

Jornadas de Automática

Evaluación del rendimiento de la localización UWB bajo el impacto de plantas en invernaderos Mediterráneos

Fernando Cañadas-Aránega^{a,*}, José F. Maqueda^a, José C. Moreno^a

^aUniversidad de Almería, Centro Mixto CIESOL, ceia3, Ctra.Sacramento s/n, 04120, Almería, España

To cite this article: Cañadas-Aránega, F, Maqueda, J.F., Moreno, J.C. 2026. Evaluation of UWB positioning performance under the influence of plants in Mediterranean greenhouses. Jornadas de Automática, 47. <https://doi.org/10.17979/ja-cea.2026.47.13813>

Resumen

Este estudio analiza el efecto de las plantas en la comunicación y la precisión de un sistema de posicionamiento en interiores (IPS) basado en ultrasonidos y banda ultraancho (UWB), utilizando un número reducido de 4 balizas. Se comparó un entorno de laboratorio sin obstáculos con un invernadero mediterráneo con alta densidad de vegetación, manteniendo una configuración nominal en ambos escenarios. En el laboratorio se obtuvo un error medio de entre 0.12 m y 0.18 m (RMSE entre 0.36 m y 0.45 m), mientras que, en el invernadero, la masa foliar y las hileras generaron condiciones de pérdida y atenuación graves de la señal. La interferencia física del follaje degradó de forma crítica la precisión, elevando el error medio a un rango de entre 0.33 m y 0.42 m (RMSE entre 0.50 m y 0.59 m). Los resultados cuantifican el impacto negativo de la arquitectura vegetal en la telemetría, proporcionando datos clave para el uso de esta tecnología en invernaderos mediterráneos.

Palabras clave: Robótica en Agricultura, Robótica Móvil, Sistema de posicionamiento interior, Localización en agricultura

Evaluation of UWB positioning performance under the influence of plants in Mediterranean greenhouses

Abstract

This study analyzes the effect of plants on the communication and accuracy of an Indoor Positioning System (IPS) based on ultrasound and ultra-wideband (UWB) using a reduced number of 4 beacons. An obstacle-free laboratory environment was compared against a Mediterranean greenhouse with high vegetation density, maintaining a nominal configuration in both scenarios. In the laboratory, a mean error between 0.12 m and 0.18 m (RMSE between 0.36 m and 0.45 m) was achieved, whereas, in the greenhouse, the foliar mass and rows generated severe signal loss and attenuation conditions. The physical interference of the foliage critically degraded accuracy, elevating the mean error to a range of 0.33 m to 0.42 m (RMSE between 0.50 m and 0.59 m). The results quantify the negative impact of plant architecture on telemetry, providing key data for the use of this technology in Mediterranean greenhouses.

Keywords: Robotics in Agriculture, Mobile Robotics, Indoor positioning system, Agriculture localization

1. Introducción

En los últimos años, el cultivo bajo cubierta en el mediterráneo se ha erigido como un pilar indispensable para asegurar el suministro alimentario mediante una gestión estrictamente eficiente de los recursos hídricos y energéticos del planeta (Kim et al., 2025). Con el propósito de sostener la com-

petitividad de este modelo de producción intensiva, el sector está apostando fuertemente por la transición hacia la digitalización y la automatización, incluyendo robots terrestres, drones, etc en los invernaderos (Hernández et al., 2025; Cañadas-Aránega et al., 2026b). No obstante, el despliegue efectivo de estas plataformas autónomas se enfrenta a severos obstáculos operativos derivados de la propia arquitectura agrícola, la cual

*Autor para correspondencia: fernando.ca@ual.es

disto notablemente de las condiciones diáfanas y predecibles de los entornos industriales convencionales (Cañadas-Aránega et al., 2026c). El factor crítico para garantizar un guiado seguro y autónomo radica en la fiabilidad y robustez del sistema de estimación de la posición del vehículo. Debido a la necesidad imperativa de maximizar el suelo cultivable, los invernaderos mediterráneos presentan una configuración de pasillos sumamente angostos, lo que exige márgenes de precisión centimétrica en la localización para evitar colisiones con las plantas o la infraestructura portante (Cañadas-Aránega et al., 2024a; Cañadas-Aránega et al., 2026a). A esta restricción espacial se suma la complejidad de un entorno vegetal dinámico que interfiere críticamente en la propagación de ondas electromagnéticas: el crecimiento continuo del dosel del cultivo bloquea los canales de comunicación inalámbrica, sustituyendo la línea de visión directa por escenarios de severa atenuación y multirayectoria. Como consecuencia, las tecnologías de posicionamiento tradicionales experimentan una drástica degradación en su rendimiento ante el aumento de la masa vegetal, lo que compromete la viabilidad de la navegación en tiempo real (Czerwiński et al., 2023).

