Sociedad Española de Ciencias Hortícolas

ACTA DE HORTICULTURA

Comunicaciones Técnicas Sociedad Española de Ciencias Hortícolas

98

Noviembre 2024

IV Symposium de Ingeniería Hortícola. SIBIH24

Robótica agrícola. Realidad y perspectivas

Editores:

Antonio Madueño Luna
Manuel Jesús González
Miguel Calixto López Gordillo

ACTAS DE HORTICULTURA Nº 98

Comunicaciones Técnicas Sociedad Española de Ciencias Hortícolas

IV Symposium de Ingeniería Hortícola. SIBIH24. *"Robótica agrícola. Realidad y perspectivas"*

Actas del IV Symposium de Ingeniería Hortícola SIBIH24

Sociedad Española de Ciencias Hortícolas

Editores:

Antonio Madueño Luna

Manuel Jesús González

Miguel Calixto López Gordillo

ISBN: 978-84-09-73414-6

Comité Organizador
Dr. Antonio Madueño Luna (Universidad de Sevilla)
Dr. Miguel Calixto López Gordillo (Universidad de Sevilla)
Dra. María del Carmen Florido Fernández (Universidad de Sevilla)
Dr. José Miguel Madueño Luna (Universidad de Sevilla)
Dr. Manuel Jesús González Ortega (Universidad de Sevilla)
Dr. José Miguel Molina Martínez (Universidad Politécnica de Cartagena)
Dr. Antonio Ruíz Canales (Universidad Miguel Hernández de Elche)

Comité Científico
Dr. Ginés García Mateos (Universidad de Murcia)
Dr. Daniel G. Fernández Pacheco (Universidad Politécnica de Cartagena)
Dr. Jorge Antonio Sánchez Molina (Universidad de Almería)
Dr. José Antonio Álvarez Bermejo (Universidad de Almería)
Dra. María de los Desamparados Melián Navarro (Universidad Miguel Hernández de Elche)
Dr. Manuel Ferrández-Villena García (Universidad Miguel Hernández de Elche)
Dr. José Miguel Molina Martínez (Universidad Politécnica de Cartagena)
Dr. Luis Manuel Navas García (Universidad de Valladolid)
Dr. Francisco Rodríguez Díaz (Universidad de Almería)
Dra. Dolores Parras Burgos (Universidad Politécnica de Cartagena)
Dr. Emilio Camacho Poyato (Universidad de Córdoba)
Dr. Javier Cancela Barrio (Universidad de Compostela)
Dr. Francisco García Sanchez (Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura)
Dra. Silvia Arazuri Garín (Universidad Publica de Navarra)
Dra. Maria Coral Ortiz Sanchez (Universidad Politécnica de Valencia)
Dra. Maria Isabel Valín Sanijiao (Agrarian School of the Polytechnic Institute of Viana do Castelo, IPVC)

INDICE

Sensorización, Teledetección y Visión Artificial en Horticultura
Aplicación de sensores NPK para la gestión del manejo agronómico del cultivo de Bimi®. J.C. Abellaneda Pividal, V.M. Gallegos-Cedillo, C.P. García-Ripoll, D.G. Fernández-Pacheco, M. Soler-Méndez, J.M. Molina-Martínez

Aplicaciones de sensores térmicos y espectrales al cultivo de arroz por goteo con fuentes de agua no convencionales. Manuel J. González-Ortega , Annkathrin Rosenbaum, María Muñoz, Gregorio Egea.

Clasificación de variedades de pitaya por análisis de imagen. Pablo González-Planells, Coral Ortiz, Francisco Rovira-Más, Vicente Alegre.

Análisis de variaciones en el diámetro del tronco y el flujo de savia en vid mediante descomposición de tendencia estacional. Aureliano C. Malheiro, Filipe Adão, Helder Fraga y João A. Santos.

Detección de los patrones de cultivo y estimación de cosecha de limones mediante visión artificial en imágenes de dron y satélites. Antonio Muñoz Sánchez, Rubén Fernandez-Beltrán, Ginés García-Mateos, José Miguel Molina-Martínez.

Efectos de dos estrategias de riego en la Respiración, Evapotranspiración y Estrés Hídrico del pistacho estimados mediante imágenes térmicas obtenidas con UAS. Rubén Vacas, Lidia Núñez, Sergio Vélez, Hugo Martín, Raquel Martínez-Peña, Sara Álvarez.

Efectos de la aplicación de bioestimulantes en el comportamiento agronómico del olivar a través de índices multiespectrales en Castilla y León. Rubén Vacas, Hugo Martín, Daniel Martínez Porro, Enrique Barajas.

Estimación mediante fotografía digital de la altura de planta a partir de la fracción de cobertura vegetal en un cultivo de Bimi®**.** J.C. Abellaneda Pividal, D.G. Fernández-Pacheco, J.M. Molina-Martínez

Evaluación del impacto del riego con agua marina desalinizada en parcelas de cítricos mediante la monitorización con drones en el sureste español. A. Imbernón-Mulero, B. Gallego-Elvira, J.F. Maestre-Valero, V. Martínez-Álvarez, C. Barrera y C. Ortega.

Docencia en Ingeniería Agrícola
Experiencia educativa en vermicompostaje. Laura García-España, Francisco García, Josep Llinares, María Desamparados Soriano.

Control Automático y Robótica

Análisis, diseño y cálculo de estructuras para su empleo en sistemas agrovoltaicos de cultivos hortícolas. Jesús David Carrasco Gómez, Diego Mayordomo Martínez, Francisco J. Cánovas Rodríguez, Dolores Parras-Burgos y José Miguel Molina-Martínez.

Análisis de la configuración de los pasillos de un invernadero de tipo mediterráneo para la navegación de robots móviles. Fernando Cañadas-Aránega, José Carlos Moreno, Francisco Rodríguez y José Luis Blanco-Claraco.

Desarrollo de un robot de siega para invernadero. Sergio Bayano-Tejero , Gregorio L. Blanco-Roldán , R. R. Sola-Guirado.

Energy Hub para el modelado y optimización del consumo de recursos en un contenedor transportable para cultivo vertical de lechuga. Rubén A. González, Francisco García-Mañas, Elia Ruipérez-Algarra, Francisco Rodríguez.

Diseño de una estructura agrovoltaica para cultivos hortícolas utilizando perfiles de invernaderos comerciales. J.A. Nicolás-Cuevas, D. Parras-Burgos, J.M. Molina-Martínez.

Invernaderos Agrivoltaicos Inteligentes en la región del Mediterráneo. Pablo González-Planells, Coral Ortiz-Sanchez, Francisco Rovira-Mas, Elena Chaveli-Lopez, Carmina Reig-Valor.

Modelización 3D de un sistema mecánico para el movimiento de un módulo agrovoltaico. Manuel Sijes Marín , Dolores Parras-Burgos , Francisco J. Cánovas y José Miguel Molina-Martínez.

Hacia una solución para la reducción de vibraciones en el transporte de cajas de frutas en campo mediante láminas impresas. P. Sánchez-Cachinero, S. Bayano-Tejero, R R. Sola-Guirado.

Integración del inversor Huawei en la plataforma GENHIDRO para la gestión energética de explotaciones agrícolas. M. Soler Méndez, D. Parras Burgos y J.M. Molina Martínez.

Analítica: DSS, Modelado, IA, Machine Learning, Deep learning, Optimización

Diagnosis por visión artificial y redes neuronales de máquinas deshuesadoras de aceitunas. J.M. Madueño-Luna, A. Madueño-Luna, M.C. López-Gordillo, M.J. González-Ortega.

