captura de información y mejorar la trazabilidad de los datos recolectados durante campañas fitosanitarias. Los resultados de su implementación muestran mejoras en la eficiencia del monitoreo y una mayor precisión en la recolección de datos, aunque persisten desafíos en la adopción tecnológica por parte de los productores y en la integración de modelos predictivos que permitan una respuesta más ágil ante brotes de plagas. (Perez-Mena et al., 2019)

Complementando esta visión, el artículo "Nuevos enfoques y prácticas para la agricultura sostenible" (Muhie, 2022) destaca la agricultura de precisión como una metodología que utiliza datos para maximizar los rendimientos y mejorar la calidad de los cultivos, a la vez

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

que conserva recursos mediante la implementación de sensores y herramientas de análisis que facilitan decisiones de manejo más eficientes y sostenibles. Este sistema, aunque monitorea variables clave como la humedad del suelo y la temperatura, presenta limitaciones en movilidad, ya que emplea sensores fijos ubicados en un solo sector del cultivo. A pesar de la falta de movilidad, existen estudios que muestran cómo es posible monitorear en tiempo real variables ambientales esenciales dentro de invernaderos, como humedad del suelo, temperatura e intensidad de luz (Xiao, 2021).

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

### 3. METODOLOGÍA

---

La metodología desarrollada para este proyecto se organizó en etapas definidas, abarcando desde el análisis teórico hasta la validación experimental.

#### **Revisión del estado del arte**

Se realizó una revisión de la literatura con el propósito de identificar avances en tres líneas del proyecto: robótica móvil terrestre aplicada al entorno agrícola, algoritmos de navegación autónoma para entornos irregulares, y sistemas de adquisición y transmisión de variables agroclimáticas en invernaderos mediante plataformas IoT.

En el campo de la robótica agrícola, se encontró un crecimiento en el desarrollo de plataformas móviles diseñadas específicamente para adaptarse a las condiciones del terreno en zonas rurales. Estos avances incluyen UGV con tracción diferencial, suspensión tipo rocker-bogie y mecanismos de navegación híbridos que permiten operar en suelos con humedad variable, irregularidades o presencia de obstáculos naturales.

En cuanto a navegación autónoma, se identificaron diversas estrategias de localización utilizadas en ambientes agrícolas cerrados. Aunque el GPS sigue siendo ampliamente empleado en zonas abiertas, su uso en invernaderos presenta limitaciones críticas debido a la baja precisión causada por estructuras metálicas, toldos plásticos y otras fuentes de interferencia. Por esta razón, tecnologías como UWB han sido empleadas. El sistema UWB permite localización en interiores con una precisión de  $\pm 10$  cm, superando ampliamente al GPS convencional en estos entornos.

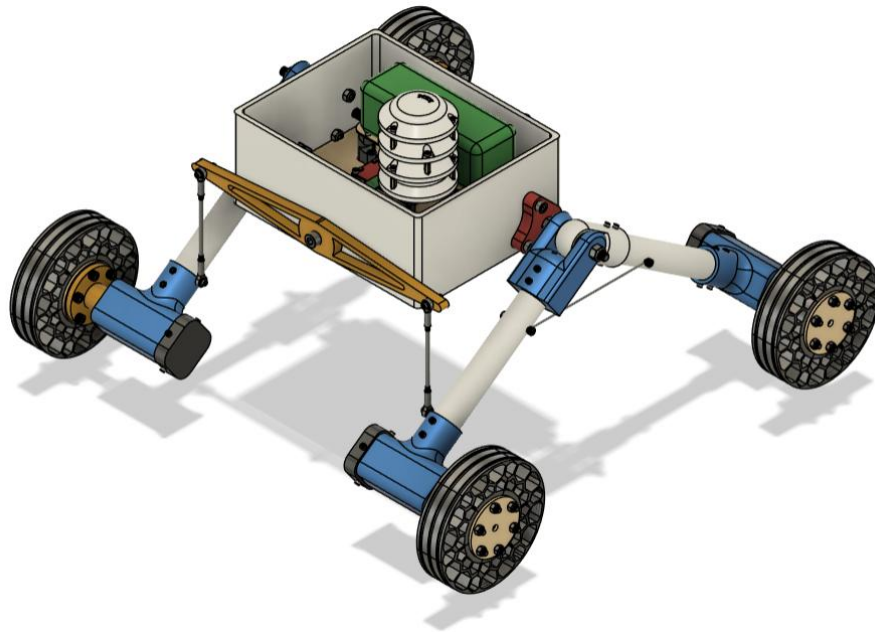
En el ámbito de la adquisición de variables agroclimáticas, se observó que muchas propuestas aún dependen de sensores fijos, los cuales, si bien proporcionan datos confiables, presentan limitaciones importantes en cuanto a cobertura espacial. Frente a esta problemática, diversos autores proponen la integración de sensores en plataformas móviles que permitan generar mapas de calor dinámicos a partir de mediciones puntuales. Variables como la humedad relativa del aire, el CO<sub>2</sub>, la temperatura, la radiación solar o la presión atmosférica han sido priorizadas debido a su influencia directa sobre procesos fisiológicos de las plantas, como la fotosíntesis, la absorción de nutrientes o la propagación de enfermedades (da Silva et al., 2018).

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

### Plataforma robótica móvil para terrenos irregulares

El proceso se desarrolló utilizando una plataforma móvil terrestre previamente diseñada, seleccionada por su idoneidad para operar en entornos agrícolas no estructurados, como invernaderos con irregularidades topográficas, presencia de charcos, suelos blandos o vegetación de bajo porte. Esta plataforma cuenta con una estructura liviana fabricada principalmente en PLA (ácido poliláctico) mediante tecnología de impresión 3D, y está equipada con un sistema de tracción diferencial, el cual proporciona buena maniobrabilidad en espacios reducidos y adecuada estabilidad sobre superficies con inclinación o irregularidades.

La estructura de la plataforma fue analizada y adaptada utilizando software de diseño CAD, específicamente Autodesk Fusion 360, lo que permitió visualizar y modelar digitalmente todos los componentes, facilitando su integración y distribución interna. Esta herramienta también fue útil para validar el espacio disponible y planificar la ubicación de los sensores, actuadores y módulos electrónicos, como se observa en la Figura 1.



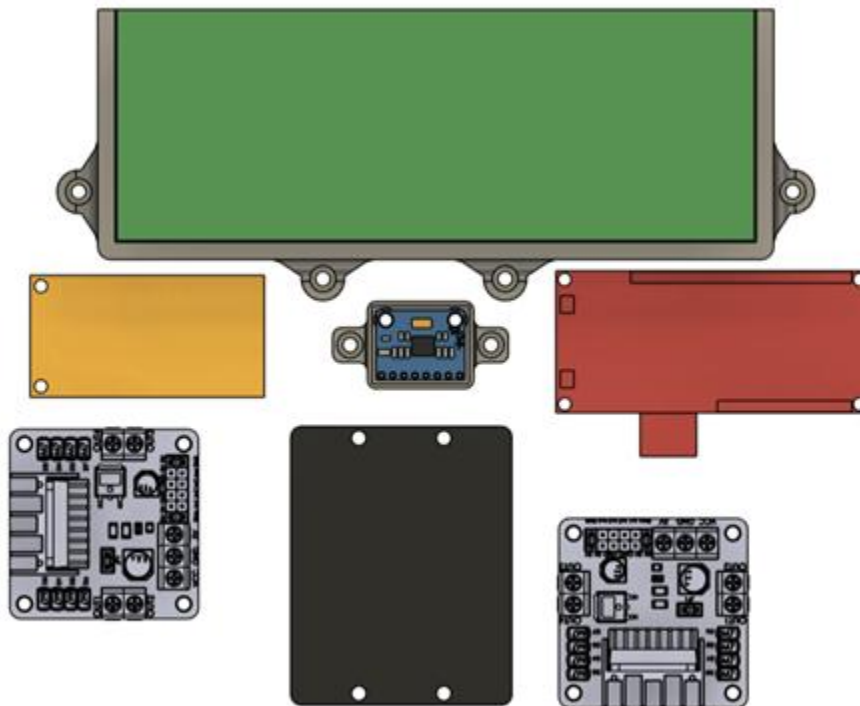
*Figura 1. Diseño plataforma robótica móvil*

Además, se llevó a cabo la integración de los componentes electrónicos dentro de una caja impermeable, siguiendo una disposición que asegura tanto la protección frente a condiciones ambientales adversas como el correcto funcionamiento del sistema. La distribución interna fue diseñada para facilitar tareas de mantenimiento y minimizar interferencias entre los diferentes módulos electrónicos.