En ese contexto, el uso de la tecnología de banda ultranancha (UWB) ha cobrado un gran protagonismo en la agricultura de precisión debido a su alta resolución temporal y su robustez intrínseca frente a los efectos de multirayectoria, superando las limitaciones de precisión de los sistemas basados en ZigBee o Bluetooth (Xie and Zhang, 2025). En la literatura reciente, diversos autores han analizado la viabilidad de los sistemas UWB para la localización de maquinaria y plataformas autónomas en escenarios biofísicos complejos. Por ejemplo, en aplicaciones de frutales a campo abierto, se ha evidenciado que la densidad de los troncos y el dosel arbóreo introducen errores métricos severos, lo que ha obligado a los investigadores a recurrir a la fusión con sensores inerciales y odometría para mitigar las desviaciones (Jia et al., 2023). En el ámbito específico de la agricultura protegida, las investigaciones se han orientado predominantemente hacia el despliegue de redes fijas de balizas para guiar sistemas de pulverización en invernaderos de baja densidad foliar (Pham and Lin, 2025). Sin embargo, cuando se introducen cultivos intensivos de gran volumen vegetal, el solapamiento de las hojas actúa como un medio altamente atenuador y dispersivo para las ondas de radiofrecuencia, transformando el canal en un escenario de no línea de visión (Ma et al., 2024). Aunque existen propuestas de vanguardia enfocadas en el desarrollo de filtros avanzados, como variantes del filtro de Kalman o algoritmos de aprendizaje profundo para compensar el sesgo de la señal (Gao et al., 2026; Zhang et al., 2025), la mayoría de estos trabajos se centran en la corrección matemática sobre entornos simulados o cultivos de baja densidad. Persiste, por tanto, una falta de estudios empíricos que aislen y cuantifiquen experimentalmente el impacto directo de la densidad foliar sobre el rendimiento de la localización en invernaderos mediterráneos, contrastando el comportamiento base de un laboratorio con la hostilidad geométrica y ambiental de un invernadero mediterráneo real.

El presente trabajo propone una evaluación experimental exhaustiva del rendimiento de la localización UWB bajo el impacto directo de las plantas en invernaderos mediterráneos usando 4 balizas fijas, buscando obtener resultados con un despliegue de bajo coste, conociendo que, a mayor número

de balizas, el error se reduce (Guo et al., 2022). El objetivo principal radica en cuantificar y contrastar empíricamente las diferencias en la precisión del posicionamiento al trasladar el sistema desde el laboratorio hasta un escenario agrícola real con alta densidad vegetativa. A través de estos ensayos, mediante métricas de error se analizan los límites operativos de la tecnología inalámbrica frente a la atenuación e interferencias impuestas por el follaje del cultivo. De este modo, los datos y conclusiones obtenidos en este estudio no solo caracterizan el comportamiento físico de la señal en entornos agrícolas complejos, sino que además sientan las bases experimentales indispensables para la futura integración y despliegue seguro de plataformas robóticas móviles autónomas en la agricultura protegida.

El resto del artículo se estructura de la siguiente manera. La sección 2 muestra los materiales y métodos utilizados en este estudio. La sección 3 presenta la configuración experimental que se siguió en los ensayos. La sección 4 analiza los experimentos realizados. Por último, la sección 5 se dedica a presentar las conclusiones del trabajo.

2. Materiales y métodos

En esta sección se describen los principales materiales y métodos utilizados en este experimento

2.1. Materiales

Los experimentos se realizaron utilizando el Sistema de Posicionamiento Interior (del inglés *Interior Positioning System* (IPS)) desarrollado por Marvelmind Robotics®. Este sistema proporciona una arquitectura de localización precisa basada en una red de balizas fijas y móviles que combinan telemetría por ultrasonidos e impulsos UWB para estimar coordenadas tridimensionales con precisión centimétrica en entornos donde los sistemas GNSS globales no tienen cobertura. El hardware utilizado se detalla a continuación.

■ UWB Super-Modem

Este equipo opera como el nodo maestro e interruptor central de la arquitectura IPS, controlando el esquema de acceso múltiple por división de tiempo de la red. Además de coordinar los instantes de emisión de las balizas, el módem unifica los datos de posicionamiento crudos en tiempo real y gestiona las bandas de radiofrecuencia para mitigar las interferencias en el entorno del ensayo.