Visualización de datos

Creación de un dataset de sombras sintéticas para el estudio de la radiación en explotaciones agrovoltaicas con actividad humana. Mengchen Huang, Rubén Fernandez-Beltrán, Ginés García-Mateos, José Miguel Molina-Martínez, Sajad Sabzi.

Aprendizaje máquina aplicado a imágenes hiperespectrales para la detección precoz de yesca en vid. Silvia Arazuri, Patricia Viela, Sara León, Carmen Jarén, Ainara López-Maestresalas.

Análisis de desempeño de los modelos YOLOv5 en la identificación de malezas en el cultivo de maíz (Zea mays L.) en condiciones de campo. Oscar Leonardo García-Navarrete, Jesús Hernán Camacho Tamayo, Luis Manuel Navas-Gracia.

Sensorización, Teledetección y Visión Artificial en Horticultura

Determinación de la concentración de nitrógeno en arroz (*Oryza sativa* L.) mediante análisis de reflectancia espectral en Colombia. Diana Carolina Polanía-Montiel, Oscar Leonardo García-Navarrete, Luis Manuel Navas Gracia.

Detección de fallos mediante visión artificial en máquinas deshuesadoras, rodajadoras y de rellena de aceitunas (DRR). A. Madueño-Luna, J.M. Madueño-Luna, M.C. López-Gordillo, M.J. González-Ortega.

Adquisición de datos e IoT

Algoritmos y sistemas de gestión de la fertirrigación mediante bombas y protocolo modbus RTU. M. Soler Méndez, J. Fernández Esquiva, D. Parras Burgos y J.M. Molina Martínez.

Identificación basada en datos de modelo dinámico de la nitrificación en suelos arenosos para la predicción de concentraciones de especies nitrogenadas. Francisca Reales, Luis Orihuela.

Sensorización y automatizacion de jardines verticales mediante tecnologías de bajo coste. Fernando Lago-Pena, Adrián Paz Feijóo, Noelia López-López, Adolfo López-Fabal.

Otras Investigaciones

Cubiertas hortícolas para la protección del suelo. Laura García-España, Josep Llinares, Maria Desamparados Soriano.

Optimizando la Extracción de Aceite de Residuos de Café Usados: Una Evaluación del Ciclo de Vida de la Toxicidad Humana y los Beneficios de la Economía Circular. Malek Miladi, Rania Remmani, Antonio Ruiz-Canales, Teresa M. Mata, António A. Martins.

Influencia de la humedad en el proceso de fabricación de paneles ecológicos de caña común (*Arundo donax* L.). B.E. Ferrández-García, M. Ferrández-Villena, T. García-Ortuño, M.T. Ferrández-García.

Valorización de tableros de partículas del tronco palmera datilera (*Phoenix dactilifera*.). B.E. Ferrández-García, M. Ferrández-Villena, T. García-Ortuño, M.T. Ferrández-García.

Influencia del cambio climático en el rendimiento de tomate para industria del bajo Guadalquivir . M.C. López-Gordillo, E. Ramírez-Juidias, J.M. Madueño-Luna, A. Madueño-Luna.

Modelización del crecimiento radicular del Bimi® a partir de fotografía digital cenital. J.C. Abellaneda Pividal, D.G. Fernández-Pacheco, V.M. Gallegos-Cedillo[2], J.M. Molina-Martínez.

Respuesta agronómica y gestión del riego para un cultivo de Bimi®. J.C. Abellaneda Pividal, V.M. Gallegos-Cedillo, C.P. García-Ripoll, D.G. Fernández-Pacheco, M. Soler-Méndez, J.M. Molina-Martínez.

Seguimiento de la transpiración del almendro mediante técnicas de medida de flujo de savia y balance de energía en superficie. Llanos Simón; Vanesa Jiménez; Ramón López-Urrea; Juan Manuel Sanchez; Francisco Montoya; José González-Piqueras; Álvaro Virosta; Ignacio Buesa.

Análisis, diseño y cálculo de una instalación de alumbrado inteligente en sistemas agrovoltaicos de cultivos hortícolas. Antonio Rodríguez Nicolás, Francisco J. Cánovas Rodríguez, y José Miguel Molina-Martínez.

Influencia del sombreado sobre los cultivos de acelga, borraja y puerro. Aurora Arroyo-García, José Casanova-Gascón, Pablo Martín-Ramos, Luis Manuel Navas-Gracia.

Otras investigaciones y avances en Ingeniería Hortícola

Dinámica de fluidos computacional bidimensional en tiempo real para invernaderos tipo Almería Zhang Chunhao, Francisco García-Mañas, Francisco Rodríguez, Li Ming

Aplicación de sensores NPK para la gestión del manejo agronómico del cultivo de Bimi®

J.C. Abellaneda Pividal[1], V.M. Gallegos-Cedillo[2*], C.P. García-Ripoll[1], D.G. Fernández-Pacheco[3], M. Soler-Méndez[1], J.M. Molina-Martínez[1]

[1] Grupo de investigación de Ingeniería Agromótica y del Mar, Universidad Politécnica de Cartagena, C/ Ángel s/n, Ed. ELDI E1.06, 30203, Cartagena, Murcia.
[2] Grupo de investigación de Hortofloricultura Mediterránea, Universidad Politécnica de Cartagena, Paseo Alfonso XIII 48, 30203, Cartagena, Murcia.
[3] Departamento de Estructuras, Construcción y Expresión Gráfica, Universidad Politécnica de Cartagena, C/ Doctor Fleming s/n, 30202, Cartagena, Murcia.
***** Autor para correspondencia: victor.gallegos@upct.es

Palabras clave: Soluciones basadas en datos, sensores edafoclimáticos, variables biométricas, desarrollo fenológico, brócoli.

Resumen

La implementación de sensores inteligentes edafoclimáticos y las tecnologías IoT representan una herramienta fundamental para el avance hacia una agricultura de precisión sostenible. Así mismo, permiten optimizar la toma de decisiones sobre el manejo agronómico de los cultivos. El objetivo de esta investigación fue implementar sensores NPK y tecnologías IoT para la recopilación de las variables edafoclimáticas y su posterior correlación con el desarrollo fenológico de un cultivo de Bimi®, un híbrido entre el brócoli convencional y el brócoli chino o kailan, con un sabor dulce y suave, y un tallo similar al de un espárrago. El experimento se llevó a cabo en una finca comercial de Bimi® ciclo otoño-invierno situada en la localidad de Lorca, Murcia (España). Las distintas variables edafoclimáticas se recogieron mediante sensores de humedad, conductividad eléctrica y NPK del suelo. Los datos climáticos se registraron a través de una estación meteorológica in situ. Se analizaron las medidas biométricas de altura de la planta, diámetro de tallo, número de hojas y rendimiento. También, se determinó el área foliar, el nivel de clorofila SPAD y el contenido iónico en planta. Por otro lado, se analizó la fertilidad de suelo y la dinámica de extracción de nutrientes. Los resultados obtenidos demostraron la existencia de una correlación entre las variables agronómicas y la temperatura, posibilitando así estimar la fecha óptima de trasplante y recolección del cultivo.

INTRODUCCIÓN

En cultivos de alto valor como el Bimi®, la adopción de tecnologías de monitorización resulta especialmente interesante. La implementación de sistemas avanzados de sensorización y control permite recopilar datos en tiempo real sobre variables como la humedad del suelo,

conductividad, nitrógeno, fósforo, potasio, etc.

Esta información facilita la toma de decisiones basada en datos, optimizando el uso de recursos como el agua o los fertilizantes. Con esta tecnología se podrían aplicar los insumos de manera eficiente y únicamente cuando fuese necesario, logrando así una reducción significativa en los costes asociados al proceso productivo. Además, se minimizaría el impacto ambiental al evitar el uso excesivo de químicos, contribuyendo así a la sostenibilidad del ecosistema.

