

Sistema inteligente de aplicación de fitosanitarios en cultivos en invernadero: desarrollo inicial y evaluación técnica preliminar

Galiano Roa, B. A., Sánchez-Hermosilla López, J. *, Agüera Vega, F., Carvajal Ramírez, F.

Departamento de Ingeniería, Universidad de Almería, ceiA3, CIAIMBITAL A, Ctra. Sacramento s/n, 04120 Almería, España

Resumen

En este estudio preliminar se presenta el desarrollo y la evaluación inicial de un sistema inteligente para la aplicación selectiva de productos fitosanitarios en cultivos hortícolas de invernadero. El sistema utiliza algoritmos de inteligencia artificial no supervisada y se basa en el cálculo del PRV (*Plant Row Volume*) como parámetro clave para caracterizar el dosel vegetal, a partir de datos georreferenciados obtenidos mediante un sensor LiDAR (*Light Detection and Ranging*). Esta información es procesada por un software específico que genera mapas de prescripción con el volumen óptimo de pulverización, el cual será aplicado mediante electroválvulas de control de caudal por pulsos. Los resultados iniciales estimados muestran un ahorro significativo en el volumen aplicado, especialmente mediante la metodología multi-banda, lo que evidencia el potencial de esta tecnología para reducir el uso de fitosanitarios, minimizar el impacto ambiental y optimizar los costes de producción.

Palabras clave: Agricultura de precisión, Inteligencia artificial, Aplicación variable, Pulverización selectiva, LiDAR.

Development and evaluation of a crop-adapted intelligent spraying system for crop protection applications in greenhouses

Abstract

In this preliminary study, the development and initial evaluation of an intelligent system for the selective application of phytosanitary products in greenhouse horticultural crops is presented. The system employs unsupervised artificial intelligence algorithms and is based on the calculation of PRV (Plant Row Volume) as a key parameter to characterize the plant canopy, using georeferenced data obtained through a LiDAR sensor (Light Detection and Ranging). This information is processed by dedicated software that generates prescription maps with the optimal spray volume, which will be applied through pulse-controlled flow-regulating solenoid valves. The estimated initial results show a significant reduction in the volume applied, especially through the multi-band methodology, highlighting the potential of this technology to reduce the use of phytosanitary products, minimize environmental impact, and optimize production costs.

Keywords: Precision agriculture, Artificial intelligence, Variable-rate application, Selective spraying, LiDAR.

1. Introducción

El crecimiento de la población mundial, que se espera que alcance los 9.700 millones de personas para el año 2050 según la ONU (Organización de las Naciones Unidas), está aumentando la presión sobre la tierra para producir más alimentos. La FAO (*Food and Agriculture Organization*) señala que esta situación se ve agravada por el deterioro de los recursos del suelo, la tierra y el agua, así como por fenómenos meteorológicos extremos y la pérdida de biodiversidad debido al cambio climático (FAO, 2022).

La producción de alimentos en invernaderos se presenta como una solución eficaz, permitiendo:

- Intensificar la producción al optimizar las condiciones de cultivo y posibilitar el cultivo durante todo el año.
- Reducir el riesgo de producción, al minimizar los daños causados por fenómenos naturales, aumentando así la calidad de los productos.
- Usar de manera más eficiente los insumos y recursos hídricos.
- Controlar mejor las plagas y enfermedades, evitando el uso excesivo de productos químicos.
- Producir en regiones con condiciones restrictivas.

En Andalucía, hay más de 36.000 hectáreas de cultivos en invernadero, principalmente de hortalizas, generando una

*Autor para correspondencia: jusanche@ual.es

producción económica de alrededor de 4.000 millones de euros, lo que representa el 29,4% de la producción agraria andaluza (Andalucía, 2019). Sin embargo, el aumento de cultivos en invernadero también trae desafíos, como la necesidad de medidas fitosanitarias adecuadas para evitar la proliferación de patógenos. Los agricultores a veces usan los plaguicidas de manera ineficiente, lo que puede afectar negativamente la economía, acelerar la resistencia y dañar la fauna auxiliar y el medio ambiente. Por todo ello, los organismos reguladores, como la Unión Europea, están restringiendo cada vez más su uso. La agricultura moderna se enfoca en la sostenibilidad, la mitigación de riesgos y la reducción de costes.