La Figura 2 muestra esta distribución, donde los componentes se identifican mediante códigos de color para una mejor visualización: **verde**, correspondiente a la batería LiPo 4S

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

de 8000 mAh y 14.8V, seleccionada por su capacidad para alimentar de manera estable los motores de tracción; **rojo**, para el módulo de posicionamiento UWB DW1000, encargado de proporcionar la localización precisa de la plataforma; **negro**, para el microcontrolador *SparkFun Thing Plus* (ESP32), elegido por su conectividad integrada Wi-Fi y Bluetooth, lo cual permite la transmisión de datos a plataformas en la nube; **gris**, para los controladores de motor basados en el módulo L298N, fabricados por DFRobot, encargados de la regulación de velocidad y dirección de los motores; **azul**, para la IMU mpu6065, que contribuye a la estimación de orientación y estabilidad; y **amarillo**, para el regulador de voltaje, encargado de proporcionar 5V estables para la alimentación del microcontrolador.



*Figura 2. Posicionamiento componentes electrónicos en CAD.*

### **Selección de sensores para la adquisición de variables ambientales**

También se incorporaron sensores para la medición de variables ambientales para el desarrollo de los cultivos. Para la detección de CO<sub>2</sub>, se utilizó un sensor MQ-135, el cual opera mediante un elemento semiconductor sensible a gases como amoníaco, óxidos de nitrógeno, alcohol, benceno y CO<sub>2</sub>. La medición del CO<sub>2</sub> es fundamental en ambientes agrícolas, especialmente en invernaderos, ya que este gas es uno de los principales insumos del proceso fotosintético. Una concentración adecuada de CO<sub>2</sub> estimula el crecimiento vegetal, mientras que niveles excesivos o deficientes pueden afectar negativamente la tasa de fotosíntesis, el desarrollo de biomasa y, por ende, el rendimiento de los cultivos.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Para la medición de temperatura, se incorporó un sensor digital DS18B20, ampliamente utilizado en aplicaciones agrícolas debido a su estabilidad y facilidad de conexión mediante protocolo *One-Wire*. Este sensor ofrece una resolución configurable de hasta 12 bits y puede operar en un amplio rango de temperaturas, lo que lo hace ideal para monitorear microclimas en invernaderos o zonas rurales. La temperatura es una variable determinante en la actividad metabólica de las plantas, influyendo directamente en la germinación, la floración, la absorción de nutrientes y la aparición de enfermedades. Un monitoreo constante permite anticipar situaciones de estrés térmico y ajustar condiciones ambientales mediante ventilación, sombreado o riego.

Ambos sensores fueron instalados dentro de un domo protector fabricado mediante impresión 3D en PLA como se muestra en la Figura 3, diseñado específicamente para entornos agrícolas. Esta cubierta protege los sensores contra el polvo, la lluvia y la radiación solar directa, factores que podrían alterar la precisión de las lecturas. El domo posee una estructura modular con aberturas que permiten el flujo de aire alrededor de los sensores, asegurando una correcta ventilación y evitando acumulaciones de calor o humedad que generen mediciones erróneas. En la Figura 4 se muestra la implementación del domo en la plataforma móvil.

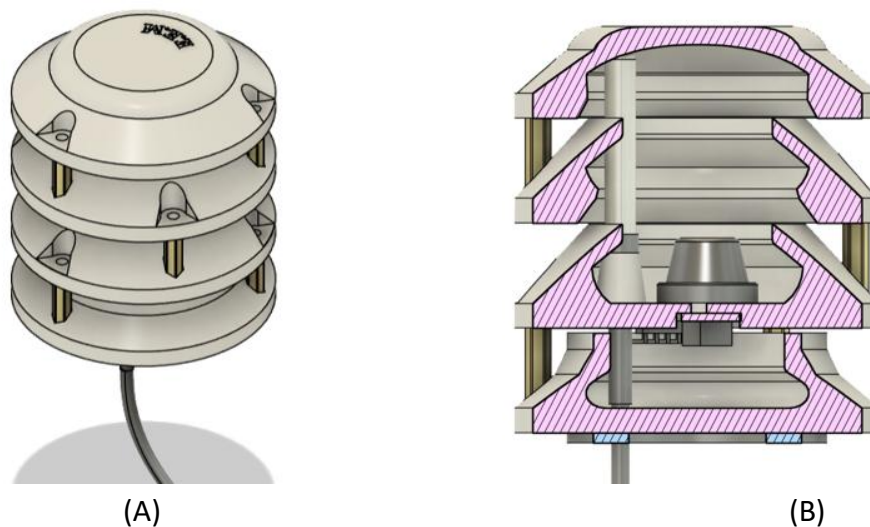


Figura 3. (A) Vista isométrica sistema de adquisición CAD. (B) Vista en sección transversal sistema de adquisición CAD.

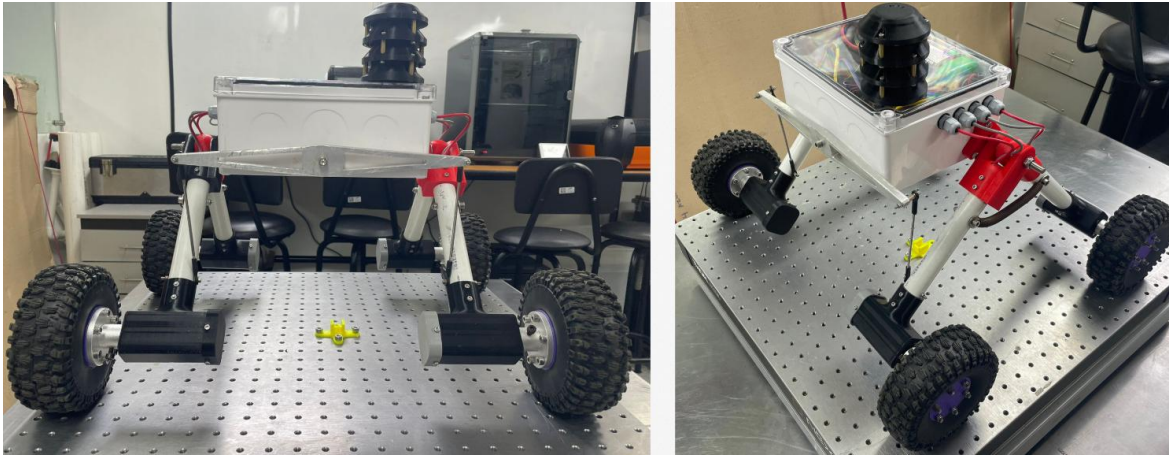


Figura 4. Montaje de sistema de adquisición en plataforma móvil.

### Planificación de trayectorias y navegación autónoma

Inicialmente, se diseñaron las cajas destinadas a alojar los módulos de posicionamiento UWB, tal como se muestra en la Figura 5. Una vez finalizado el diseño, las piezas fueron fabricadas mediante impresión 3D y sometidas a pruebas de validación funcional, con el fin de verificar la correcta sujeción de los módulos, la estabilidad estructural y la eficiencia en la transmisión de señales. Finalmente, tras superar las pruebas, los módulos UWB fueron instalados en ubicaciones estratégicas dentro del laboratorio, tal como se observa en la Figura 6, asegurando una cobertura adecuada para el sistema de localización de la plataforma robótica la cual es a una distancia menor a diez (10) metros.