MATERIALES Y METODOS

Para la ejecución de este ensayo se empleó un datalogger diseñado específicamente para este tipo de aplicaciones, equipado con un microcontrolador ESP32. La configuración de este equipo permitía tanto la adquisición de datos como la actuación sobre elementos de una instalación de riego, como una bomba inyectora o un conjunto de filtros autolimpiables. Se instalaron sensores de conductividad RS485 capaces de medir los niveles de NPK presentes en el suelo(Satoh & Kakiuchi, 2021). Además, se integraron sensores SDI12 para medir la conductividad eléctrica del suelo, la humedad y la temperatura. Los datos se enviaban a un servidor cada 15 minutos, lo que facilitaba un monitoreo continuo.

Los sensores RS485 y SDI12 se instalaron a distintas profundidades; unos a 15 cm y otros a 30 cm. Con esto, se buscó analizar el bulbo húmedo del cultivo de la manera más precisa posible, teniendo en cuenta que el desarrollo radicular de este cultivo oscila entre los 25-30cm de profundidad.

Se recogieron muestras de suelo y se analizaron, con el fin de contrastar los datos obtenidos de estos equipos. La comparación entre los datos obtenidos de los sensores y los resultados del análisis en laboratorio de las muestras de suelo fue esencial para calibrar y verificar la fiabilidad de estos dispositivos.

Para el proceso de calibración de los resultados de los sensores, se elaboró un diagrama de dispersión (figura 1) en el cual se compararon los valores obtenidos de cada sensor instalado con los resultados del análisis de suelo. Se analizó el comportamiento de la línea de tendencia, obteniendo así la ecuación de la recta correspondiente en cada caso (Michałowski et al., 2014).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, en la figura 2, se muestran los niveles de NPK del suelo procedentes del análisis de las muestras en laboratorio. Se observa como la cantidad de fósforo disponible fue disminuyendo a lo largo del ensayo, principalmente porque durante ese periodo no se realizaron aportes de fósforo. En cuanto al nitrógeno, también se puede apreciar una disminución en sus niveles, aunque no tan acusada debido al aporte de nitrato potásico que se llevó a cabo durante el ensayo. Respecto al potasio, se observa que desde el día 60 hasta el día 90 después del trasplante hubo un incremento en cuanto a su concentración en el suelo. Esto se debió al aumento del número de abonados de cobertera por semana, pasando de 3 aplicaciones por semana a 4 aplicaciones por semana.

Después del proceso de calibración y validación de datos de los sensores NPK, se presentan en la tabla 1 los datos recopilados cada 30 días desde el día del trasplante del Bimi®, hasta su cosecha. Al analizar la tabla, se observa que, tras la calibración, los sensores son capaces de proporcionar datos fiables.

CONCLUSIONES

El empleo de sensores para el control de variables edafoclimáticas en el cultivo de Bimi® representa un avance significativo en la gestión de los recursos hídricos y nutricionales. Se ha demostrado que, siguiendo un procedimiento basado en el muestreo de suelo para la posterior calibración de los sensores, se obtiene un resultado favorable en cuanto a la fiabilidad de las mediciones proporcionadas por estos dispositivos. Para un agricultor, el uso de estos equipos podría suponer un antes y un después en la optimización del proceso productivo y en el cuidado del medio ambiente.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio forma parte del Programa AGROALNEXT que ha sido financiado por MICIN con fondos NextGenerationEU (PRTR-C17.I1) y por la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia a través de la Fundación Séneca - Agencia de Ciencia y Tecnología de la Región de Murcia.

REFERENCIAS

Michałowski, T., Pilarski, B., Michałowska-Kaczmarczyk, A. M., & Kukwa, A. (2014). A non-linearity criterion applied to the calibration curve method involved with ion-selective electrodes. *Talanta*, *124*, 36–42. https://doi.org/10.1016/J.TALANTA.2014.02.027

Satoh, Y., & Kakiuchi, H. (2021). Calibration method to address influences of temperature and electrical conductivity for a low-cost soil water content sensor in the agricultural field. *Agricultural Water Management*, *255*, 107015. https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2021.107015

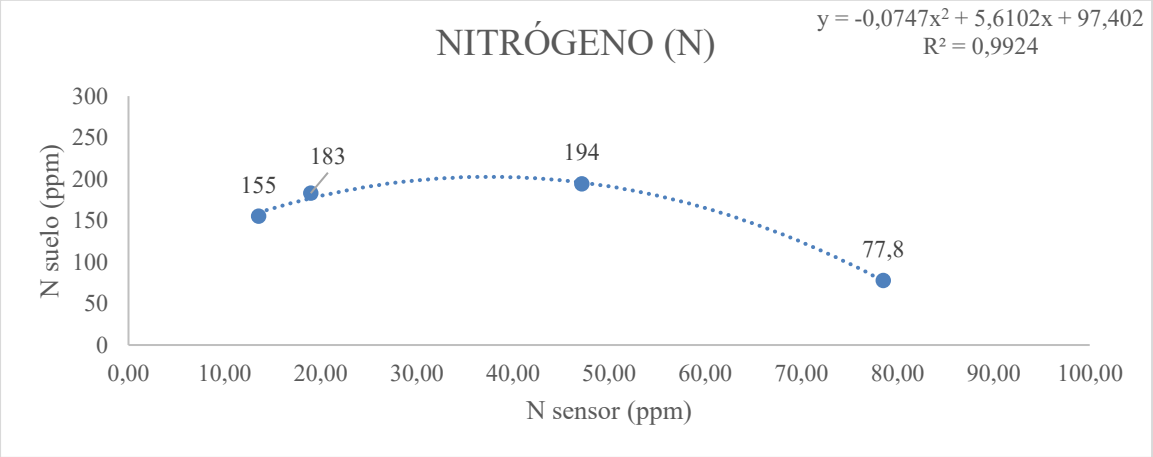


Figura 1. Diagrama de dispersión de cantidad de nitrógeno medido por el sensor NPK (x) junto con el análisis de suelo (y).

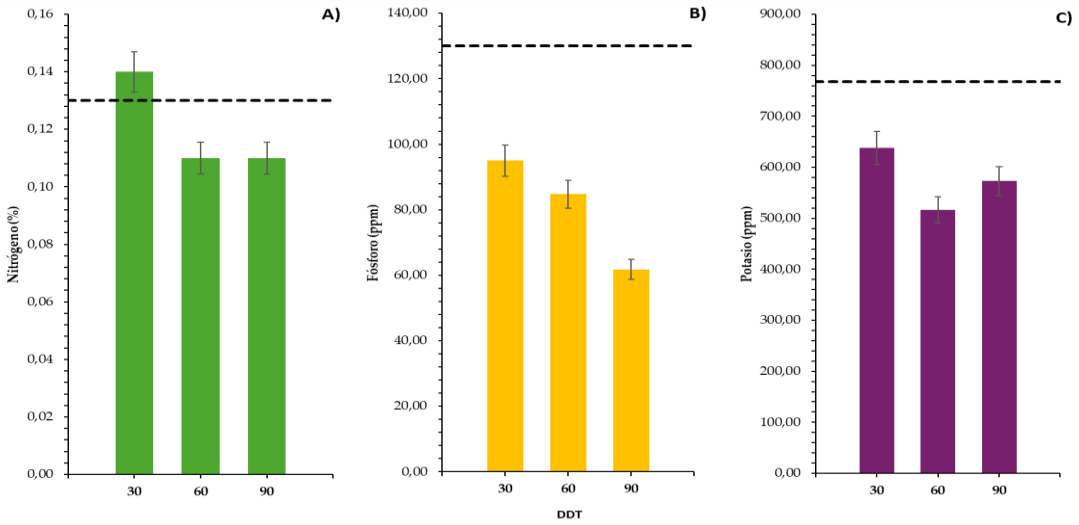


Figura 2. Niveles de fertilidad NPK en el suelo. A) Nitrógeno (%); B) Fósforo disponible (ppm); C) Contenido de potasio (ppm). La línea discontinua indica los valores iniciales de NPK previos al establecimiento del cultivo. DDT: Días después del trasplante.