Los avances tecnológicos, como el desarrollo de la electrónica, la gestión de la información, las mejoras en las comunicaciones y el auge de la inteligencia artificial, junto con el conocimiento científico actual, han impulsado el desarrollo de la agricultura de precisión. Esta disciplina busca aumentar la productividad agrícola minimizando los impactos negativos sobre el medio ambiente. En este contexto, los sistemas de pulverización adaptados al cultivo ajustan el volumen de fitosanitarios en función de la masa vegetal presente, lo que permite mejorar el rendimiento, reducir los costes de producción y minimizar los efectos ambientales adversos (Pierce y Nowak, 1999).

La aplicación de productos fitosanitarios basada en el volumen de vegetación (Gil et al., 2014; Escolà et al., 2013) ha sido ampliamente estudiada, identificándose dos enfoques principales dentro de la tecnología de aplicación variable: en tiempo real y basada en mapas de prescripción. Para alcanzar una mayor precisión y eficiencia, estas tecnologías deben integrarse con herramientas avanzadas como la inteligencia artificial y la robótica. Entre los elementos clave que contribuyen a su funcionamiento se incluyen: la sensorización, la teledetección aérea, la visión artificial, la adquisición y transmisión de datos mediante IoT (Internet de las cosas), la visualización mediante realidad virtual y aumentada, el aprendizaje automático, el control automático, las técnicas de blockchain y, por supuesto, la ciberseguridad.

El objetivo de este trabajo es diseñar y desarrollar un sistema experto inteligente, capaz de tomar decisiones de forma autónoma en función del volumen de vegetación presente en el cultivo, y adaptado a equipos pulverizadores autopropulsados para la aplicación de productos fitosanitarios en cultivos hortícolas bajo invernadero. El sistema emplea sensores para caracterizar el dosel vegetal a partir del parámetro PRV (*Plant Row Volume*), generando datos georreferenciados que permiten conocer con precisión la distribución espacial de la vegetación dentro del invernadero. Para ello, se ha desarrollado un software específico que recoge la información de los sensores, calcula el PRV y lo vincula a coordenadas obtenidas mediante el uso de un Sistema Mundial de Navegación por Satélite (GNSS). Estos datos son posteriormente procesados mediante algoritmos de aprendizaje automático no supervisado, lo que permite la generación de dos tipos de mapas de prescripción, uni-banda y multi-banda, con el volumen óptimo de pulverización, cuyos resultados se comparan entre sí y estos a su vez con los de una aplicación manual convencional.

2. Material y métodos.

2.1. Ubicación de los ensayos.

Los ensayos se llevaron a cabo en el invernadero de la Fundación Finca Experimental UAL-Anecoop, ubicado en el paraje Los Goterones s/n, Polígono 24, parcela 281, módulo U4, 04131 Almería (coordenadas: X 36,863515463283896; Y -2,2831492988790583). El invernadero tiene una superficie de 1.800 m² (45 m × 40 m) y cuenta con un pasillo central de 2 m de anchura.

El cultivo corresponde a tomate (*Solanum lycopersicum* L.), variedad Fleming (*HM. Clause*), con un marco de plantación de 0,50 m entre plantas y 2,0 m entre líneas. Los ensayos se realizaron durante el estado fenológico 87 807, en el cual el 80% de los frutos presenta el color característico de madurez. Las plantas alcanzan una altura aproximada de 3 m y un ancho de entre 0,7 y 0,9 m, dispuestas en un sistema de filas pareadas.

2.2. Diseño hardware.

En la Figura 1 se puede apreciar el sistema desarrollado, compuesto por tres partes bien diferenciadas unidas entre sí, todo ello montado en una carretilla utilizada para la realización de los ensayos:

- Un sistema de hardware electrónico para la adquisición de datos. Compuesto por:
 - Tarjeta controladora Rock 4 SE de Radxa.
 - Sensor LiDAR 2D (Okdo, modelo LD06).
- Un sistema de hardware electrónico para el posicionamiento. Compuesto por:
 - Controladora rover Cube Orange autopilot (Ardupilot Dev Team, 2024).
 - GNSS rover Here 3.
 - Base Here RTK + Antena RTK,
- Una estación de energía portátil, Technaxx Mini Power Station TX-205.



Figura 1. Carretilla con los elementos del sistema experto: de navegación (amarillo), de control y mapeo de la estructura de la vegetación (rojo) y estación de energía portátil (verde).