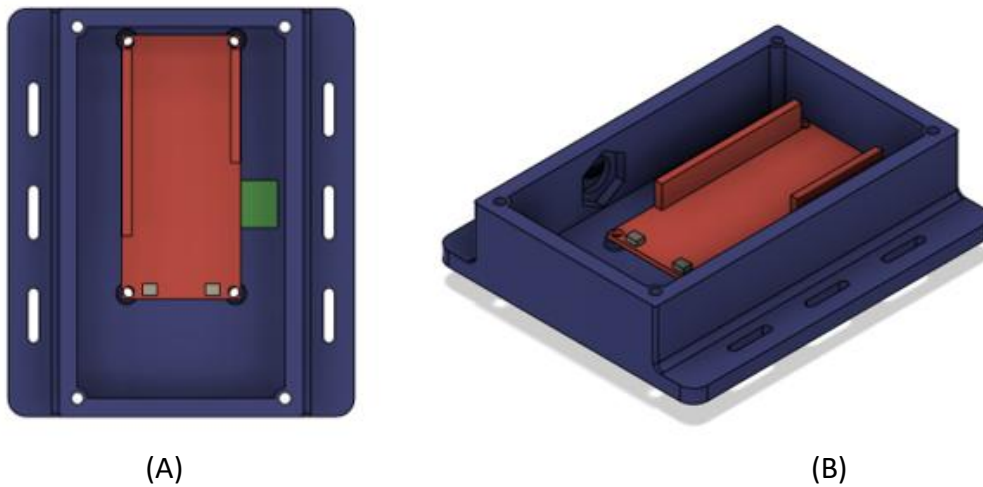


Figura 5. (A) Vista superior sistema UWB CAD. (B) Vista isométrica sistema UWB CAD.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22



(A)

(B)

Figura 6. (A) Vista superior sistema UWB implementado. (B) Vista panorámica sistema completo UWB.

En el artículo “*Position Calculation with Least Squares based on Distance Measurements*” se expone una técnica de localización en interiores mediante la estimación de posición basada en mediciones de distancia desde un nodo móvil (tag) hacia anclas fijas. Esta metodología guarda una relación directa con la instalación de módulos UWB implementada en este proyecto, donde se establecieron anclas en ubicaciones estratégicas dentro del entorno de pruebas. El autor propone una linealización de la ecuación de posicionamiento basada en trilateración, lo cual permite transformar el problema no lineal en un sistema lineal resoluble mediante mínimos cuadrados. Esta misma lógica matemática fue utilizada en la etapa de calibración del sistema, donde se tomaron las distancias entre el robot y las anclas para ajustar su posición estimada dentro del espacio. La técnica descrita permite reducir el error acumulado durante el movimiento del robot, esencial para garantizar una navegación autónoma (Pelka, 2015). En la Figura 7 se ilustra el modelo geométrico básico de localización, un tag central rodeado por múltiples anclas, con vectores de distancia representando las mediciones clave para estimar su posición usando mínimos cuadrados los cuales están descritos por la Ecuación 1.

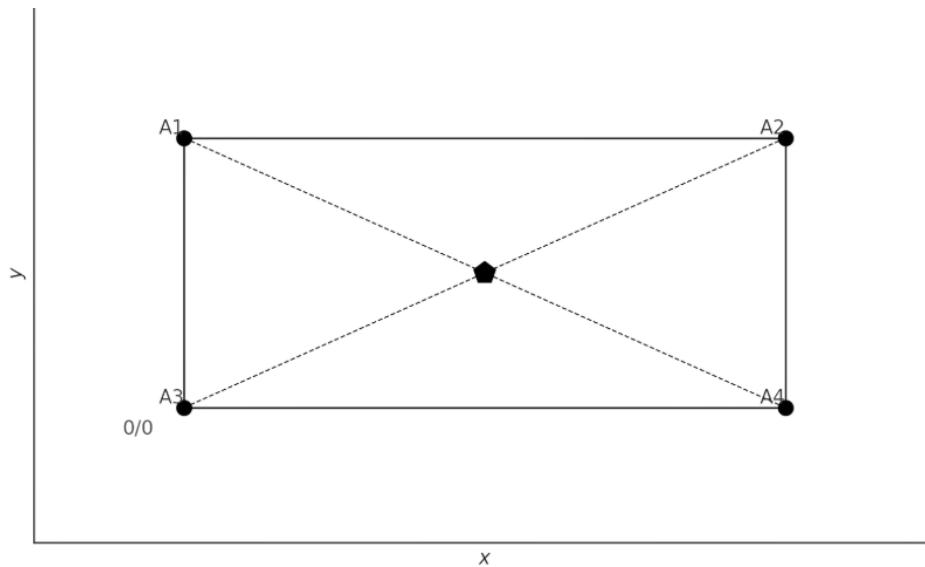


Figura 7. Disposición de anclas en el espacio.

$$(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2 = d_i^2$$

Ecuación 1. Ecuación de lateración en tres dimensiones.

Posteriormente, se llevaron a cabo pruebas experimentales para evaluar el desempeño de los módulos UWB en sus distintos modos de operación. Específicamente, se analizaron los siguientes modos preconfigurados del sistema: *MODE LONGDATA FAST ACCURACY*, *MODE LONGDATA RANGE ACCURACY* y *MODE SHORTDATA FAST ACCURACY*, los cuales están diseñados para obtener la mejor precisión de medición en diferentes escenarios de alcance y velocidad de adquisición.

Para cada configuración, se estableció un protocolo de medición en el cual el tag UWB se ubicó sobre un trípode, mientras que un ancla fija se colocó sobre otro, con separaciones controladas de un (1) metro, cuatro (4) metros y ocho (8) metros. En cada una de estas distancias se recolectó un conjunto de 3500 muestras, con el fin de garantizar una base estadística representativa para el análisis.

Con los datos obtenidos, se generaron dos tipos de gráficas por cada modo de operación:

- Un histograma de frecuencia, para visualizar la distribución de las mediciones y evaluar la concentración de valores alrededor del promedio.
- Una gráfica de dispersión, que permitió analizar la variabilidad y estabilidad de las mediciones a lo largo del tiempo.

En la Figura 8, correspondiente a la prueba realizada a una distancia de un (1) metro, se observa que el modo de operación *MODE LONGDATA RANGE ACCURACY* presenta un comportamiento superior respecto a los demás. El histograma muestra una distribución de valores centrada en torno al metro con un pico de frecuencia claramente definido, lo que

refleja una alta precisión en las mediciones. Por su parte, las gráficas de dispersión evidencian una nube de puntos más compacta y estable en este modo, en contraste con los modos *LONGDATA FAST ACCURACY* y *SHORTDATA FAST ACCURACY*, los cuales presentan mayor dispersión y múltiples picos de baja concentración en el histograma, lo que indica una menor confiabilidad en la medición repetida.

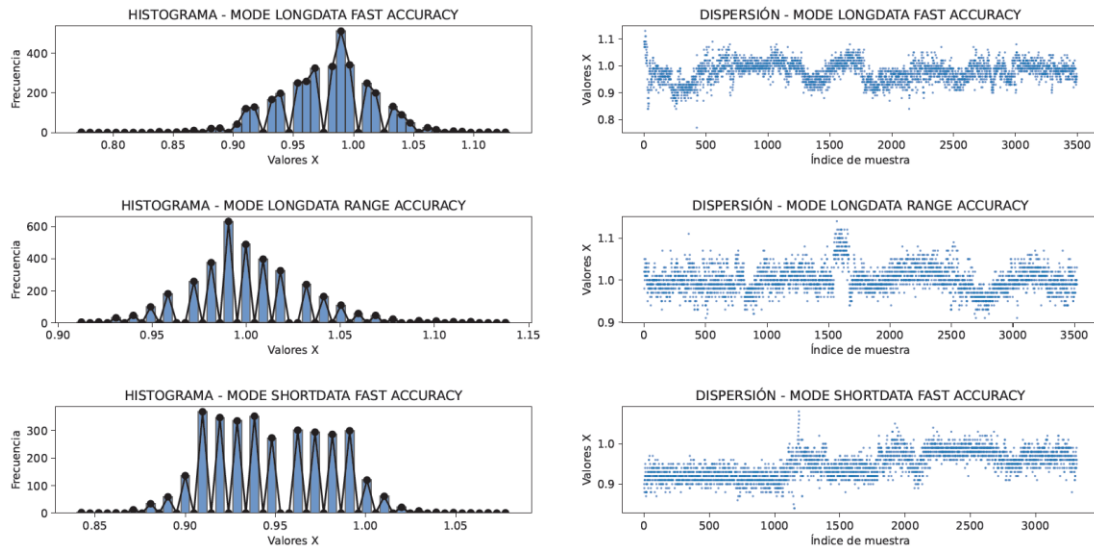


Figura 8. Análisis de Modos de operación UWB por Distancia (100 cm)

En la Figura 9, que representa las mediciones a cuatro (4) metros, se mantiene la tendencia de superioridad del modo *LONGDATA RANGE ACCURACY*. El histograma de este modo presenta una forma simétrica, con alta frecuencia de valores en el entorno de los 4 metros, lo que refleja una medición precisa y estable. La gráfica de dispersión muestra consistencia en la distribución temporal de los datos, sin grandes fluctuaciones o desviaciones abruptas. En cambio, los modos *LONGDATA FAST ACCURACY* y *SHORTDATA FAST ACCURACY* muestran mayor variabilidad en las muestras, tanto en la dispersión de los datos como en la forma de los histogramas, con múltiples picos o agrupaciones irregulares.