Tabla 1. sensores NPK y análisis del suelo (ppm).

DDT	Sensores			Análisis de suelo		
	N (ppm)	P (ppm)	K (ppm)	N (ppm)	P (ppm)	K (ppm)
0	195,85	126,25	776,64	194	130	768
30	176,93	102,98	604,82	183	95	638
60	159,67	78,97	541,35	155	84,8	516
90	77,32	62,94	570,06	77,8	61,8	573

Aplicaciones de sensores térmicos y espectrales al cultivo de arroz por goteo con fuentes de agua no convencionales.

Manuel J. González-Ortega [1*], Annkathrin Rosenbaum[2], María Muñoz[2], Gregorio Egea[1]

[1] ETSIA, Universidad de Sevilla, Ctra. de Utrera, km.1, 41013 Sevilla, España.

[2] TEPRO Consultores Agrícolas S.L., Sevilla, España
*Autor para correspondencia: mgortega@us.es
Palabras Clave: Riego por goteo, termografía, agua regenerada, *Oryza sativa*, CWSI

Resumen

El cultivo del arroz es especialmente significativo en las marismas del Guadalquivir (Andalucía), que representa el 40% de la producción nacional. La escasez de agua dulce hace imprescindible una gestión del recurso más eficiente. Este estudio tiene un doble enfoque, por un lado, la implementación de sensórica aplicada al control del estrés hídrico del cultivo del arroz en condiciones aeróbicas, y en segundo lugar el uso de fuentes de aguas no convencionales, como son las aguas regeneradas. Los ensayos se realizaron durante las campañas de 2022 y 2023 en Carrión de los Céspedes (Sevilla), utilizando el efluente de una planta de tratamiento de aguas residuales. Se establecieron dos tratamientos de riego: uno con un aporte hídrico completo (T1, 100% ETc) y otro con una ligera reducción (T2, 90% ETc). Se monitorizó la temperatura del dosel vegetal, el índice de vegetación NDVI y la conductancia estomática. Los datos obtenidos permitieron establecer líneas de referencia para calcular el Índice de Estrés Hídrico del Cultivo (CWSI), demostrando la estabilidad de estas líneas en diferentes etapas de crecimiento y horas del día. El estudio ha revelado que el CWSI determinó con precisión las variaciones en el estado hídrico del cultivo, correlacionándose con la dinámica de la conductancia estomática. En las etapas iniciales del crecimiento, cuando el CWSI presenta limitaciones debido a la influencia de la fracción de suelo visible por el sensor, el NDVI ofreció datos complementarios cruciales para una interpretación más completa.

INTRODUCCIÓN

España cultiva arroz en aproximadamente 100,000 hectáreas, principalmente en las marismas del Guadalquivir, Andalucía, que representan casi el 40% del área nacional. El Guadalquivir es la fuente principal de agua de riego, pero su proximidad al estuario incrementa la salinidad, lo cual obliga a liberar grandes volúmenes de agua dulce para obtener condiciones adecuadas para el cultivo. Este sistema enfrenta problemas de alto consumo de agua y reducción de áreas de cultivo durante sequías, proponiéndose el uso de aguas regeneradas y riego localizado como soluciones. En condiciones aeróbicas, el monitoreo del estado hídrico mediante sensores térmicos es prometedor, pues aprovecha la relación entre la temperatura del dosel y la transpiración (Egea et al., 2017). Sin embargo, factores climáticos como la radiación solar y el viento afectan esta técnica, por lo que se han desarrollado métodos de normalización como el Índice de Estrés

Hídrico del Cultivo (CWSI), que permite un seguimiento más preciso del estrés hídrico (Idso et al., 1981):

$$CWSI = \frac{(T_c - T_a) - (T_c - T_a)_{LL}}{(T_c - T_a)_{UL} - (T_c - T_a)_{LL}} \quad (1)$$

donde T_c y T_a representan las temperaturas del cultivo y del aire, respectivamente, y los subíndices LL y UL representan, respectivamente, las diferencias T_c - T_a para condiciones no limitantes de agua en el suelo y para un cultivo con nivel máximo de estrés, es decir, sin transpiración. Ambos valores de referencia deben determinarse a partir de líneas de referencia que pueden obtenerse empíricamente utilizando las siguientes expresiones:

$$(T_c - T_a)_{LL} = a + b \cdot VPD \quad (2)$$

$$(T_c - T_a)_{UL} = a + b[e_s(T_a) - e_s(T_a + a)] \quad (3)$$

donde a y b son coeficientes empíricos, VPD es el déficit de presión de vapor, y e_s representa la presión de vapor saturado.

En los últimos años, el uso de termometría infrarroja para monitorear el estrés hídrico en el arroz ha ganado interés, motivado por la necesidad de optimizar el uso de agua mediante sistemas aeróbicos o técnicas de manejo como el riego con alternancia de períodos secos y húmedos (Alternate Wetting and Drying, AWD). Aunque su efectividad se ha estudiado en el cultivo tradicional de arroz, su aplicación en riego por goteo y bajo condiciones mediterráneas sigue inexplorada. Este estudio busca evaluar la eficacia de la termometría infrarroja en estas condiciones y establecer líneas de referencia para el Índice de Estrés Hídrico del Cultivo (Crop Water Stress Index, CWSI) en arroz regado por goteo.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se realizó en el Centro Tecnológico de Nuevas Tecnologías del Agua (Carrión de los Céspedes, Sevilla, España) durante los ciclos de cultivo de arroz de 2022 y 2023. En este centro, ubicado en una planta de tratamiento de aguas residuales, se utilizó agua regenerada para el riego por goteo en parcelas experimentales. En 2022, el ciclo se extendió fuera de las fechas habituales, mientras que en 2023 se desarrolló entre junio y noviembre. Las parcelas fueron fertilizadas antes de la siembra y sembradas con el cultivar 'Hispalong' (Indica), usando una densidad de 170 kg/ha. Se implementaron dos tratamientos de riego: T1 (100% de las necesidades hídricas del cultivo, ETc) y T2 (90% del ETc), con tres repeticiones cada uno en un diseño de bloques al azar, en subparcelas de 100 m². La ETc se calculó mediante la metodología FAO-56, con datos de evapotranspiración de una estación cercana (Allen et al., 1998). Se instalaron cuatro sensores térmicos infrarrojos (modelo IR120) en dos de las tres parcelas de T1 y T2, con un ángulo de inclinación de 45º. Además, se utilizó un sensor de temperatura y humedad del aire (ATMOS 14, METER Group) para calcular el déficit de presión de vapor (VPD).

$$VPD\ (kPa) = e_s(kPa) - e_a(kPa) \quad (4)$$

donde e_s y e_a son las presiones de vapor saturada y real. Asimismo, se usaron cuatro sensores de reflectancia espectral (SRS-NDVI, Meter Group) para medir el índice de vegetación NDVI en dos repeticiones por tratamiento. Durante el ciclo de 2023, se midió la conductancia estomática al mediodía en cinco hojas expandidas por subparcela utilizando un medidor de conductancia estomática SC-1 (METER Group).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El arroz es muy sensible al déficit hídrico en el suelo. En condiciones aeróbicas, una gestión inadecuada del agua puede reducir significativamente el rendimiento. En este estudio, una reducción del 10% en el agua disponible afectó el estado hídrico y el desarrollo vegetativo del cultivo. La Figura 1a muestra diferencias de temperatura entre el cultivo y el aire (ΔT), un indicador de estrés hídrico, siendo mayores en el tratamiento T2. Estas diferencias se mantuvieron hasta los 80 días después de la siembra (DAS), disminuyendo con la senescencia foliar. Además, el índice NDVI reveló variaciones en el desarrollo vegetativo entre los tratamientos (Figura 1b).