2.3. Diseño del software.

Para la implementación de las funciones específicas que se desean realizar con el sistema, se ha desarrollado un software especializado utilizando el lenguaje de alto nivel Python 3.11.1 sobre el sistema operativo Debian 11. En la Figura 2, se presenta una estructura general que describe cómo se ha

organizado el software en diversos módulos, fases y su entorno de ejecución. Los módulos son los siguientes:

- Módulo de lectura de datos LiDAR + GNSS: Este software recolecta datos del dosel georreferenciados mientras el vehículo se desplaza. El sensor LiDAR emite miles de pulsos láser por segundo, generando puntos 3D con coordenadas X, Y, Z. La IMU (*Inertial Measurement Unit*) y el GNSS permiten una georreferenciación precisa de cada punto.
- Módulo de preprocesamiento datos LiDAR + GNSS: Software encargado de la depuración de los datos obtenidos por los sensores en campo, eliminando aquellos que corresponden a ruido y los que no corresponden con puntos sobre el dosel.
- Módulo de implementación de mapas de prescripción. Se encarga de la creación a través de modelos de inteligencia artificial, en concreto el Modelo de Mezcla Gaussiana (GMM), de los mapas de prescripción uni-banda y multi-banda para su posterior comparación.

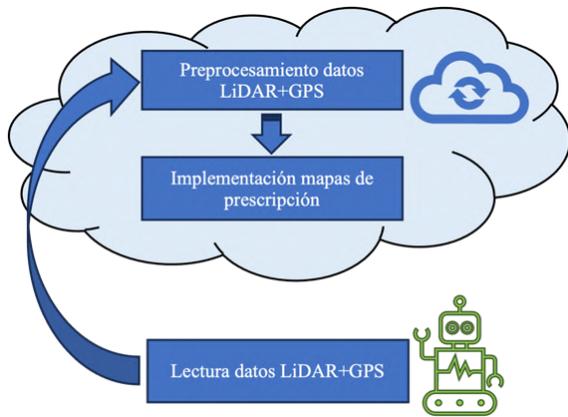


Figura 2. Esquema con los módulos de software desarrollados para el sistema, flujo de información entre ellos y detalle de la ubicación.

3. Evaluación técnica.

La metodología seguida para la obtención de los mapas de prescripción dentro del invernadero ha sido la siguiente:

Fase 1: Adquisición de datos en campo

Se utilizó una carretilla manual como vehículo inspector en el invernadero. El sensor LiDAR se colocó verticalmente a 87 cm del suelo, proyectando el haz láser perpendicular al movimiento. El sistema de posicionamiento se ubicó en la bandeja del vehículo, alineado y retrasado 15 cm con respecto al LiDAR. La batería y el GNSS también se instalaron en la bandeja. La estación base RTK-GNSS se colocó fuera del invernadero con su posición geográfica absoluta configurada.

Una Tablet conectada remotamente al miniordenador del vehículo permitía enviar órdenes y monitorizar los datos de los sensores en tiempo real.

Para la realización de los ensayos, se seleccionaron tres líneas de cultivo con variabilidad estructural entre ellas, representativas del conjunto del invernadero. Esto permitió verificar si los datos capturados por los sensores reflejan adecuadamente la diversidad real del dosel vegetal bajo distintas condiciones.

Fase 2: Tratamiento de datos en gabinete.

Se representan los datos de posicionamiento obtenidos en los ensayos mediante las coordenadas geográficas para comprobar si los caminos reales seguidos dentro del invernadero por el vehículo coinciden con su representación.

Se seleccionan, mediante un software desarrollado específicamente para este propósito, los puntos obtenidos mediante el sensor LiDAR ubicado en el vehículo inspector que sean representativos de impacto sobre la vegetación, eliminando todos aquellos cuya intensidad de señal recibida por el LiDAR sea baja, por considerarse a esos puntos ruido.

Se transforman las mediciones obtenidas por el sensor LiDAR de coordenadas polares a cartesianas, asignándole sus correspondientes coordenadas UTM, quedando cada punto P_i definido por la tupla (UTM_x, UTM_y, Z, D_w) , obteniéndose esta según la expresión 1:

$$P_i = \left(x_{pi}, y_{pi}, Z_{(x_{pi}, y_{pi})}, \frac{D_{fila}}{2} - D_{(x_{pi}, y_{pi})(x_v, y_v)} \right) \quad (1)$$

Donde:

- D_{fila} la distancia entre dos líneas de cultivo consecutivas.
- $Z_{(x_{pi}, y_{pi})}$ altura del punto i sobre el suelo del invernadero.
- D_w ancho de vegetación.
- x_{pi} coordenada UTMx para el punto p_i .
- y_{pi} coordenada UTM y para el punto p_i .
- $D_{(x_{pi}, y_{pi})(x_v, y_v)}$ distancia proyectada del punto i al vehículo (x_v, y_v) .