■ Beacon Industrial-RX

Como nodos fijos de infraestructura, se emplearon cuatro unidades Beacon Industrial-RX. Estos dispositivos están diseñados específicamente para entornos industriales, contando con una carcasa robusta y transductores ultrasónicos de alta ganancia. Su función principal consiste en recibir los pulsos acústicos y las señales de radiofrecuencia complementarias, sirviendo como los puntos de referencia espacial estáticos cuyas coordenadas cartesianas previas delimitan el volumen de trabajo del invernadero.

■ Mobile Super-Beacon (tag)

El seguimiento del vector de movimiento se acopló al elemento móvil mediante una unidad Mobile Super-Beacon (configurada como *tag* o etiqueta móvil). Este dispositivo cuenta con una matriz de sensores ultrasónicos integrados y una Unidad de Medición Inercial (IMU) interna de bajo coste. El *tag* emite de forma iterativa señales ultrasónicas hacia las balizas fijas para que el sistema calcule el tiempo de vuelo o *Time of Flight* (ToF), de la onda acústica, lo que permite deducir la posición instantánea del objeto en los tres ejes cartesianos (X, Y, Z).

2.2. Métodos

Para la adquisición y almacenamiento automatizado de los flujos de datos en tiempo real, se integró la API nativa de Marvelmind. Esta interfaz de software se comunicó directamente con el UWB Super-Modem a través de un enlace serie virtual por USB. El software desarrollado proporciona las funciones del paquete de la API para decodificar las tramas del *stream* de datos, aislando de forma síncrona el identificador de carga útil asociado a la posición tridimensional en tiempo real, facilitando así el almacenamiento estructurado de las coordenadas, marcas de tiempo físicas (*timestamps*) y métricas de calidad de la señal para su posterior análisis estadístico.

En cuanto a la triangulación de este sistema de balizas, se mide, de forma síncrona, el ToF de las ondas desde que son emitidas por el transmisor hasta que llegan al receptor. Conociendo la velocidad de propagación de la onda, la distancia (d) se calcula mediante la fórmula estándar

$$d = v \times \text{ToF}. \quad (1)$$

En este sistema, la tecnología UWB se utiliza principalmente para la sincronización horaria absoluta e informa a todas las balizas del microsegundo exacto en el que se ha lanzado el pulso acústico.

3. Configuración Experimental

Para realizar una comprobación correcta, el sistema se configuró de manera similar tanto en el laboratorio como en el invernadero, con el objetivo de contar con una comparativa equitativa. En esta sección, se describe dicha configuración.

Cabe destacar que el diseño experimental se estructuró a partir de un único ensayo exhaustivo por entorno (laboratorio e invernadero). Esta aproximación se considera metodológicamente suficiente y robusta para los objetivos del presente estudio, dado que el volumen acumulado de registros garantiza una representatividad estadística sólida para caracterizar el comportamiento del sistema. Al tratarse de una evaluación orientada a cuantificar el impacto físico de la densidad foliar en la propagación de la señal, la replicación temporal de los ensayos no aportaría variabilidad significativa a los fenómenos de occlusión y trayectoria múltiple estudiados, validando la suficiencia de la muestra obtenida.

3.1. Entornos de Ensayo

Se definen los entornos en los que se realizaron los ensayos.

3.1.1. Laboratorio

Los ensayos en laboratorio se realizaron en las instalaciones del grupo de Automática, Robótica y Mecatrónica (ARM) de la Universidad de Almería. Este espacio se define como un entorno cerrado y totalmente controlado de 256 m², libre de corrientes de aire significativas y perturbaciones externas. La ausencia de obstáculos físicos y superficies altamente reflectantes garantizó condiciones óptimas de línea de visión directa y un nivel mínimo de ruido acústico o electromagnético, sirviendo como escenario de referencia ideal para determinar la precisión nominal y el error umbral del instrumental sin interferencias externas.

Para la configuración de la arquitectura, se considera como Sistema de Referencia (SR) base el asociado a una de las balizas, nombrada como baliza número 1. Las coordenadas de todas las balizas vendrán referidas respecto a este SR mediante $\mathbf{x}_{L_i} = (x_{L_i}, y_{L_i})$ con $i \in \{1, 2, 3, 4\}$ y $\mathbf{x}_{L_1} = (0, 0)$. Las balizas 1 y 4 están colocadas a 1.6 m de altura, mientras que las balizas 2 y 3 están a 1.5 m, formando un cuadrilátero y delimitando así el espacio de trabajo. En la Fig. 1 se muestra la distribución 2D espacial de los nodos fijos en la interfaz de la API de Marvelmind.