Para utilizar ΔT como indicador del estado hídrico, es necesaria su normalización (Ecuación 1), lo cual requiere líneas de referencia específicas (Ecuaciones 2 y 3). La Figura 2a muestra la relación entre ΔT y el déficit de presión de vapor (VPD) para el tratamiento T1, confirmando la estabilidad de esta relación en el intervalo 12 - 17 h ($R^2 = 0.90$). Esta relación fue estable tanto en el ciclo de otoño como en el de verano, pese a las diferencias de VPD (Figura 2b). La pendiente fue similar a la obtenida por Ramos-Fernández et al., (2024) en Perú, si bien el intercepto varió. Otros estudios en climas húmedos, como el de Godson-Amamoo et al. (2022) para arroz inundado, mostraron diferencias importantes en la pendiente e intercepto, lo que subraya la necesidad de definir líneas de referencia específicas para cada región. Las líneas de referencia obtenidas se emplearon para calcular el índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI) en T1 y T2 (Figura 3a).

Los resultados mostraron valores de CWSI consistentemente mayores en T2, que reflejan un mayor nivel de estrés hídrico. En los primeros 40 DAS, el CWSI en T1 no alcanzó los valores bajos típicos de un cultivo bien regado, y a partir de aproximadamente 90 DAS, el CWSI aumentó en ambos tratamientos debido a la senescencia foliar. La relación entre CWSI y NDVI durante las primeras etapas de crecimiento vegetativo de T1 (Figura 3b) podría ser útil para interpretar el CWSI, especialmente cuando el NDVI es inferior a 0.8.

La principal conclusión hasta el momento es que un déficit hídrico leve reduce el desarrollo vegetativo y el estado hídrico en arroz con riego por goteo. El CWSI se confirma como un buen indicador del estado hídrico, mientras que el NDVI complementa su interpretación durante el crecimiento vegetativo inicial. Las líneas de referencia para CWSI resultaron estables entre las 12-17 h y entre ciclos de crecimiento, facilitando su uso consistente.

AGRADECIMIENTOS

Los experimentos se realizaron como parte del proyecto SOS-AGUA-XXI (MIG-

20211026), financiado por los fondos Next Generation EU a través del programa Misiones Ciencia e Innovación del CDTI (Ministerio de Ciencia e Innovación de España).

REFERENCIAS

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. 1998. Crop Evapotranspiration. FAO Irrigation and Drainage paper No 56. FAO, Rome.

Bozkurt Çolak, Y. 2021. Comparison of aerobic rice cultivation using drip systems with conventional flooding. J. Agr. Sci. 159, 544–556.

Egea, G., Padilla-Díaz, C.M., Martinez-Guanter, J., Fernández, J.E., Pérez-Ruiz, M. 2017. Assessing a crop water stress index derived from aerial thermal imaging and infrared thermometry in super-high density olive orchards. Agric. Water Manage. 187, 210–221.

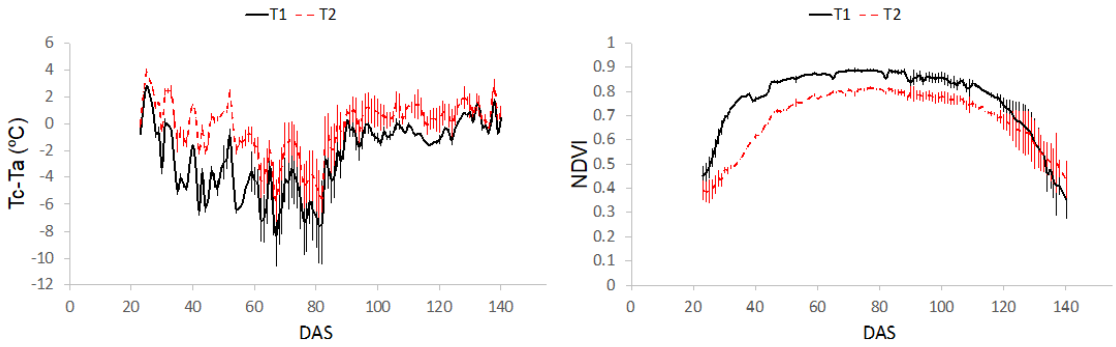
ESYRCE. 2023. Encuesta sobre Superficies y Rendimientos de Cultivos. Análisis de los Regadíos en España. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.

Godson-Amamoo, S., Kato, T., Katsura, K. 2022. Empirical Setting of the Water Stressed Baseline Increases the Uncertainty of the Crop Water Stress Index in a Humid Temperate Climate in Different Water Regimes. Water (Switzerland) 14.

Idso, S.B., Jackson, R.D., Pinter, P.J., Reginato, R.J., Hatfield, J.L. 1981. Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. Agric. Meteorol. 24, 45–55.

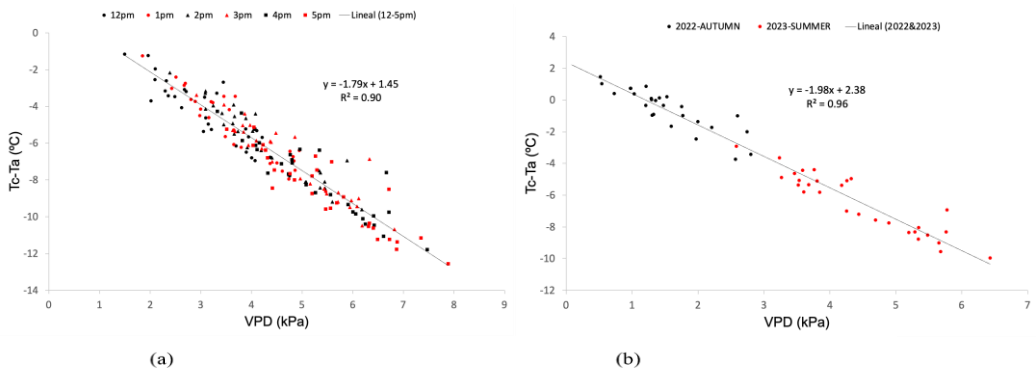
Intriago, J.C., López-Gálvez, F., Allende, A., Vivaldi, G.A., Camposeo, S., Nicolás Nicolás, E., Alarcón, J.J., Pedrero Salcedo, F. 2018. Agricultural reuse of municipal wastewater through an integral water reclamation management. J Environ Manage 213, 135–141.

Ramos-Fernández, L., Gonzales-Quiquia, M., Huanuqueño-Murillo, J., Tito-Quispe, D., Heros-Aguilar, E., Flores del Pino, L., Torres-Rua, A. 2024. Water Stress Index and Stomatal Conductance under Different Irrigation Regimes with Thermal Sensors in Rice Fields on the Northern Coast of Peru. Remote Sensing 16.