Con la nube de puntos generada y optimizada, se construyen los mapas de prescripción correspondiente a la metodología Uni-banda (Figura 3a) y a la Multi-banda (Figura 3b), mediante el software específico desarrollado basado en modelos de inteligencia artificial.

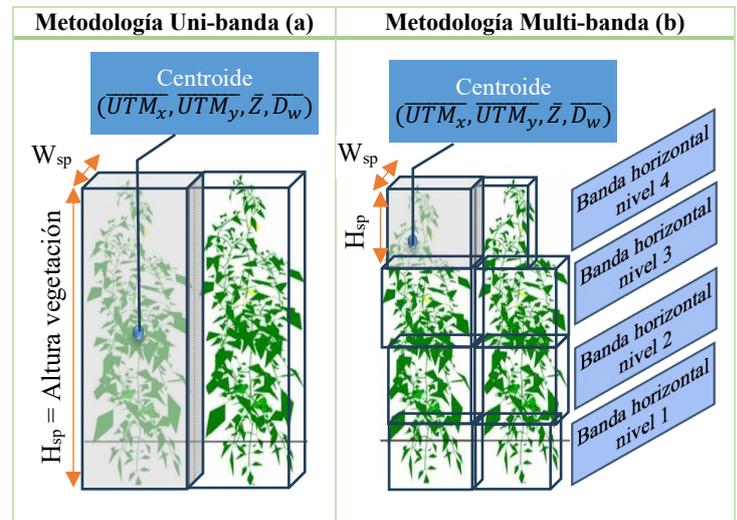


Figura 3. Detalle de la división de la vegetación en una única banda, obteniéndose prismas rectangulares regulares de base $W_{sp} \times H_{sp}$ (a). Detalle de la división de la vegetación en bandas a diferentes alturas, obteniéndose prismas rectangulares regulares de base $W_{sp} \times H_{sp}$ (b).

Una vez generados los mapas de prescripción, se calcula el PRV (Sánchez-Hermosilla et al., 2013), en cada agrupación utilizando (2):

$$PRV_{ip} \left(\frac{m^3}{ha} \right) = \frac{H_{nivel_i}(m) * W_{ip}(m) * 10.000 \left(\frac{m^2}{ha} \right)}{D(m)} \quad (2)$$

Donde:

- PRV_{ip} es el valor de PRV para la agrupación (p) de la banda de nivel (i).

- H_{nivel_i} es la altura de la banda de nivel (i).
- W_{ip} coincidirá con la media de la distribución normal (μ) de la agrupación (p) en la banda de nivel (i).

Y el volumen asociado al PRV que se calcula en función de la expresión (Sánchez-Hermosilla, et al., 2013):

$$V \left(\frac{l}{ha} \right) = \frac{7 * 10^{-3} * d_v \left(\frac{\mu l}{cm^2} \right) * PRV \left(\frac{m^3}{ha} \right)^{1,25}}{\varepsilon} \quad (3)$$

Donde:

- d_v es la deposición media de referencia utilizada es $1,15 \mu l/cm^2$.
- PRV es el volumen de vegetación por unidad de superficie.
- ε es la tasa de recuperación según el equipo utilizado, que es este caso al considerarse que la aplicación se realizará mediante una barra vertical será del 80%.

4. Resultados y discusión.

Este análisis de datos busca verificar la congruencia de los datos captados por los sensores y compararlos con tres metodologías: manual, mapas de prescripción uni-banda y multi-banda. El objetivo es identificar si hay un ahorro en volumen de aplicación sin afectar la eficacia de cada método.

Verificación de los datos captados por los sensores.

a) Posicionamiento:

Para la verificación de los datos de posicionamiento, se ha utilizado la herramienta Qgis para su representación sobre un plano cartográfico, tal como se muestra en la Figura 4. A pesar de la complejidad que implica el posicionamiento y la navegación mediante GNSS en un entorno cerrado como un invernadero, la representación de las líneas de cultivo seleccionadas se alinea considerablemente con la trayectoria seguida durante los ensayos, según el siguiente razonamiento:

- Se aprecia en la representación que el inicio y/o el final de algunas trayectorias dibujadas es más corto en ciertas líneas, en la realidad esto se debe a la presencia de elementos estructurales (como contrafuertes metálicos) en las paredes del invernadero que sobresalen hacia el interior, impidiendo el acceso completo del vehículo hasta el extremo de la línea.
- El sistema registra eficazmente las trayectorias en tramos rectos y curvos, aunque se requieren ajustes menores para corregir pequeñas desviaciones observadas.
- La distancia entre las trayectorias de ida y vuelta dentro de una misma línea de cultivo se mantiene de forma constante en torno a los 2 m, coincidiendo con la separación real entre líneas del cultivo.