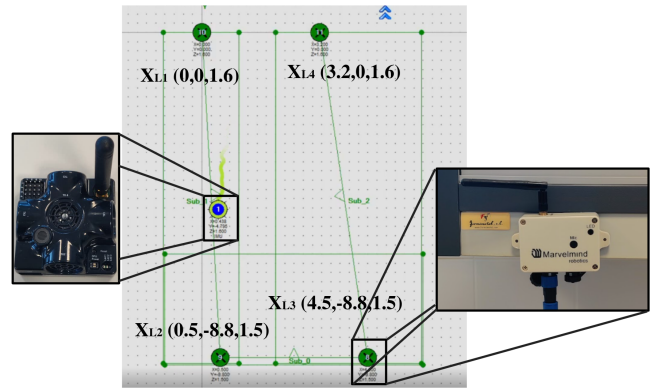


Figura 1: Distribución espacial de las balizas en el laboratorio en la API

Una vez consolidada la infraestructura, se procedió a definir la trayectoria experimental programada. Es importante resaltar que las balizas tienen un rango mínimo de medida de 0.3 m, por lo que el *tag* nunca llegará a acercarse físicamente. A una altura constante de 1.5 m, se inicia un recorrido desde la posición inicial $\mathbf{p}_{L_1} = (0.4, -2.0)$ m y describe un desplazamiento lineal ortogonal hasta el punto $\mathbf{p}_{L_2} = (0.6, -7.4)$. A continuación, se mueve hacia el punto $\mathbf{p}_{L_3} = (4.2, -7.4)$, y concluye el ensayo con una última trayectoria rectilínea ortogonal hacia el punto de destino $\mathbf{p}_{L_4} = (3.4, -2.4)$. Esta prueba se repite en 3 ocasiones para obtener los posibles errores de incertidumbre.

3.1.2. Invernadero AgroConnect

La fase de validación empírica en condiciones operacionales reales se trasladó al invernadero AgroConnect (Almería, España) presentado en (Cañadas-Aránega et al., 2024b). Este invernadero de estilo mediterráneo tiene una superficie de 1850 m², pertenece a la tipología "raspa y amagado" (también denominado tipo Almería), cuenta con una robusta estructura de acero y un revestimiento de polietileno de alta densidad.

Topológicamente, la instalación tiene un pasillo central de 2 m de ancho, del cual se separan once pasillos laterales a cada lado; los pasillos del norte miden 14.5 m de longitud, mientras que los del sur se extienden hasta los 22.5 m, ambos con una anchura limitada a 2 m sin tener en cuenta las plantas. El experimento se llevó a cabo únicamente entre dos pasillos contiguos del lado norte (Fig. 2) debido al número de balizas utilizadas.



Figura 2: Invernadero AgroConnect

De forma similar a la configuración en laboratorio, las balizas se colocaron a 2 m de altura respecto al suelo, una de ellas se estableció como origen y el resto se referenciaron respecto a ella formando un cuadrilátero.

Concretamente la distribución se configuró de la siguiente manera: el nodo $\mathbf{x}_{I_1}$ se ubicó en el pasillo central con orientación hacia el primer pasillo de evaluación (sur); la baliza $\mathbf{x}_{I_2}$ se emplazó en el extremo opuesto de dicho pasillo, garantizando condiciones de línea de visión directa con $\mathbf{x}_{I_1}$; el tercer nodo, $\mathbf{x}_{I_3}$, se situó a una distancia de 3.3 m en X respecto a $\mathbf{x}_{I_1}$ a lo largo del pasillo central; finalmente, la baliza $\mathbf{x}_{I_4}$ se localizó al término del pasillo contiguo en el campo de visión con $\mathbf{x}_{I_3}$. Las balizas $\mathbf{x}_{I_1}$ y $\mathbf{x}_{I_4}$ se colocan a 1.8 m, mientras que las balizas $\mathbf{x}_{I_2}$ y $\mathbf{x}_{I_3}$ se colocan a 1.15 m. En la Fig. 3 se ilustra la configuración espacial y la topología de la red descrita.