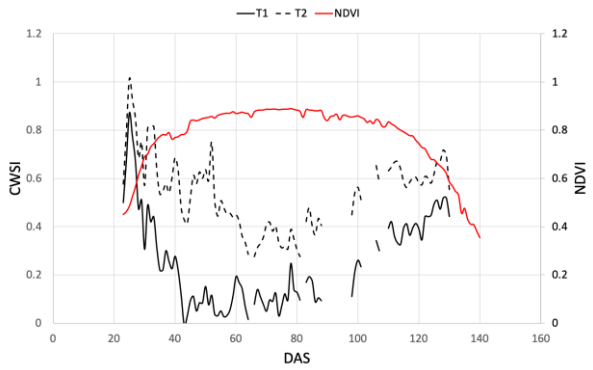
(a) (b)

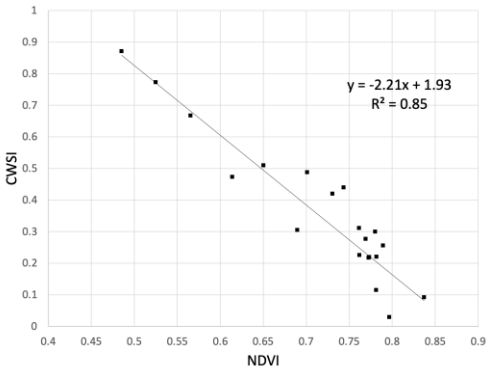
Figura 1. a) Diferencias de temperatura entre el dosel (Tc) y el aire (Ta) para los tratamientos de riego T1 y T2 a lo largo del ciclo de crecimiento de 2023; (b) Dinámica estacional del NDVI para T1 y T2 durante el ciclo de crecimiento de 2023. Las barras verticales indican ± DE. DAS: días después de la siembra.



(a) (b)

Figura 2. (a) Línea de referencia sin estrés (Ecn. 2) obtenida en T1 durante el periodo 12-17 h (hora local). Datos del periodo entre 56 y 86 días después de la siembra (agosto) (2023). **(b)** Línea de referencia sin estrés (Ecn. 2) obtenida en T1 durante el periodo 12-17 h (hora local) en dos ciclos de cultivo (2022 y 2023). Se muestran las temperaturas promedio del dosel entre las 12 y las 17h para cada día de muestreo.





(a) (b)

Figura 3. (a) Evolución estacional del índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI) en los tratamientos T1 y T2 y del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) en T1. **(b)** Relación entre CWSI y NDVI durante las etapas iniciales de crecimiento en T1 (25 a 45 DAS), coincidiendo con valores de NDVI en el rango de 0.45 a 0.85 (desarrollo vegetativo incompleto).

Clasificación de variedades de pitaya por análisis de imagen

Pablo González-Planells[1], Coral Ortiz[1*], Francisco Rovira-Más[1], Vicente Alegre[2]

[1] Laboratorio de Robótica Agrícola. Dpto Ingeniería Rural y Agroalimentaria. Universitat Politècnica de València, Valencia

[2] Greenvision (GreenVision - Quality Sorting Systems), Benifayó Valencia

***Autor para correspondencia:** cortiz@dmta.upv.es

Palabras clave: fruta del dragón, calibrador óptico, variedades, discriminación

Resumen

La pitaya o fruta del dragón es un producto tropical cuyo consumo se está extendiendo en Europa. Algunas áreas de la zona mediterránea de España parecen presentar buenas condiciones para su cultivo. En muchas ocasiones se cultivan mezcladas distintas variedades de apariencia externa muy similar, pero presentan internamente características muy diferentes, como color de la pulpa. El objetivo del presente trabajo es utilizar un prototipo de calibrador mediante análisis de imagen para clasificar distintas variedades de pitaya. Las pitayas procedían de un invernadero experimental situado en Picasent (Valencia). Tres variedades de pitaya, de color externo rojo púrpura, fueron ensayadas: 'Nevada' (pulpa de color blanco, 107 frutas), 'Purple' (pulpa de color rojo púrpura, 115 frutas) y Thai (pulpa color blanco, 14 frutas). Después de pesar las piezas y evaluar la ausencia de daños externos visibles, se obtuvieron las magnitudes de imagen con un prototipo de visión de la empresa Greenvision (coordenadas de color RGB, diámetros máximo y mínimo, perímetro, y área). Después se realizaron las medidas destructivas de firmeza mediante una máquina universal de ensayos y contenido en sólidos solubles mediante refractómetro. Como resultados destacables, se comprobó como el sistema fue capaz de clasificar correctamente los frutos en las tres variedades con un 91 % de frutos bien clasificados (análisis discriminante paso por paso) y 98 % (red neural bayesiana). El sistema de visión fue capaz de diferenciar mediante análisis de imagen no destructivo las distintas variedades de pitaya ensayadas y podría ser una prometedora solución para la clasificación de los frutos en las líneas de confección en almacén.

INTRODUCCIÓN

La fruta del dragón, también conocida como pitaya o pitahaya, es una fruta común en las regiones tropicales y subtropicales que proviene de una planta perenne del género *Hylocereus* de la familia *Cactaceae*, originaria de América Central (Huang y Zhao, 2024; Attar et al., 2022). En Europa se considera una fruta de alto valor añadido y su producción se está extendiendo a algunas zonas de países mediterráneos. Asegurar la calidad de las frutas tropicales de alto valor añadido es fundamental (Aline et al., 2023).

En el caso de la fruta del dragón, en muchas ocasiones los productores cultivan mezcladas distintas variedades de apariencia externa muy similar, pero presentan internamente características muy diferentes, como color de la pulpa. Los sistemas no destructivos de análisis de calidad de

productos hortofrutícolas frescos han sido extensamente desarrollados (Pathare y Rahman, 2022). El análisis de imagen se ha presentado como una posible técnica para analizar los productos frescos de forma no destructiva (Li et al., 2024; Olorunfemi et al., 2024).

Diferentes estudios basados en análisis de imagen han sido también desarrollados en fruta del dragón. Algunos estudios se han enfocado en la identificación de madurez en frutas en planta, antes de la recolección (Vo et al., 2023). Trieu y Thinh (2021) utilizaron un calibrador óptico para clasificar frutas del dragón empleando una red neuronal convolucional para el procesamiento de imágenes tomadas. El sistema propuesto fue capaz de separar las distintas partes de la fruta (identificando las escamas) con más de un 85 % de precisión y fue capaz de clasificar en tres categorías basadas en las dimensiones con más de un 95 % de frutas bien clasificadas por el modelo.

Los sistemas de clasificación mediante análisis de imagen se usan de forma habitual en las centrales hortofrutícolas. La mayoría de los equipos estiman calibres según las dimensiones medidas.

El objetivo del presente trabajo es utilizar un prototipo de calibrador mediante análisis de imagen para clasificar distintas variedades de pitaya.

MATERIAL Y MÉTODOS

Las frutas fueron cosechadas de un invernadero situado en Picasent (Valencia), un total de 336 frutas de dragón (107 de la variedad 'Nevada', 115 'Purple' y 14 de la variedad 'Thai') en estado de madurez de recolección, Figura 1. Las frutas se transportaron al laboratorio en bolsas de polietileno para minimizar la deshidratación durante el transporte. Todos los experimentos se llevaron a cabo en el laboratorio del Departamento de Ingeniería Rural y Agroalimentaria de la Universitat Politècnica de València.