Las pequeñas desviaciones observadas son probablemente atribuibles a la precisión en el posicionamiento de la estación base RTK (*Real-Time Kinematic*). Esta situación puede mejorarse mediante un aumento en dicha precisión o la utilización de redes que operen bajo el protocolo NTRIP (*Networked Transport of RTCM via Internet Protocol*).

b) Mapeo de la estructura del dosel:

Para verificar los datos de la estructura del dosel vegetal, se representan los puntos obtenidos por los sensores en una nube de puntos con coordenadas UTM y altura relativa con respecto al suelo del invernadero $P_i = (UTM_{x_i}, UTM_{y_i}, Z_i)$. Estos puntos se comparan con fotos tomadas dentro del

invernadero y con medidas manuales realizadas con una cinta métrica en las líneas de cultivo (Tabla 1).

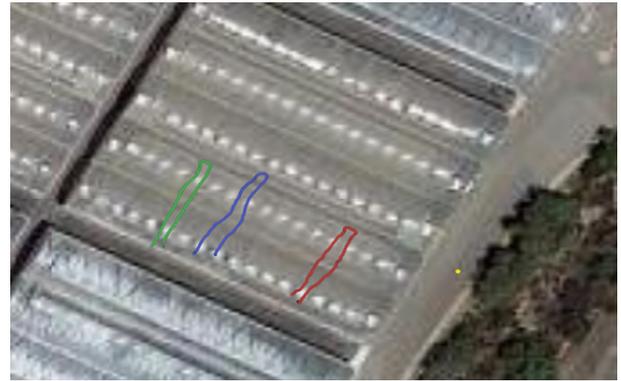


Figura 4. Trayectoria del vehículo en el interior del invernadero por las distintas filas: fila 28 (verde), fila 31 (azul) y fila 38 (rojo). El punto amarillo representa la posición de la estación base RTK.

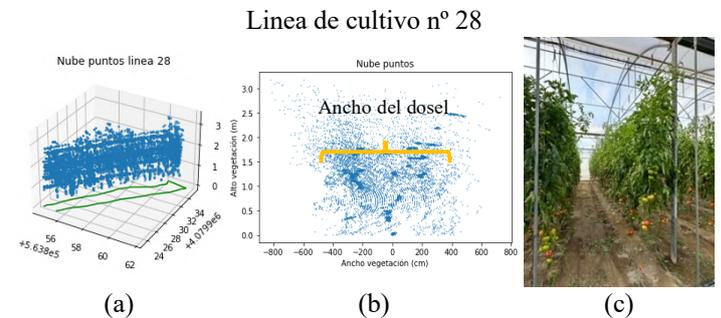


Figura 5. Línea de cultivo nº 28: Nube de puntos en 3D según coordenadas UTM + trayectoria del vehículo (a), nube de puntos de la sección (b) y fotografía real (c).

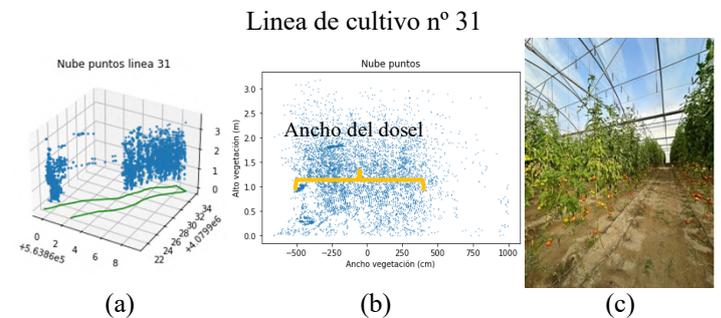


Figura 6. Línea de cultivo nº 31: Nube de puntos en 3D según coordenadas UTM + trayectoria del vehículo (a), nube de puntos de la sección (b) y fotografía real (c).