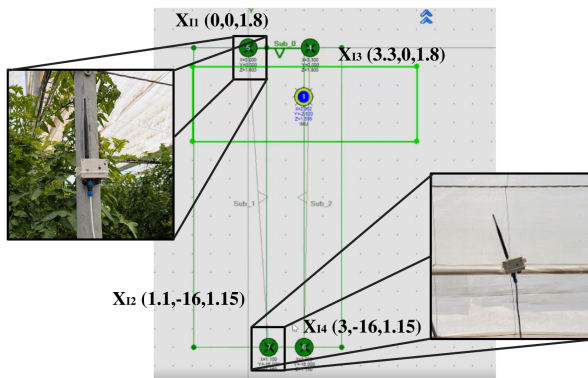


Figura 3: Distribución espacial de las balizas en el invernadero en la API

En este ensayo, y a una altura fija de 1.5 m, el *tag* inicia la trayectoria en la posición de referencia $\mathbf{p}_{I_1} = (0.6, -1.0)$ y describe un desplazamiento lineal ortogonal en dirección al nodo $\mathbf{p}_{I_2} = (1.30, -14.0)$. Posteriormente, efectúa un recorrido de retorno hacia el punto de origen $\mathbf{p}_{I_1}$ y se mueve linealmente

hacia $\mathbf{p}_{I_3} = (3.3, -1.0)$. Desde la posición $\mathbf{p}_{I_3}$, el dispositivo avanza rectilíneamente hasta el punto $\mathbf{p}_{I_4} = (3.0, -15.0)$ y, tras alcanzarlo, recorre el trayecto inverso hasta el nodo $\mathbf{p}_{I_3}$, concluyendo el experimento.

3.2. Metodología de Captura de Datos

La tasa de actualización de la localización (*Location update rate*) se fijó en 4 Hz para el laboratorio y se elevó a 6 Hz en el invernadero, con el objetivo de registrar una mayor cantidad de datos debido a contar con recorridos más extensos. También se habilitó el modo de alta resolución (*High resolution mode*), permitiendo obtener precisiones métricas en el orden milimétrico. El enlace de comunicación inalámbrico operó bajo una frecuencia de radio base de 919.000 MHz estructurada en una topología de red compuesta por 3 submapas lógicos para la gestión de la trilateración acústica.

La captura de los datos se realizó de forma automatizada mediante la conexión serie del módem central a una ordenador portátil. El flujo de telemetría (*data streaming*) se decodificó en tiempo real mediante el protocolo binario nativo de Marvelmind, a través del mensaje identificador de posición (código 129). Cada registro síncrono capturado incluyó un vector espacial con las coordenadas cartesianas tridimensionales ($\mathbf{x} = [x, y, z]^T$, expresadas en metros), y la sincronización temporal global del sistema se garantizó mediante la inclusión de marcas de tiempo físicas *timestamps* en milisegundos, provistas por el reloj maestro del módem, lo que permitió la posterior discretización y el análisis estadístico de las trayectorias de ensayo. Para este escenario, también se realizaron 3 ensayos de la trayectoria.

4. Resultados y discusión

En esta sección se describen los principales resultados de los ensayos y se realiza una discusión de los resultados.

4.1. Análisis de trayectorias

Como resultado, en las Figs. 4 y 5 se muestra la representación gráfica de las trayectorias que se realizaron (*Ground truth* (GT)) (como líneas rectas de color rojo) frente a las lecturas de *tag* (como puntos azules) en ambos escenarios. Para facilitar el análisis, los valores anómalos cuya desviación es mayor que 2 m se marcaron con aspas naranjas (aunque en estos ensayos específicos no se registró ninguna de estas anomalía), mientras que las posiciones fijas de las balizas se marcaron como círculos amarillos, junto a sus coordenadas.

En la Tabla 1 se presenta un resumen de la calidad de los datos obtenidos en ambos escenarios.

Tabla 1: Análisis cuantitativo de la calidad de los datos y registros de telemetría por ensayo.

Entorno / Ensayo	Muestras totales	Válidas N (%)	NaN N (%)	Outliers N (%)
Lab.				
Ens. 1	625	421 (67.4 %)	165 (26.4 %)	39 (6.2 %)
Ens. 2	762	584 (76.6 %)	118 (15.5 %)	60 (7.9 %)
Ens. 3	965	794 (82.3 %)	77 (8.0 %)	94 (9.7 %)
Invern.				
Ens. 1	958	523 (54.6 %)	232 (24.2 %)	203 (21.2 %)
Ens. 2	1114	684 (61.4 %)	156 (14.0 %)	274 (24.6 %)
Ens. 3	985	447 (45.4 %)	315 (32.0 %)	223 (22.6 %)