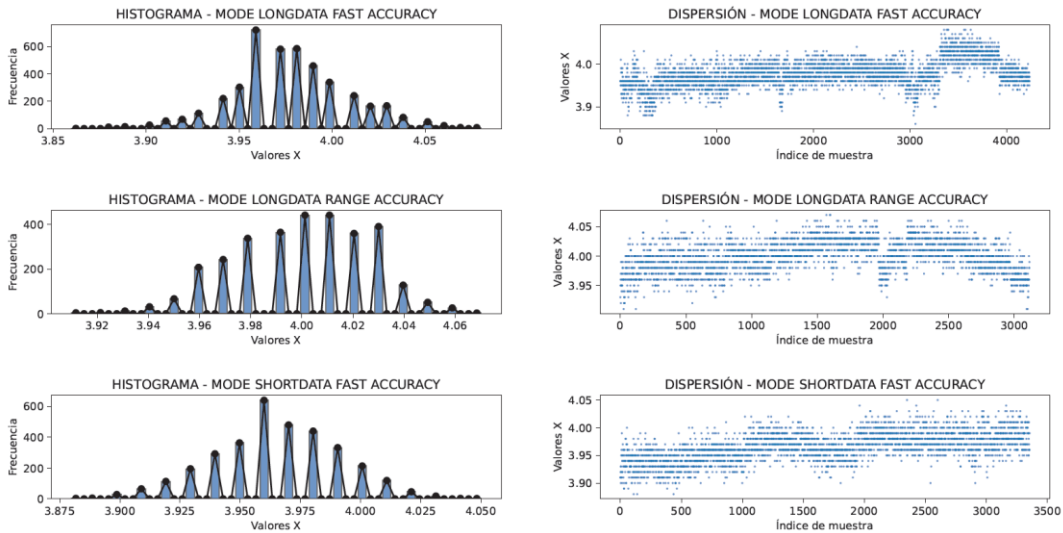


Figura 9. Análisis de Modos de operación UWB por Distancia (400 cm)

Finalmente, en la Figura 10, correspondiente a la distancia de ocho (8) metros, todos los modos presentan un incremento en la dispersión de los datos, lo cual es esperable por el aumento en la distancia. Sin embargo, el modo *LONGDATA RANGE ACCURACY* continúa mostrando un comportamiento más estable y confiable. Su histograma mantiene un patrón dominante con un pico centrado en torno a los 8 metros, mientras que los otros dos modos evidencian distribuciones más caóticas con picos múltiples y poco definidos. Con base en estos resultados, se concluye que *MODE LONGDATA RANGE ACCURACY* es el más adecuado de los tres, al ofrecer la mejor combinación de precisión, estabilidad temporal y confiabilidad estadística en todos los rangos evaluados.

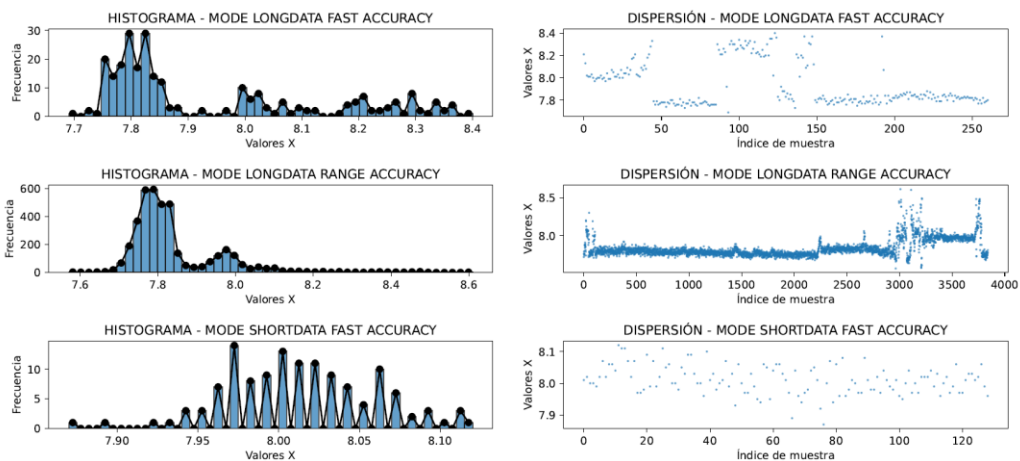


Figura 10. Análisis de Modos de operación UWB por Distancia (800 cm)

Con base en los resultados obtenidos en las pruebas comparativas de modos de operación, se procedió a la implementación del algoritmo de trilateración utilizando el modo *MODE*

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

*LONGDATA RANGE ACCURACY*, seleccionado por su superior desempeño en términos de precisión y estabilidad. Para el desarrollo de este algoritmo, se empleó la librería del módulo UWB originalmente creada por Thomas Trojer y posteriormente mejorada por James Remington, la cual proporciona una estructura para la comunicación entre dispositivos UWB y la recolección de medidas de distancia entre el TAG y las anclas. En esta etapa, se configuraron los parámetros del modo seleccionado y se integraron las medidas necesarias para la estimación de posición, tal como se ilustra en la Figura 11.

```
float anchor_matrix[N_ANCHORS][3] = {
  //list of anchor coordinates, relative to chosen origin.
  { 0.00, 3.20, 0.97 }, //Anchor labeled #1
  { 3.20, 3.20, 1.14 }, //Anchor labeled #2
  { 0.00, 0.00, 0.6 }, //Anchor labeled #3
  { 3.20, 0.00, 0.15 } //Anchor labeled #4
};
//Z values are ignored in this code, except to compute RMS distance error
// start as tag, do not assign random short address
DW1000Ranging.startAsTag(tag_addr, DW1000.MODE_LONGDATA_RANGE_ACCURACY, false);
```

Figura 11. Configuración parámetros programación UWB

A partir de esta configuración, se procede generar una trayectoria cuadrada la cual está descrita en la Figura 12, que permitiera al robot recorrer el área de prueba y retornar al punto de inicio. Durante la ejecución de esta trayectoria, se integró un sistema de adquisición de datos ambientales, registrando en tiempo real los niveles de humedad relativa y concentración de CO2 en distintos puntos del recorrido. Esta información fue almacenada para su visualización como se observa en la Figura 13.