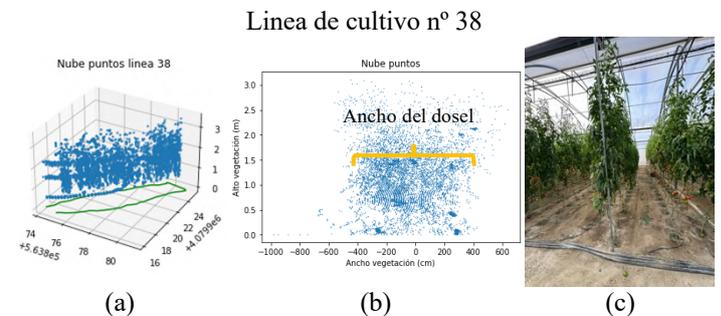


Figura 7. Línea de cultivo nº 38: Nube de puntos en 3D según coordenadas UTM + trayectoria del vehículo (a), nube de puntos de la sección (b) y fotografía real (c).

Se observa, como patrón común a todas las líneas de cultivo estudiadas, las siguientes consideraciones:

1. Al comparar la nube de puntos captada por el LiDAR con las medidas tomadas de forma manual de cada una de las líneas, se ve como la nube de puntos llega hasta una altura de 3 m. tal y como se ha medido de forma manual (Tabla 1).
2. También se aprecia como la mayoría de los puntos de la nube se concentran a partir de 1 m. de altura, indicando por tanto, que la medida del dosel según el LiDAR se encuentra entorno a los 2 m de altura, conforme indican las medidas manuales (Tabla 1).
3. Además, se observa como las nubes de puntos de las figuras 5a, 6a y 7a, representan de una forma veraz la estructura de la vegetación real tal y como se ve en fotografías adjuntas (Figuras 5c, 6c y 7c respectivamente).
4. Por último, y para comprobar que el ancho del dosel medido de forma manual coincide con el medido por el sensor LiDAR, se observan las figuras 5b, 6b y 7b, donde se representan las nubes de puntos de la sección a lo ancho de las líneas de cultivo, apreciándose como el area donde se concentran la mayoría de los puntos de la nube se encuentra entre -500 y 400 mm lo que hace que la anchura del dosel este en torno a los 80-90 cm, coincidiendo este dato con los medidos de forma manual (Tabla 1).

Tabla 1. Geometría de la vegetación medida manualmente. Las mediciones 1 y 3 se obtienen en los extremos de la línea, mientras que la medición 2 se realiza en el centro de la misma.

		Medida 1 (cm)	Medida 2 (cm)	Medida 3 (cm)	Media (cm)
Línea 28	Altura total	300	300	300	300,00
	Altura dosel	155	183	187	175,00
	Anchura dosel	87	88	89	88,00
Línea 31	Altura total	274	300	300	291,33
	Altura dosel	158	208	167	177,67
	Anchura dosel	68	76	77	73,67
Línea 38	Altura total	300	300	300	300,00
	Altura dosel	220	210	230	220,00
	Anchura dosel	77	75	83	78,33

Comparativa entre metodologías del volumen aplicado.

a) Método manual.

Mediante una cinta métrica se toman medidas, en los extremos y en el centro de cada una de las filas, de la altura total de las plantas y la altura y anchura del dosel vegetal. Con las medidas tomadas, se calculan los valores medios de la altura de las plantas, así como la altura y anchura del dosel vegetal de cada una de las líneas de cultivo (Tabla 1).

b) Método Uni-Banda.

La generación de mapas de prescripción se ha realizado utilizando modelos matemáticos de clustering de mezcla gaussiana (GMMs), una técnica de aprendizaje automático que consiste en la agrupación de puntos de datos. La GMMs puede estimar la densidad de distribución de probabilidad de una muestra en donde el modelo es definido como la suma ponderada de un número finito de K distribuciones gaussianas que corresponden a cada uno de los clústeres. Esto permite clasificar cada punto de datos en un clúster específico dentro de un conjunto de datos, facilitando la identificación de patrones y similitudes entre los mismos para dividirlos en grupos diferenciados. El objetivo es agrupar los PRV más

similares en un mismo grupo y asignar a cada uno de estos grupos el volumen de caldo adecuado para el tratamiento fitosanitario.

Se tiene en cuenta toda la altura de la vegetación ($H = 3$ m.) y se toman tramos de 50 cm longitudinalmente a lo largo de la línea de cultivo (L_{Tramo}) (Figura 3a). La ejecución del algoritmo devuelve la matriz de medias de cada clúster (W_i). Se genera un único mapa de prescripción con el número de zonas óptimo, todo de manera no supervisada.

c) Método Multi-Banda.