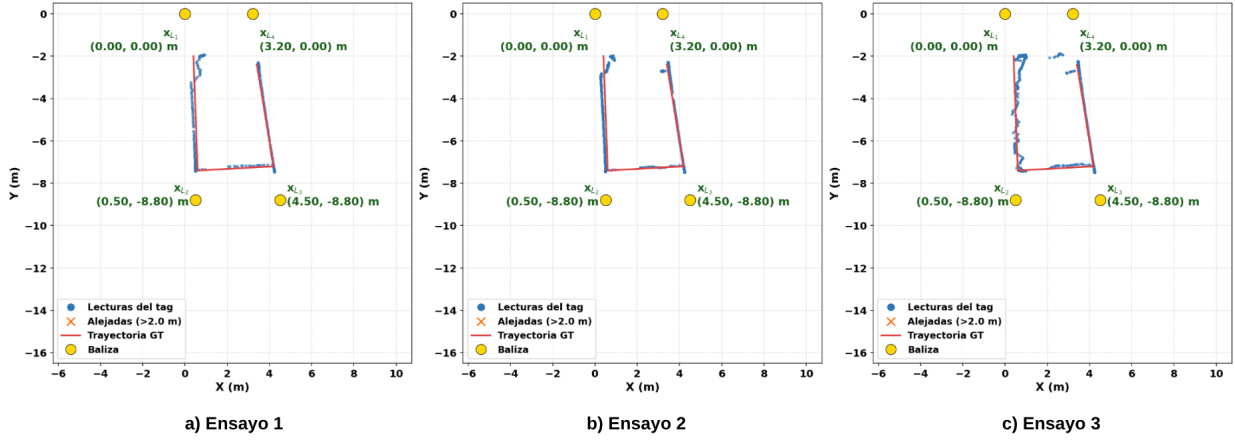


Figura 4: Experimentos en el laboratorio. Las líneas rectas de color rojo representan la trayectoria GT, las lecturas del *tag* como puntos azules, valores anómalos como aspas naranjas y la posición de las balizas como círculos amarillos, junto a sus coordenadas.

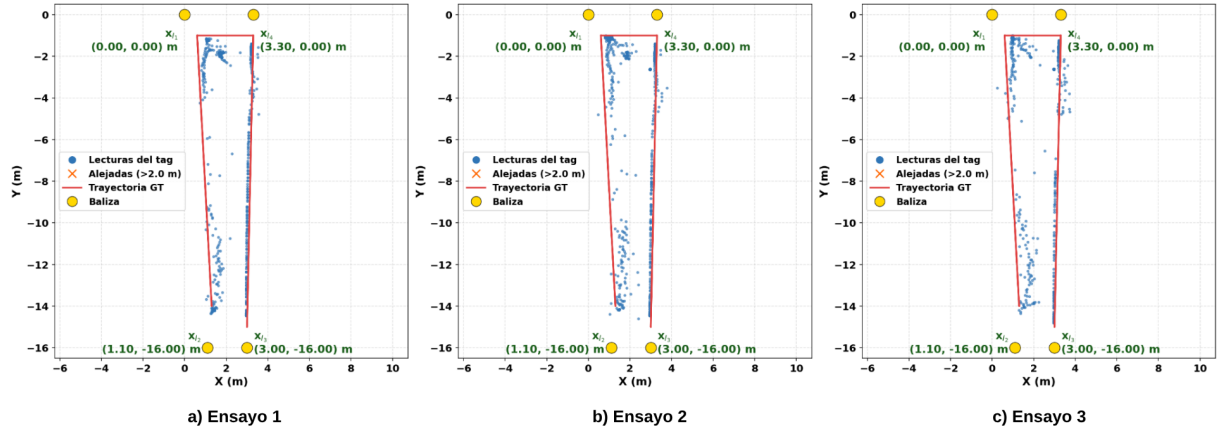


Figura 5: Experimentos en el invernadero. Las líneas rectas de color rojo representan la trayectoria GT, las lecturas del *tag* como puntos azules, valores anómalos como aspas naranjas y la posición de las balizas como círculos amarillos, junto a sus coordenadas.

En el laboratorio, el sistema registró un total de 2352 muestras en los 3 ensayos. De este total, el sistema obtuvo 1799 muestras válidas, lo que representa una tasa de éxito media del 75.4 % en la estimación de coordenadas. El resto de la telemetría se distribuyó entre un 15.3 % de valores nulos (360 NaN) derivados de pérdidas temporales de sincronización y un marginal 7.9 % de valores atípicos (193 outliers) generados por las comunicaciones. Esta tasa de éxito es característica de condiciones de propagación libres de obstáculos físicos significativos. Por el contrario, en el invernadero, las capturas reflejaron la severa interferencia de la masa vegetal sobre un total combinado de 3057 muestras telemétricas en los tres ensayos. Aunque el volumen de muestras válidas globales acumuló 1654 registros, la tasa de éxito media se contrajo notablemente hasta el 53.8 %. El impacto del cultivo se manifestó de forma crítica en la degradación de las señales: el sistema experimentó una pérdida masiva de paquetes intermitentes que se tradujo en un 23.4 % de valores nulos (703 NaN), además de un 22.8 % (700 outliers), triplicando la presencia de errores macroscópicos observada en el laboratorio.