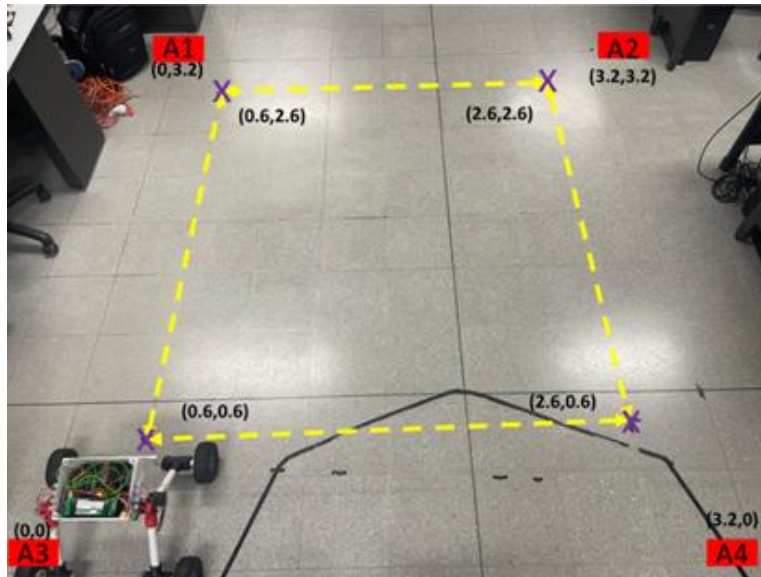


Figura 12. Medición de distancias entre anclas (A1, A2, A3, A4) y definición de puntos de referencia para la trayectoria a seguir.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

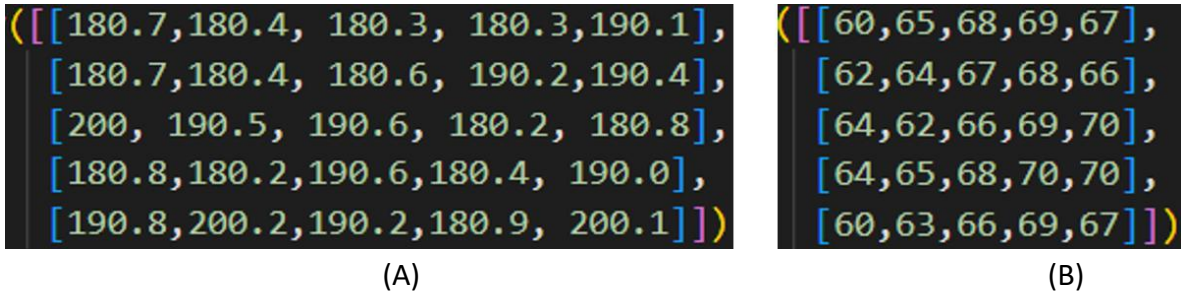


Figura 13. (A) Datos CO2 obtenidos en la trayectoria. (B) Datos humedad obtenidos en la trayectoria.

### Transmisión de datos y visualización en plataforma IoT

Para garantizar el acceso remoto de la información recolectada por la plataforma robótica, se implementó una arquitectura IoT en *Firebase Realtime Database*, un servicio de almacenamiento en la nube proporcionado por Google que permite gestionar datos en tiempo real de manera estructurada. *Firebase* ofrece una base de datos NoSQL que almacena los datos en formato JSON y los sincroniza instantáneamente con todos los dispositivos conectados. Esta característica lo convierte en una herramienta ideal para aplicaciones donde la latencia mínima y la persistencia de datos son esenciales, como en el monitoreo agroclimático. La transmisión de datos desde el microcontrolador ESP32 *SparkFun Thing Plus* se realizó utilizando su conectividad Wi-Fi integrada, mediante el protocolo HTTP REST y autenticación mediante una clave privada generada en la consola de *Firebase*. Los datos correspondientes a la humedad relativa y la concentración de CO2 fueron almacenados en tiempo real en dicha plataforma como se muestra en la Figura 14.

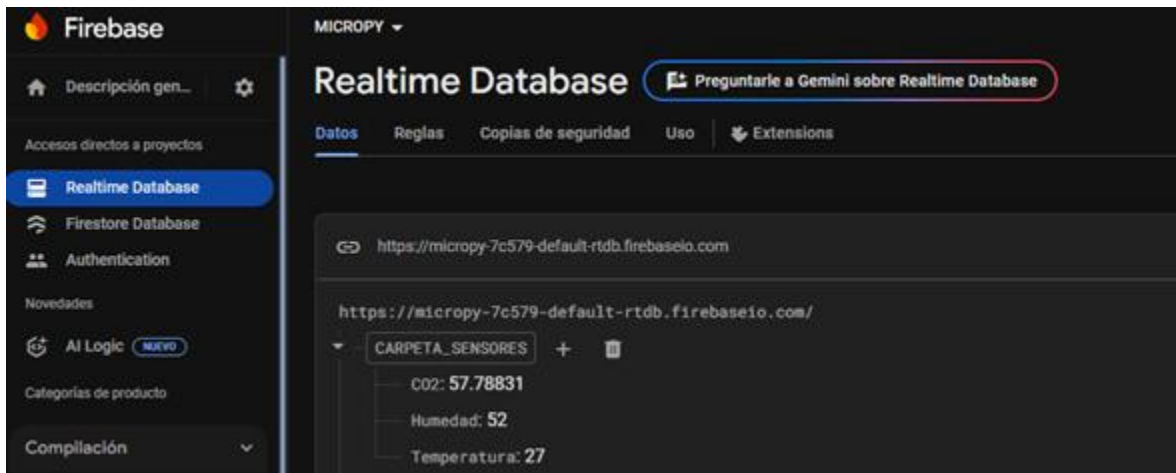


Figura 14. Captura de Firebase con datos en tiempo real

Una vez almacenados en la base de datos, los datos fueron procesados y representados visualmente mediante *heatmaps*, los cuales permiten interpretar espacialmente la distribución de las variables recolectadas. Para generar estos mapas, se aplicó una técnica de interpolación cúbica utilizando la función *zoom* de la librería *scipy.ndimage* de Python.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Esta técnica permite ampliar una matriz de valores original mediante un factor de interpolación, generando una matriz de mayor resolución que suaviza la transición entre puntos medidos. Gracias a este proceso fue posible detectar zonas con exceso o déficit de humedad, identificar acumulaciones anómalas de CO<sub>2</sub> potencialmente perjudiciales para el cultivo, y comprender de manera más clara la dinámica microclimática en el área de muestreo.

### **Evaluación del sistema de navegación y validación de trayectorias**

Para validar la precisión del sistema de navegación autónoma implementado en la plataforma robótica, se realizó un análisis cuantitativo comparando las coordenadas planificadas teóricamente con las coordenadas reales estimadas por el sistema de localización UWB. El proceso de validación consistió en trazar trayectorias con puntos de referencia predefinidos y registrar las posiciones reportadas por el sistema en cada uno de estos puntos. A partir de esta información, se calcularon los errores porcentuales de localización para cada coordenada, lo cual permitió determinar la desviación relativa entre el valor ideal y el medido.

Con los datos obtenidos, se construyó una matriz de desempeño que resume los errores porcentuales por coordenada en las diferentes trayectorias evaluadas. Esta información se presenta en la Tabla 1, donde se incluyen cinco puntos de interés definidos por las coordenadas (X, Y): (0.6, 2.6), (2.6, 2.6), (2.6, 0.6), (0.6, 0.6) y nuevamente (0.6, 2.6) como punto final de retorno. En la tabla se observa que las trayectorias 2 y 4 presentaron un comportamiento más preciso, con errores menores al 5 % en la mayoría de los puntos, destacándose especialmente la trayectoria 4 en la coordenada (2.6, 2.6), con un error mínimo de 1.92 %. Por el contrario, la trayectoria 3 evidenció una desviación significativa en la coordenada (0.6, 0.6), donde se registró un error de 29.15 %, lo cual sugiere la posible influencia de interferencias, obstrucciones físicas o una geometría subóptima en la disposición de las anclas UWB.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para validar la precisión del sistema de navegación autónoma, se diseñaron y ejecutaron múltiples recorridos dentro del entorno controlado de pruebas. Como referencia de comparación para la evaluación de exactitud, se empleó un flexómetro, con el cual se registraron las distancias reales en cada punto de muestreo del recorrido. Esta metodología permitió establecer una referencia física con la cual contrastar las posiciones estimadas por el sistema UWB.

La Figura 15, muestra los resultados obtenidos tras ejecutar cuatro recorridos diferentes, donde se presenta la superposición de las trayectorias reales (medidas con el flexómetro) frente a las trayectorias estimadas por el sistema UWB. Al analizar las gráficas, se observa que en términos generales los recorridos estimados se ajustan adecuadamente al contorno real, lo que demuestra una respuesta coherente del sistema de localización. Sin embargo, también se identifican variaciones en la precisión según el recorrido. En particular, los recorridos dos (2) y cuatro (4) evidencian una mayor fidelidad geométrica, con trayectorias suaves y bien alineadas con los puntos de referencia físicos, lo que indica una adecuada comunicación entre el TAG y las anclas, así como un bajo nivel de ruido en la estimación de la posición.