Después de comprobar la ausencia de daños, las frutas fueron pesadas y medidas mediante el prototipo de análisis de imagen desarrollado para fruta del dragón. Mediante el dispositivo de análisis de imagen, prototipo calibrador (www.Greenvision.com) se tomaron dos imágenes por pieza, en dos caras opuestas de la fruta, Figura 2. Mediante el procesamiento de las imágenes de estimaron las magnitudes de dimensión: diámetro mayor (mm), diámetro menor (mm), área total (mm^2) y perímetro (mm); y las magnitudes de color medio R, G y B, el perímetro del contorno (mm) y el área (mm^2), mediante el software de procesamiento de imágenes X-AnyLabelling basado en Python (Figura 1).El peso de la fruta del dragón fue determinado con una balanza digital con una sensibilidad de 0.01 g (www.metler.com). Además, todas las frutas fueron medidas de forma destructiva mediante penetración Magness-Taylor con vástago de 8 mm usando una máquina una máquina universal de ensayos (www.ibertest.com), y sólidos solubles totales mediante refractometría (www.atago.com) con tres repeticiones por pieza.

RESULTADOS

Descripción de las frutas estudiadas

En la Tabla 1 se muestran las principales características de las frutas estudiadas, obtenidas excepto peso, a posteriori mediante ensayos destructivos. Especialmente las variedades 'Nevada' y 'Purple' tenían una apariencia externa muy similar. La variedad 'Thai' presentaba en general un tamaño mayor.

Clasificación mediante análisis discriminante

Mediante análisis discriminante paso a paso se determinó el modelo de clasificación en las tres variedades en función de las variables no destructivas, obteniéndose un 91 % de frutas bien clasificadas, Tabla 3, Figura 2. La variedad mejor clasificada fue 'Nevada" con un 96,3 % de frutas bien clasificadas, solamente tres frutas fueron clasificadas erróneamente como 'Purple' y una como 'Thai'. Las frutas peor clasificadas fueron las de la variedad 'Thai', esto pudo deberse al menor número de frutas de esta variedad en la muestra. En el análisis discriminante paso a paso las variables extraídas del análisis de imagen que intervinieron en el modelo fueron la diagonal mayor (mm), el área (mm^2) y las coordenadas de color RGB.

Clasificación mediante redes neuronales

Mediante análisis con red neuronal bayesiana (utilizando una red probabilística neuronal, parámetro de espaciamiento 0,0125 y optimizado por *jackknifing* durante el entrenamiento) se determinó un segundo modelo de clasificación en las tres variedades en función de las variables no destructivas (área (mm^2), perímetro (mm), diámetro mayor (mm), diámetro menor (mm), y las magnitudes de color medio R, G y B), obteniéndose un porcentaje de frutas correctamente clasificadas de 98,2, usando Tabla 4. La variedad mejor clasificada fue 'Nevada" con un 98,8 % de frutas bien clasificadas. Las frutas peor clasificadas fueron de nuevo las de la variedad 'Thai'. El porcentaje de frutos bien clasificados en el conjunto de validación disminuyó al 56,5%. Sin embargo, el porcentaje de clasificación de frutos de la variedad 'Purple' se mantuvo en 92 %.

CONCLUSIONES

Mediante el prototipo calibrador de análisis de imagen el sistema de visión fue capaz de diferenciar las tres variedades de pitaya muy similares externamente, pero con características internas muy diferentes. De las frutas ensayadas, se obtuvo una clasificación de 91 % de frutos bien clasificados usando análisis discriminante paso por paso y 99 % usando red neural bayesiana. El equipo desarrollado y los algoritmos propuestos podrían ser una prometedora solución para la clasificación de los frutos de dragón en las líneas de confección en almacén.

BIBLIOGRAFÍA

Huang, M., & Zhao, J. 2024. Recent advances in postharvest storage and preservation technology of pitaya (dragon fruit). *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, *99*(2), 115-129.

Aline, U., Bhattacharya, T., Faqeerzada, M. A., Kim, M. S., Baek, I., & Cho, B. K. 2023. Advancement of non-destructive spectral measurements for the quality of major tropical fruits and vegetables: a review. *Frontiers in Plant Science*, *14*, 1240361.

Pathare, P. B., & Rahman, M. S. 2022. Nondestructive techniques for fresh produce quality analysis: An overview. *Nondestructive quality assessment techniques for fresh fruits and vegetables*, 1-10.

Li, L., Jia, X., & Fan, K. 2024. Recent advance in nondestructive imaging technology for detecting quality of fruits and vegetables: a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 1-19.

Olorunfemi, B. O., Nwulu, N. I., Adebo, O. A., & Kavadias, K. A. 2024. Advancements in machine visions for fruit sorting and grading: A bibliometric analysis, systematic review, and future research directions. *Journal of Agriculture and Food Research*, 101154.

Vo, H. T., Thien, N. N., & Mui, K. C. 2023. A Deep Transfer Learning Approach for Accurate Dragon Fruit Ripeness Classification and Visual Explanation using Grad-CAM. *International Journal of Advanced Computer Science & Applications*, *14*(11).

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer a los proyectos "INTEGRACIÓN DE SISTEMAS AGRONÓMICOS Y FOTOVOLTAICOS PARA LA PRODUCCIÓN INTELIGENTE DE CULTIVOS MEDITERRÁNEOS Y SUBTROPICALES (INNEST/2022/115)" y "RECOLECCIÓN INTELIGENTE Y AUTOMATIZADA DE CULTIVOS DE ALTO VALOR EN INVERNADEROS SOSTENIBLES (INNEST/2023/106)" financiados por la Agencia Valenciana de la Innovación.

Tabla 1. Principales características de las frutas estudiadas.

	Variables de caracterización (Media (Error Est))		
Variety	***Masa (g)***	***Firmeza (N/mm)***	***Sólidos solubles (°Brix)***
'Nevada'	270,0 (7,2)	3,06 (0,03)	12,6 (0,1)
'Purple'	258,8 (6,9)	2,96 (0,03)	13,6 (0,1)
'Thai'	414,4 (19,8)	2,92 (0,09)	16,1 (0,3)

Tabla 2. Tabla de clasificación del análisis discriminante.

Variedad real	***Variedad predicha***	***'Nevada'***	***'Purple'***	***'Thai'***
'Nevada'	321	309 (96,26 %)	9 (2,80 %)	3 (0,93 %)
'Purple'	345	20 (5,80 %)	302 (87,54 %)	23 (6,67 %)
'Thai'	42	0 (0,00 %)	8 (19,05 %)	34 (80,95 %)

Tabla 3. Tabla de clasificación de la red neuronal bayesiana.

Variedad real	***Variedad predicha***	***'Nevada'***	***'Purple'***	***'Thai'***
'Nevada'	321	317 (98,75 %)	4 (1,25 %)	0 (0,00 %)
'Purple'	345	7 (2,03 %)	338 (97,97 %)	0 (0,00 %)
'Thai'	42	0 (0,00 %)	2 (4,76 %)	40 (95,24 %)



'Nevada' 'Purple' 'Thai'

Figura 1. Variedades de fruta del dragón estudiadas.