4.2. Análisis cuantitativo del impacto de las plantas en UWB

La Tabla 2 muestra los resultados de un análisis cuantitativo de los datos obtenidos.

Tabla 2: Métricas estadísticas de error respecto al GT

Entorno / Ensayo	Medio (m)	Desv. típ. (m)	RMSE (m)	Máx. (m)	P50 (m)	P90 (m)
Lab.						
Ens. 1	0.12	0.31	0.36	1.41	0.11	0.38
Ens. 2	0.15	0.32	0.39	1.35	0.13	0.41
Ens. 3	0.18	0.34	0.45	1.38	0.16	0.56
Invern.						
Ens. 1	0.42	0.42	0.59	2.41	0.31	1.15
Ens. 2	0.36	0.38	0.53	2.34	0.34	0.99
Ens. 3	0.33	0.38	0.50	2.29	0.32	1.07

En el laboratorio, el sistema mostró un comportamiento preciso y predecible a lo largo de las tres réplicas experimentales. El error medio se mantuvo estrictamente acotado entre 0.12 m y 0.18 m, con un RMSE que osciló de forma controlada entre 0.36 m y 0.45 m. El indicador más revelador de este rendimiento óptimo es el Percentil 50 (P_{50}), el cual demues-

tra que la mitad de las lecturas válidas presentaron un error de apenas 0.11 m a 0.16 m (alrededor de los 11–16 cm). Este nivel de precisión es consistente con escenarios libres de obstáculos, en los que las ondas viajan de forma rectilínea y sin interferencias estructurales complejas.

Por el contrario, las métricas obtenidas en el invernadero reflejan una pérdida notable de precisión en el posicionamiento cinemático. El error medio experimentó un incremento significativo, situándose en un rango de 0.33 m a 0.42 m (llegando a triplicar los registros mínimos del laboratorio), mientras que el RMSE se elevó hasta valores entre 0.50 m y 0.59 m. Asimismo, el error máximo creció sustancialmente hasta alcanzar picos de desvío de hasta 2.41 m. Esta degradación de las métricas, sumada a una desviación típica persistente (entre 0.38 m y 0.42 m) y a un Percentil 90 (P_{90}) que llega a alcanzar los 1.15 m en el Ensayo 1, constituye un indicador matemático inequívoco de una distribución de error mucho más dispersa debido a la presencia de las plantas.

Este fenómeno cuantifica, de forma directa, el efecto disruptivo de la masa foliar y la morfología en filas del cultivo en invernaderos mediterráneos. La vegetación intercepta continuamente la trayectoria de las ondas, induciendo desvanecimientos por obstrucción física, absorción de la energía de la señal y, fundamentalmente, condiciones severas de falta de línea de visión. Estos factores ambientales no solo impiden que el algoritmo central resuelva las ecuaciones de trilateración en instantes críticos de la trayectoria, sino que introducen retardos temporales debido al rebote múltiple que el sistema procesa erróneamente como saltos espaciales repentinos u *outliers*.

5. Conclusiones y Trabajos Futuros

El sistema de posicionamiento interior basado en tecnología ultrasónica e infraestructura inalámbrica demostró ser una solución de rápido despliegue y alta viabilidad operativa para la localización en espacios cerrados. Los ensayos evidenciaron una notable robustez del hardware en términos de continuidad, manteniendo flujos de telemetría constantes y tasas de refresco efectivas reales que superaron la configuración nominal de 4 Hz y 6 Hz en distintos escenarios, lo que confirma la capacidad del dispositivo para procesar ráfagas masivas de datos redundantes a velocidad de marcha humana uniforme.

Sin embargo, el análisis cuantitativo reveló que las presencia de plantas y la densidad foliar del invernadero Mediterráneo actúan como un factor disruptivo crítico para la integridad y precisión de las comunicaciones. Mientras que en el entorno de laboratorio se obtuvo un 75.4 % de las muestras como válidas, con un error medio de 0.15 m y un error mediano de entre 11 y 16 cm, en el invernadero se observó una degradación estructural de la señal. En el invernadero, aproximadamente una cuarta parte de las muestras se perdieron como valores nulos (NaN) y los valores atípicos se triplicaron debido al bloqueo físico de la estructura y a la absorción de la energía de las ondas por la masa vegetal.