En contraste, la trayectoria tres (3) presenta una desviación notoria en el punto (0.6, 0.6), lo que sugiere una pérdida de precisión significativa en esa región. Este error puede atribuirse a interferencias electromagnéticas, efectos de multitrayectoria o a una disposición geométrica no óptima de las anclas UWB, factores que afectan directamente la calidad de las mediciones de distancia.

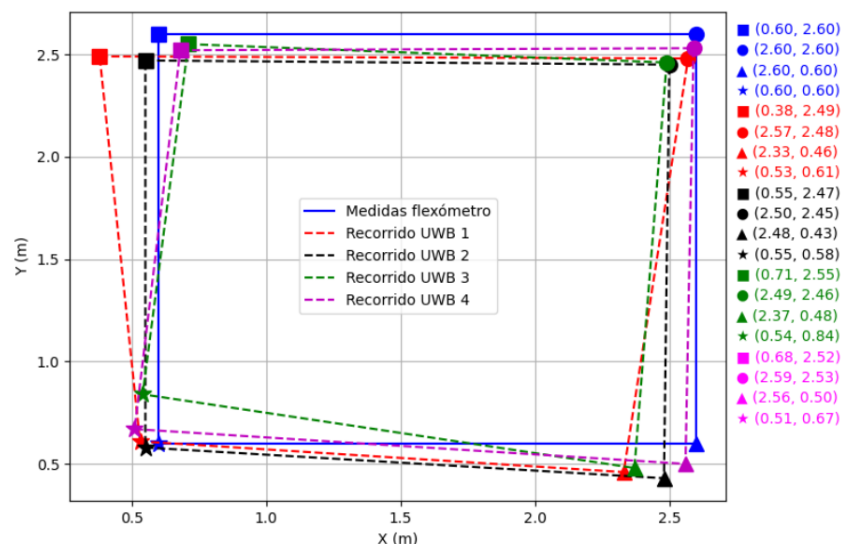


Figura 15. Gráfica de medidas TAG y medidas flexómetro.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

La Tabla 1, refuerza estos hallazgos mediante la representación del porcentaje de error coordinada a coordinada en cada recorrido. El error más bajo registrado corresponde al recorrido 4 en el punto (2.6, 2.6) con un 1.92%, mientras que el más alto se observa en el recorrido 3 en el punto (0.6, 0.6) con un 29.15%. Estos valores extremos permiten identificar zonas del espacio donde el sistema de localización muestra fortalezas y debilidades. La baja dispersión de errores en 2 y 4 valida la eficiencia del algoritmo de navegación desarrollado.

*Tabla 1. Tabla de errores porcentuales en cada coordenada*

Coordenadas (X, Y)	(0.6, 2.6)	(2.6, 2.6)	(2.6, 0.6)	(0.6, 0.6)	(0.6, 2.6)
Porcentaje error trayectoria 1	9.218021	3.364011	11.398058	8.333333	9.218021
Porcentaje error trayectoria 2	5.219884	4.902903	7.798372	6.346478	5.219884
Porcentaje error trayectoria 3	4.528313	4.842184	9.722267	29.154759	4.528313
Porcentaje error trayectoria 4	4.239992	1.923077	4.036352	13.437096	4.239992

Estos resultados muestran que la implementación de posicionamiento UWB puede alcanzar una precisión aceptable para navegación autónoma en invernaderos, especialmente si se optimiza la disposición de las anclas y se corrigen los sesgos identificados.

Como parte fundamental del sistema propuesto, todos los datos capturados por los sensores de la plataforma móvil incluyendo humedad relativa, temperatura y concentración de CO<sub>2</sub> fueron publicados en tiempo real en una plataforma IoT basada en *Firebase*. Esta arquitectura permitió la centralización y persistencia de la información, facilitando tanto el monitoreo remoto como el análisis posterior.

La Figura 14, muestra la interfaz de *Firebase Realtime Database*, donde se evidencia la estructura de almacenamiento de los datos bajo la carpeta “*CARPETA\_SENSORES*”. Allí se pueden ver los valores recibidos en tiempo real para CO<sub>2</sub>, humedad y temperatura, lo que garantiza trazabilidad constante para visualización y análisis en la nube. Estos datos fueron posteriormente interpolados para generar mapas de calor continuos que permiten visualizar la distribución espacial de dichas variables.

En la Figura 16, se muestra la matriz original de CO<sub>2</sub> y su respectiva interpolación. La distribución inicial evidencia una variación de concentraciones, con valores que oscilan entre 180.25 y 200.00 ppm. Tras la interpolación, se visualizan patrones más claros de acumulación y dispersión, permitiendo identificar zonas con mayor concentración de CO<sub>2</sub>, lo cual es relevante para la evaluación de la calidad del aire dentro del invernadero. Esta visualización facilita la toma de decisiones frente a posibles ajustes de ventilación o disposición de plantas.

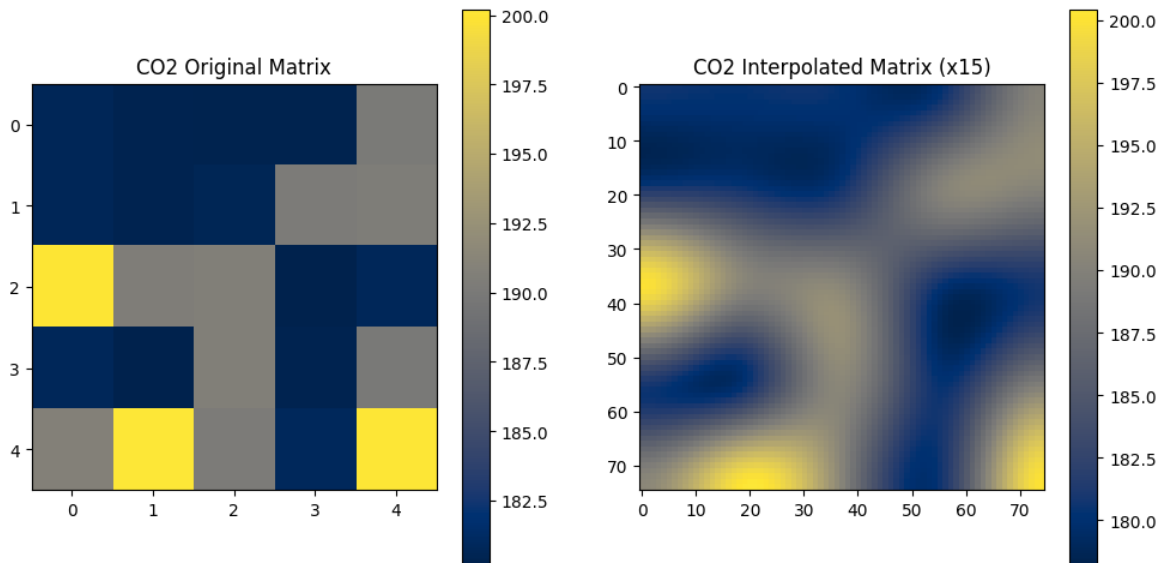


Figura 16. Matriz CO2 original e interpolada.

De forma similar, la Figura 17, presenta la matriz de humedad relativa. En su estado original, se aprecian niveles entre 60% y 70%, con una concentración más alta en las zonas centrales del cultivo. La interpolación permite identificar gradientes suaves que indican un comportamiento climático más estable en el centro del invernadero y variaciones más marcadas hacia los bordes. Este comportamiento sugiere que la distribución del riego o la circulación del aire pueden estar generando microclimas internos.