Por último, al igual que en el apartado anterior, se usa el algoritmo de aprendizaje no supervisado descrito, pero en este caso, se dividen las líneas de cultivo en bandas horizontales a distintas alturas y en verticales a lo largo de la línea de cultivo, formando así prismas de: 50 cm de alto (H_{nivel}), 50 cm de largo (L_{Tramo}) y de profundidad el ancho de la vegetación.

Las bandas horizontales se dividen en niveles que van numerados de abajo hacia arriba (Ver Figura 3b). La ejecución del algoritmo devuelve la matriz de medias de cada clúster (W_i). Para cada banda se genera un mapa de prescripción con un número óptimo de zonas determinado de forma no supervisada, que puede variar entre mapas.

Los resultados obtenidos, en cuanto al gasto de volumen de caldo teórico (2), se pueden apreciar en las gráficas 1 a 3, agrupados por líneas de cultivo.



Gráfica 1. Comparativa entre distintas metodologías del volumen gastado en línea 28.



Gráfica 2. Comparativa entre distintas metodologías del volumen gastado en línea 31.



Gráfica 3. Comparativa entre distintas metodologías del volumen gastado en línea 38.

Observándose al respecto que:

1. La metodología manual, tal y como era de esperar, es la más desfavorable en cuanto a gasto de volumen de líquido. Esto fundamentalmente es debido a que:

- a. La toma de medidas de la estructura de la línea de cultivo de forma manual es poco precisa, lo que hace que el error que se comete sea grande.
 - b. El número de medidas tomadas manualmente podrían ser suficientes cuando la estructura del dosel es completamente uniforme, pero esto no siempre es así, de hecho se observa como en la línea de cultivo 31 donde la estructura vegetativa es heterogénea las diferencias en el consumo de volumen con respecto a las otras dos metodologías son mayores.
2. Entre el método uni-banda y el multi-banda, también se aprecian diferencias, aunque en menor medida. El origen de estas diferencias puede estar en que:
 - a. Con el método uni-banda se considera que la altura de la línea es de 3 m y puede ocurrir que esto no sea siempre así, puesto que por diferentes motivos agronómicos (enfermedades, problemas nutricionales, ...) las plantas dentro de la misma línea tienen un desarrollo diferente, y, por tanto, alturas diferentes. Esto se aprecia perfectamente como sucede en la línea 31, donde están las mayores diferencias entre estos dos métodos.
 - b. Mientras más pequeñas sean las dimensiones de los prismas, mejor se ajustarán sus centroides al perfil real del dosel, por tanto, el cálculo del volumen de vegetación será más exacto y más preciso.
 3. De igual forma, lo visto en los dos puntos anteriores, se refleja también en el estudio de los porcentajes de ahorro en el volumen de líquido, observándose como:
 - a. Las mayores tasas de ahorro se dan entre el método multi-banda con respecto al manual rondando estos porcentajes en torno al 65-75%, que son mayores conforme la estructura de la vegetación se va haciendo más heterogénea. Entre el método uni-banda y el manual las tasas de ahorro están en el 39-49%.
 - b. Observando las diferencias entre el método uni-banda y el multi-banda se ve como hay un ahorro entorno al 40-50%, incrementado en un 9% cuando la variabilidad dentro la misma fila es mayor.

Si se compara el ahorro obtenido con el de otros estudios (Chen et al. 2011; Liu et al. 2012; Méndez et al. 2013), donde lograron ahorros de entre el 38 y el 51%, se observa que estos ahorros son similares a los obtenidos cuando se ha definido una sola banda, sin embargo, cuando se divide el dosel de vegetación en bandas horizontales los ahorros que se obtienen son bastante mayores con respecto a los obtenidos en esos estudios.

La incorporación de algoritmos de inteligencia artificial basados en aprendizaje automático ha mejorado significativamente la precisión y autonomía del sistema, especialmente en la agrupación de datos para la creación de mapas de prescripción. El uso del algoritmo GMM, desarrollado para optimizar este proceso, ha permitido una agrupación eficiente sin necesidad de intervención humana.