En consecuencia, se concluye que aunque el uso de un número reducido de balizas para la localización en entornos cerrados posee un potencial operativo para la digitalización agrícola, ya sea para su integración práctica en la navegación de vehículos autónomos o para el supervisión de operarios, está estrictamente condicionado al desarrollo de software

complementario. Por consiguiente, se deduce que la integración de una mayor densidad de balizas mitigaría estas desviaciones y elevaría la precisión en ambos escenarios, aunque a un coste operativo mayor.

Como trabajos futuros, se plantea evaluar la viabilidad técnico-económica de implementar un mayor número de balizas fijas en el invernadero. Si bien el incremento de la densidad de balizas permitiría mejorar la precisión y mitigar los errores provocados por las plantas, es importante analizar el compromiso entre la mejora de la precisión posicional y el coste financiero asociado.

Agradecimientos

El primer autor, Fernando Cañadas-Aránega, es beneficiario de una beca FPI (PRE2022-102415) del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades de España.

Referencias

- Cañadas-Aránega, F., Mañas-Álvarez, F. J., Moreno, J. C., Blanco-Claraco, J. L., et al., 2026a. A ros2 benchmarking framework for hierarchical control strategies in mobile robots for mediterranean greenhouses. arXiv preprint arXiv:2602.15162.
- Cañadas-Aránega, F., Moreno, J. C., Blanco-Claraco, J. L., 2026b. Greensseg: Ground segmentation algorithm for agricultural robots in mediterranean greenhouses using rgb-d point clouds. arXiv preprint arXiv:2605.25279.
- Cañadas-Aránega, F., Wollherr, D., Guzmán, J. L., Moreno, J. C., Blanco, J. L., August 22-28 2026c. An adaptive control architecture for slope and terrain compensation in autonomous navigation in mediterranean greenhouses. In: Proceedings of the 23rd IFAC World Congress. Busan, South Korea, accepted for publication.
- Cañadas-Aránega, F., Blanco-Claraco, J. L., Moreno, J. C., Rodríguez-Díaz, F., 2024a. Multimodal mobile robotic dataset for a typical mediterranean greenhouse: The greenbot dataset. Sensors 24 (6).
- Cañadas-Aránega, F., Moreno, J. C., Blanco-Claraco, J. L., Giménez, A., Rodríguez, F., Sánchez-Hermosilla, J., 2024b. Autonomous collaborative mobile robot for greenhouses: Design, development, and validation tests. Smart Agricultural Technology 9, 100606.
- Czerwiński, M., Vian, A., Woodcock, B. A., Goliński, P., Virto, L. R., Januszkiewicz, L., 2023. Do electromagnetic fields used in telecommunications affect wild plant species? a control impact study conducted in the field. Ecological Indicators 150, 110267.
- Gao, Y., Jiang, Q., Wang, M., Dong, X., 2026. Advances in path-planning algorithms for agricultural robots. Journal of Field Robotics 43 (1), 89–145.
- Guo, Y., Zheng, J., Di, S., Xiang, G., Guo, F., 2022. A beacons selection method under random interference for indoor positioning. Remote Sensing 14 (17), 4323.
- Hernández, H. A., Mondragón, I. F., González, S. R., Pedraza, L. F., 2025. Reconfigurable agricultural robotics: Control strategies, communication, and applications. Computers and Electronics in Agriculture 234, 110161. DOI: 10.1016/j.compag.2025.110161
- Jia, L., Wang, Y., Ma, L., He, Z., Li, Z., Cui, Y., 2023. Integrated positioning system of kiwifruit orchard mobile robot based on uwb/lidar/odom. Sensors 23 (17), 7570.
- Kim, C. H., Silwal, A., Kantor, G., 2025. Autonomous robotic pepper harvesting: Imitation learning in unstructured agricultural environments. IEEE Robotics and Automation Letters.
- Ma, Y., Li, W., Han, D., He, Y., Li, Q., Bai, X., Xu, D., 2024. Wireless wave attenuation in forests: An overview of models. Forests 15 (9), 1587.
- Pham, C.-C., Lin, W.-C., 2025. Development and field evaluation of a uwb-imu navigated autonomous spraying robot for papaya greenhouses. Smart Agricultural Technology 12, 101267.
- Xie, K., Zhang, Z., 2025. High precision uwb localization method for agricultural machinery in unstructured field environment. Measurement 254, 117941.
- Zhang, L., Zhang, R., Zhang, D., Yi, T., Ding, C., Chen, L., 2025. Path curvature incorporated reinforcement learning method for accurate path tracking of agricultural vehicles. Computers and Electronics in Agriculture 234, 110243.