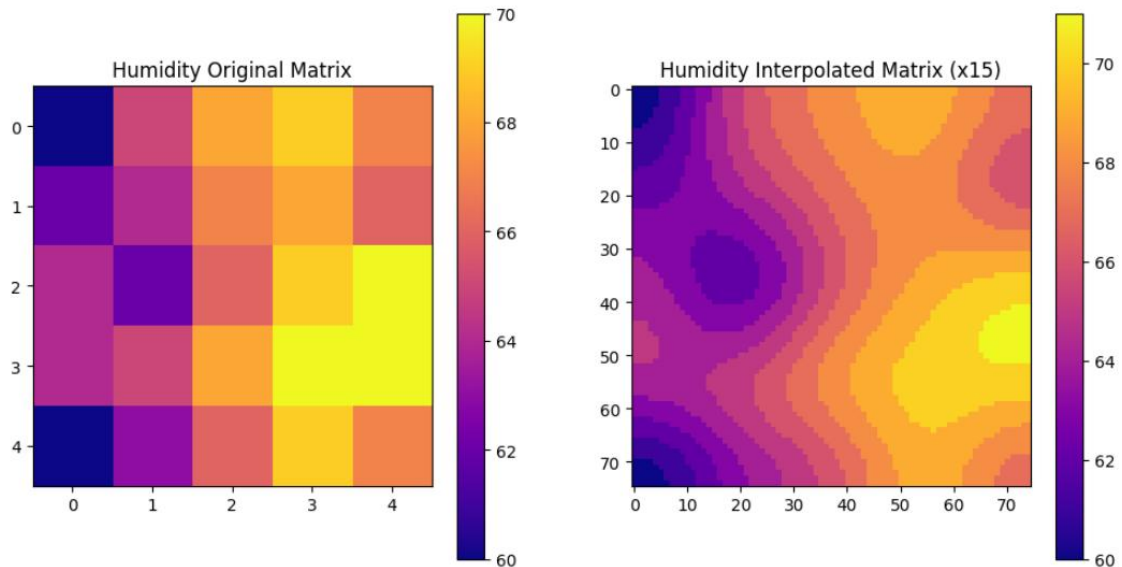


Figura 17. Matriz de humedad original e interpolada.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## 5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

---

Se cumple el objetivo general al desarrollar una plataforma robótica móvil capaz de desplazarse de manera autónoma en terrenos irregulares y adquirir variables agroclimáticas en tiempo real, las cuales son enviadas a una plataforma IoT. El sistema demuestra ser funcional al integrar los módulos UWB, adquisición de variables ambientales relevantes (CO<sub>2</sub> y humedad) y representación espacial a través de interpolaciones en *heatmaps*. Como fortaleza principal, destaca la precisión alcanzada en la localización en trayectorias 2 y 4, y la visualización efectiva de las variables climáticas mediante matrices interpoladas. Sin embargo, se identifican limitaciones puntuales en la precisión del posicionamiento (trayectoria 3) y en la cobertura espacial del muestreo, lo cual puede ser mejorado mediante una mayor densidad de puntos de medición y optimización del sistema de anclaje.

- El sistema diseñado cumple con la capacidad de desplazarse autónomamente sobre superficies irregulares y recolectar variables agroambientales, gracias a su arquitectura modular, bajo peso y sistema de navegación integrado con módulos UWB. Las pruebas en laboratorio y en condiciones simuladas de invernadero validan su operatividad y robustez estructural.
- La planeación de trayectorias desarrollada permite al robot recorrer rutas cuadradas de forma eficiente, retornando al punto de origen con errores mínimos en trayectorias 2 y 4 (menos del 5%). Sin embargo, en ciertos puntos (ej. trayectoria 3, coordenada 0.6, 0.6), se detectan errores superiores al 25%, lo que indica la necesidad de mejorar la calibración de las anclas.
- La integración de comunicación en tiempo real con *Firebase* como plataforma IoT ha sido exitosa. La publicación constante y estructurada de los datos obtenidos garantiza su disponibilidad para monitoreo remoto. Esto representa una solución efectiva para la gestión de cultivos en invernaderos, contribuyendo a la toma de decisiones en función de condiciones ambientales reales.
- Se logró evaluar la precisión del sistema de navegación mediante la comparación entre mediciones reales y estimadas, reflejadas en la Tabla 1, Las trayectorias 2 y 4 mostraron el mejor desempeño, mientras que la trayectoria 3 evidenció desviaciones significativas. Este análisis permitió identificar puntos críticos donde el sistema presenta mayor margen de error y dónde se requiere ajuste.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

**Recomendaciones:**

- Actualmente, el sistema registra variables como humedad relativa y concentración de CO<sub>2</sub>, sin embargo, variables fundamentales como temperatura, presión atmosférica, luminosidad, no han sido integradas en esta fase del proyecto. Se recomienda ampliar la red de sensores incorporando sensores adicionales que permitan caracterizar de manera más completa el ambiente dentro del invernadero. Por ejemplo, el monitoreo de temperatura y radiación solar es clave para la gestión térmica y fotosíntesis del cultivo, mientras que la presión atmosférica puede ayudar a anticipar cambios climáticos internos.
- La precisión espacial de los mapas generados depende directamente de la cantidad y distribución de los puntos de medición. Se recomienda incrementar la densidad de muestreo durante el recorrido, especialmente en zonas periféricas o de interés agrícola, como áreas cercanas a sistemas de riego o ventilación. Esto permitiría mejorar la resolución y confiabilidad de los mapas de calor generados, ofreciendo una visión más detallada del microclima del invernadero.
- Se detectaron errores de posicionamiento significativos en ciertos puntos del recorrido (por ejemplo, trayectoria 3 en la coordenada 0.6, 0.6). Estos errores pueden deberse a interferencias electromagnéticas u obstrucciones físicas. Por tanto, se recomienda optimizar la ubicación de las anclas UWB, asegurando líneas de visión claras entre emisor y receptor, y reevaluar la configuración geométrica de las mismas. Adicionalmente, implementar técnicas de fusión sensorial (como el uso combinado de UWB con *encoders*) podría mejorar la precisión global del sistema de posicionamiento, especialmente en zonas de baja cobertura.
- *Firebase* ha demostrado ser una herramienta eficaz para el almacenamiento en tiempo real de datos. Se recomienda complementar la arquitectura IoT con una plataforma que permita el análisis de series temporales, visualización avanzada y modelado de datos (como *ThingSpeak*, Grafana con InfluxDB, o Google Cloud Platform con BigQuery). Esta evolución permitiría no solo observar el estado actual del cultivo, sino también generar alertas automáticas ante valores críticos, identificar patrones de comportamiento y proyectar condiciones futuras mediante algoritmos de aprendizaje automático.
- Se recomienda desarrollar una interfaz gráfica amigable, accesible desde cualquier dispositivo móvil o computador, donde se presenten los valores de las variables en tiempo real, alertas y recomendaciones. Esta interfaz facilitaría la adopción del sistema por parte de agricultores, técnicos y administradores agrícolas que no cuenten con experiencia previa en plataformas digitales.

 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

**Trabajo futuro:**

- Una evolución natural del sistema es pasar del monitoreo pasivo a la intervención activa mediante el control automático de condiciones ambientales. Para ello, se propone integrar actuadores como válvulas de riego, extractores de aire, ventiladores o toldos motorizados, controlados en función de los datos obtenidos por los sensores. Esta integración cerraría el ciclo de automatización, permitiendo no solo detectar situaciones críticas, sino también responder a ellas en tiempo real sin intervención humana. Por ejemplo, si se detecta una caída abrupta de humedad o una alta concentración de CO<sub>2</sub>, el sistema podría activar automáticamente un sistema de nebulización o ventilación.
- Implementar técnicas de inteligencia artificial para predicción de condiciones agroclimáticas basadas en los datos recogidos. Una vez se disponga de un volumen considerable de datos sensoriales históricos, será posible entrenar modelos de inteligencia artificial (como redes neuronales o árboles de decisión) que permitan predecir variables ambientales y anticipar eventos de riesgo como estrés hídrico, proliferación de hongos o acumulación de gases. Estos modelos podrían integrarse en la plataforma IoT y emplearse como herramienta de apoyo para la toma de decisiones agrícolas más precisas y oportunas.
- Actualmente, el sistema sigue trayectorias fijas y predefinidas, lo cual es útil en entornos controlados. Sin embargo, para aplicaciones más complejas, se plantea como línea futura desarrollar navegación adaptativa basada en mapeo dinámico del entorno. Esto implica dotar al robot de sensores adicionales (como LIDAR, cámaras o sonar) e integrar algoritmos SLAM (Simultaneous Localization and Mapping), permitiendo al sistema reconocer y adaptarse a obstáculos, cambios en la topografía del terreno o alteraciones en la disposición del cultivo. Esta autonomía sería clave en escenarios agrícolas reales, donde la distribución de plantas, herramientas o personas es variable.
- Una sola unidad móvil puede tener limitaciones en términos de área cubierta y frecuencia de muestreo. Por ello, se propone como trabajo futuro escalar la solución a través de una red de robots cooperativos que se comuniquen entre sí y trabajen de forma sincronizada. Este enfoque permitiría cubrir superficies más extensas en menor tiempo y realizar tareas distribuidas como monitoreo, intervención localizada o transporte de insumos. Se requerirá el desarrollo de protocolos de cooperación, asignación de tareas y prevención de colisiones, así como un sistema centralizado.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## REFERENCIAS