Referencias

- Andalucía, A. d. G. A. y. P. d., 2019. Caracterización del sector agrario y pesquero de Andalucía.
- Balsari, P., Oggero, G., Bozzer, C. & Marucco, P., 2012. An autonomous self-propelled sprayer for safer pesticide application in glasshouses. *Asp. Appl. Bio.* 114, pp. 197-204.
- Byers, R., Hickey, K. & Hill, C., 1971. Base gallonage per acre. *Virginia Fruit*, 60, pp. 19-23.
- Cabello, T., 1996. Utilización de pesticidas en cultivos en invernaderos del sur de España y análisis de riesgos toxicológicos y medio ambientales. *Phytoma España* 1131-8988, Issue 75, pp. 11-19.
- Campos, J., Gallart, M., Llop, J., Ortega, P., Salcedo, R. & Gil, E., 2020. On-Farm Evaluation of Prescription Map-Based Variable Rate Application of Pesticides in Vineyards. *Agronomy*, Issue 10, p. 102.
- Campos, J., Llop, J., Gallart, M., García-Ruiz, F., Gras, A., Salcedo, R. & Gil, E., 2019. Development of canopy vigour maps using UAV for site-specific management during vineyard spraying process. *Precision Agriculture*, 20(6), pp. 1136-1156.
- Chen, Y., Zhu, H. & Ozkan, H., 2012. Development of a variable-rate sprayer with laser scanning sensor to synchronize spray outputs to tree structures. *Trans. ASABE*, Issue 55, pp. 773-781.
- Escolà, A., Rosell-Polo, J.R., Planas, S., Gil, E., Pomar, J., Camp, F., Llorens, J. & Solanelles, F., 2013. Variable rate sprayer. Part 1 – Orchard prototype: Design, implementation and validation. *Computers and Electronics in Agriculture*, Volumen 95, pp. 122-135.
- FAO, F. O. P. y. U., 2022. Adaptación de las políticas alimentarias y agrícolas para hacer las dietas saludables más asequibles. Versión resumida de El estado de la seguridad alimentaria y la nutrición en el mundo 2022, p. 40.
- Gil, E., Gallart, M., Llorens, J., Llop, J., Bayer, T. & Carvalho, C., 2014. Spray adjustments based on LWA concept in vineyard. Relationship between canopy and coverage for different application settings. *Aspects of Applied Biology*, Issue 122, pp. 25-32.
- Liu, H., Zhu, H., Chen, Y., Shen, Y. & Erdal Ozkan, H., 2012. An electronic flow control system for a variable-rate tree sprayer. *Proceedings of the 2012 ASABE Annual International Meeting Dallas, USA*.
- Liu, L., Liu, Y., He, X. & Liu, W., 2022. Precision Variable-Rate Spraying Robot by Using Single 3D LIDAR in Orchards. *Agronomy*, 12(10), p. 2509.
- Méndez, V., Catalán, H., Rosell-Polo, J.R., Arnó, J. & Sanz, R., 2013. LIDAR simulation in modelled orchards to optimise the use of terrestrial laser scanners and derived vegetative measures. *Biosystems Engineering* 115, pp. 7-19.
- Pierce, F. J. & Nowak, P., 1999. *Aspects of Precision Agriculture*. *Avances in agronomy*, Volumen 67, pp. 1-85.
- Rincón, V. J., Páez, F. C. & Sánchez-Hermosilla, J., 2018. Potential dermal exposure to operators applying pesticide on greenhouse crops using low-cost equipment. *Science of the Total Environment*. Volume 630, pp. Pages 1181-1187.
- Sánchez-Hermosilla, J., Medina, R. & Gázquez, J., 2003. Improvements in pesticide application in greenhouses. *Revista Cajamar*.
- Sánchez-Hermosilla, J., Páez, F., Rincón, V. J. & José Pérez-Alonso, 2013. Volume application rate adapted to the canopy size in greenhouse tomato crops. *Scientia Agricola*, Volumen 70, pp. 390-396.
- Sánchez-Hermosilla, J., Rincón, V. P., F., A. F. & Carvajal, 2011. Field evaluation of a self-propelled sprayer and effects of the application rate on spray deposition and losses to the ground in greenhouses tomato crops. *Pest Management Science*, 67 (8), pp. 942-947.
- Wei, J. & Salyani, M., 2004. Development of a laser scanner for measuring tree canopy characteristics: phase 1. Prototype development. *Trans. ASAE*, 47 (6), pp 2101-2107.
- Wei, J. & Salyani, M., 2005. Development of a laser scanner for measuring tree canopy characteristics: phase 2. Foliage density measurement. *Trans. ASAE*, 48 (4), pp 1595-1601.
- Xuan, G., Zhang, W. & Chai, P., 2001. EM algorithms of Gaussian mixture model and hidden Markov model. *Proceedings 2001 International Conference on Image Processing (Cat. No.01CH37205)*, Volumen 1, pp. 145-148.