- ABACO. (n.d.). *Reducir el desperdicio de alimentos, es una oportunidad para acabar con el hambre*.  
<https://abaco.org.co/reagro/>
- Aktaş, B., & Endes, A. (2025). Reaction of Bread Wheat Cultivars to Black Point and Its Inheritance in Segregating F4 and F5 Progenies. *Journal of Crop Health*, 77(1), 43.  
<https://doi.org/10.1007/s10343-024-01105-5>
- Antón, J., Cattaneo, A., Kimura, S., & Lankoski, J. (2013). Agricultural risk management policies under climate uncertainty. *Global Environmental Change*, 23(6), 1726–1736.  
<https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2013.08.007>
- Becerra Mora, Y. A., & Soto Gaona, S. (2019). Actualidad en el agro colombiano y aprovechamiento de los recursos visto desde la robótica. *#ashtag*, 13, 77–88.  
<https://doi.org/10.52143/2346139X.624>
- Bonilla Segovia, J. S., Dávila Rojas, F. A., & Villa Quishpe, M. W. (2021). Estudio del uso de técnicas de inteligencia artificial aplicadas para análisis de suelos para el sector agrícola. *RECIMUNDO*, 5(1), 4–19. [https://doi.org/10.26820/recimundo/5.\(1\).enero.2021.4-19](https://doi.org/10.26820/recimundo/5.(1).enero.2021.4-19)
- Correia, C. D. N., Amraoui, M., & Santos, J. A. (2024). Analysis of the Impacts of Climate Change on Agriculture in Angola: Systematic Literature Review. *Agronomy*, 14(4), 783.  
<https://doi.org/10.3390/agronomy14040783>
- da Silva, T. J. A., Bonfim-Silva, E. M., Pacheco, A. B., Duarte, T. F., Sousa, H. H. de F., & José, J. V. (2018). Evaluation of Various Soil Moisture Sensors in Four Different Soil Types. *Applied Engineering in Agriculture*, 34(6), 963–971. <https://doi.org/10.13031/aea.12712>
- DANE. (2022). *Boletín Estadístico Sectorial Agropecuario 2022*. 1–96.
- FAO. (2021). El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2021. In *El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2021*. FAO. <https://doi.org/10.4060/cb4476es>
- Hernández, N., Soto, F., & Caballero, A. (2009). Modelos de simulación de cultivos: Características y usos. In *Cultivos Tropicales* (Vol. 30, p. 0). scielocu.
- Herrero, M., Thornton, P. K., Power, B., Bogard, J. R., Remans, R., Fritz, S., Gerber, J. S., Nelson, G., See, L., Waha, K., Watson, R. A., West, P. C., Samberg, L. H., van de Steeg, J., Stephenson, E., van Wijk, M., & Havlík, P. (2017). Farming and the geography of nutrient production for human use: a transdisciplinary analysis. *The Lancet Planetary Health*, 1(1), e33–e42.  
[https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(17\)30007-4](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(17)30007-4)
- Juan Carlos, A. D., Estrada, L. R., Cesar Augusto, C.-R., Paola Patricia, A.-C., Marlon Alberto, P.-M., Ramón Enrique, R. G., Roberto César, M.-O., David Alfredo, O.-G., & Carlos Andrés, C.-M. (2020). Monitoring system of environmental variables for a strawberry crop using IoT tools. *Procedia Computer Science*, 170, 1083–1089. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.03.067>
- Lytridis, C., Kaburlasos, V. G., Pachidis, T., Manios, M., Vrochidou, E., Kalampokas, T., & Chatzistamatis, S. (2021). An Overview of Cooperative Robotics in Agriculture. *Agronomy*, 11(9), 1818. <https://doi.org/10.3390/agronomy11091818>
- Mamani, M., Villalobos, M., & Herrera, R. (2017). Sistema web de bajo costo para monitorear y controlar un invernadero agrícola. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 25(4), 599–618.  
<https://doi.org/10.4067/S0718-33052017000400599>
- Maraveas, C., Karavas, C. S., Loukatos, D., Bartzanas, T., Arvanitis, K. G., & Symeonaki, E. (2023). Agricultural Greenhouses: Resource Management Technologies and Perspectives for Zero Greenhouse Gas Emissions. *Agriculture (Switzerland)*, 13(7), 1–46.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- <https://doi.org/10.3390/agriculture13071464>
- Muhie, S. H. (2022). Novel approaches and practices to sustainable agriculture. *Journal of Agriculture and Food Research*, 10, 100446. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100446>
- Naciones Unidas. (n.d.). *Objetivo 2: Poner fin al hambre*.  
<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/hunger/>
- Pelka, M. (2015). *Position Calculation with Least Squares based on Distance Measurements*. 2.
- Perez-Mena, A., Fernández-Zepeda, J. A., Rivera-Caicedo, J. P., & Avila-George, H. (2019). Una aplicación móvil para el monitoreo de cultivos: caso de estudio campaña contra el pulgón amarillo del sorgo. *RISTI - Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologías de Informação*, 31, 118–133. <https://doi.org/10.17013/risti.31.118-133>
- Prescott, C. E., Grayston, S. J., Helmisaari, H.-S., Kaštovská, E., Körner, C., Lambers, H., Meier, I. C., Millard, P., & Ostonen, I. (2020). Surplus Carbon Drives Allocation and Plant–Soil Interactions. *Trends in Ecology & Evolution*, 35(12), 1110–1118. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2020.08.007>
- Sanyal, D., Heun, J., Stackpole, C., & Andrade-Sanchez, P. (2023). *Evaluating an in-situ, Low-Cost Soil CO<sub>2</sub> Sensor as a Soil Health Assessment Tool in Agricultural Soils*. January, 2. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.32595.39208>
- Soto Barreneche, H. D., Atehortua Morales, R. M., & Borja Castillo, W. L. (2022). *ANÁLISIS DE COYUNTURA DE LAS EVALUACIONES AGROPECUARIAS DEPARTAMENTO DE ANTIOQUIA AÑO 2022*. 9, 356–363.
- Timofeev, V. N. (2025). Additional growth substances on spring wheat under conditions of moisture deficiency. *BIO Web of Conferences*, 160, 01018. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202516001018>
- UPRA, U. de P. R. A. (n.d.). *Las zonas rurales cuentan con 4,8 millones de personas ocupadas en marzo de 2023*. <https://upra.gov.co/es-co/saladeprensa/Paginas/Las-zonas-rurales-cuentan-con-4,8-millones-de-personas-ocupadas-en-marzo-de-2023.aspx>
- Waqar, A., Ahmad, I., Habibi, D., & Phung, Q. V. (2021). Analysis of GPS and UWB positioning system for athlete tracking. *Measurement: Sensors*, 14(June 2020), 100036. <https://doi.org/10.1016/j.measen.2020.100036>
- Weil, R. R., & Brady, N. C. (2016). *The Nature and Properties of Soil* (Issue May).
- Xiao, G. (2021). Intelligent Internet of Things Technology in Agricultural Environment Monitoring. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 769(2), 022042. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/769/2/022042>

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Lucas Hernández

FIRMA ESTUDIANTES

Mateo Mejía H

FIRMA ASESOR

---

FECHA ENTREGA: 27/05/2025

FIRMA COMITÉ TRABAJO DE GRADO DE LA FACULTAD \_\_\_\_\_

RECHAZADO\_\_\_      ACEPTADO\_\_\_      ACEPTADO CON MODIFICACIONES\_\_\_

ACTA NO. \_\_\_\_\_

FECHA ENTREGA: \_\_\_\_\_

FIRMA CONSEJO DE FACULTAD \_\_\_\_\_

ACTA NO. \_\_\_\_\_

FECHA ENTREGA: \_\_\_\_\_