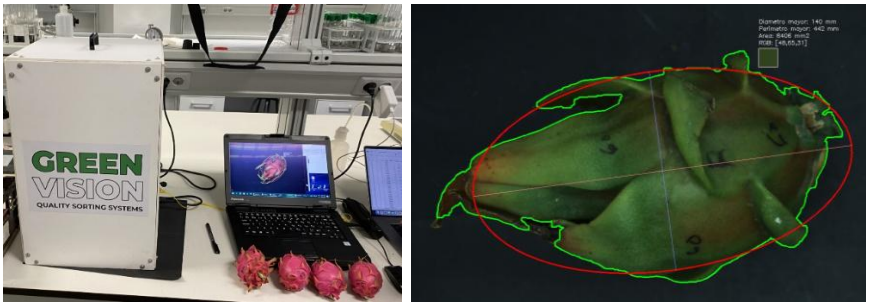


Figura 2. dispositivo de análisis de imagen, prototipo calibrador (www.Greenvision.com)

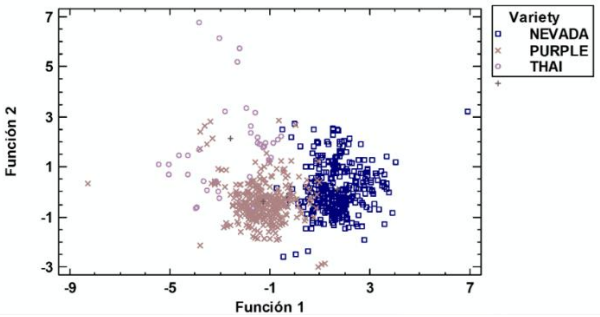


Fig. 3. Gráfica de las funciones discriminantes de clasificación en las tres variedades según las variables no destructivas.

Detección de los patrones de cultivo y estimación de la cosecha de limones mediante visión artificial en imágenes de dron y satélites

A. Muñoz-Sánchez[1], R. Fernandez-Beltran[1], G. García-Mateos[1*], J.M. Molina-Martínez[2]

[1] Departamento de Informática y Sistemas, Facultad de Informática, 30100 Murcia
[2] Grupo de Ingeniería Agromótica y del Mar, ETS de Ingeniería Agronómica, 30203 Cartagena
*Autor para correspondencia: ginesgm@um.es

Palabras clave: visión artificial, ortofotos, procesamiento de imágenes, limoneros, aprendizaje computacional.

Resumen

El uso de ortofotografías en agricultura, capturadas por drones o satélites, permite obtener imágenes detalladas de cultivos, facilitando el análisis mediante visión artificial. Este estudio se centra en cultivos de limoneros, utilizando imágenes de drones y Google Maps para detectar árboles mediante búsqueda de patrones. El objetivo final es realizar predicciones tempranas y lo más precisas posibles de la cosecha de limones que producirá cada finca. En primer lugar, usando técnicas de procesamiento de imágenes se determina la posición de cada árbol, analizando el patrón de plantación para crear una estructura donde a cada árbol se le asignan sus vecinos más cercanos. Se detectan los fallos y los árboles existentes en esta estructura, obteniendo imágenes individuales y rotadas de cada árbol para el análisis. A continuación, se entrenaron cinco modelos de *deep learning* basados en redes neuronales convolucionales (CNN) utilizando imágenes RGB y multiespectrales de drones, para estimar la producción individual de cada árbol. Se logró un error medio absoluto de 23,98 kg por árbol con la red ViT basada en Visual Transformers. Aunque se requieren mejoras futuras, las predicciones superan en un 30% a las realizadas por expertos humanos, mostrando resultados prometedores en la estimación de producción de los limoneros.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, uno de los procesos fundamentales de apoyo en la actividad agrícola es la estimación de la producción de un cultivo en fases tempranas de su ciclo productivo y previo al periodo de cosecha. Existen ciertas limitaciones para la ingeniería agrónoma cuando se trabaja con grandes extensiones de superficie, ya que los agricultores, especialmente en cítricos, se encuentran con problemas de estimación del rendimiento y/o potencial del cultivo. Contar con una estimación precisa de la producción es necesario para determinar la cantidad y calibre de los frutos que se podrán conseguir durante la recolección y, en consecuencia, anticipar la preparación y coordinación de las sucesivas fases del cultivo, como la fertirrigación, además de ser determinante en la fase comercial.

Actualmente, el proceso de estimación más extendido es de forma manual por expertos cualificados, donde aparecen las limitaciones que implican controlar y monitorizar grandes extensiones de terreno. Sin embargo, las ortofotografías aplicadas en agricultura, capturadas por ejemplo mediante drones o mediante satélites, permiten obtener imágenes detalladas de grandes extensiones de cultivos agrícolas. Esto da pie al desarrollo de diversas funcionalidades usando visión

artificial y procesamiento de imágenes. Entre estos problemas de interés están la determinación del patrón de cultivo, la localización precisa y conteo de los árboles, y la estimación de la producción (García-Berná et al., 2020).

En concreto, el objetivo final de este trabajo es el desarrollo de nuevas técnicas y la creación de una herramienta que permita obtener imágenes de Google Maps o de cualquier otra fuente y, utilizando técnicas de detección, que permiten detectar los árboles dentro de la parcela marcada y analizar su patrón de plantación. Posteriormente, los árboles segmentados de forma individual son utilizados para entrenar varios modelos de *deep learning*, usando las mediciones reales sobre el terreno de la producción obtenida para cada árbol. El proyecto ha sido realizado en colaboración con la empresa Citrus GB, especializada en la exportación de limones, con la colaboración de la empresa de drones Staerea (Servicios de Teledetección Aérea).

MATERIAL Y MÉTODOS

La detección de los árboles se realiza mediante la técnica de búsqueda de patrones. Esta técnica toma un árbol como plantilla y, a partir de ella, detecta todos los árboles que presenten una alta coincidencia con esta plantilla. A continuación, se calibra el contorno de cada árbol detectado y se obtiene su posición en la imagen. Una vez obtenidas las posiciones de los árboles en la imagen, se analiza el patrón de plantación o direcciones principales. El objetivo es crear una estructura de árboles donde a cada árbol se le asignan sus árboles más próximos en cada dirección. Las direcciones se pueden obtener de manera automática o manual. Seguidamente, se detectan los fallos que se hayan podido generar en la estructura de árboles creada, comprobando que cada árbol presenta en cada dirección otro árbol próximo. En la Fig. 1 se muestra gráficamente un ejemplo de este proceso.

Esto permite obtener imágenes individuales de cada árbol detectado y de cada hueco en el cultivo. Se determina un mismo tamaño para todas las imágenes y se rotan para que su dirección principal esté alineada con el eje de coordenadas. Con los árboles segmentados de forma individual, se han entrenado varios modelos de *deep learning* para realizar la estimación de la producción de cada árbol, en base a datos de campo de la recolección real obtenida de cada árbol. En concreto, sobre estas imágenes se han aplicado cinco estructuras de redes neuronales convolucionales (CNN): una red CNN básica de diseño propio con sucesivas capas de convolución y *max-pooling* (CNN-1); la propuesta por (Nevavuori et al., 2019), CNN-2; las redes CNN-ST y CNN-LF propuestas por (Barbosa et al., 2020); y la red neuronal con mecanismo de atención (ViT) propuesta en (Vaswani et al., 2017).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En total se realizaron 7 tomas de datos completas que incluyen: vuelos de los drones con cámaras RGB y multiespectrales (con los canales: azul, verde, rojo, red-edge, near-infrared y el mapa de elevación o DSM); estimación de la producción realizada por los expertos tasadores; y medición real sobre el terreno de la producción de los árboles. Estas tomas de datos abarcan desde febrero de 2022 hasta enero de 2023, en fincas del municipio de Murcia. En dos fincas (Santa Cruz y El Siscar) se dispone de tomas de datos en dos periodos distintos (2022 y 2023). Todo esto totaliza un conjunto de 593 árboles para los cuales se tienen imágenes y el par medición real/estimación, para una producción real total de 52,3 toneladas. Como dato significativo, la tasación total de los expertos para estos mismos árboles fue de 29,4 toneladas. En la Fig. 2 se muestran algunos ejemplos de la aplicación del software desarrollado sobre las imágenes de estas fincas, donde se puede ver

una muy alta efectividad de la técnica de detección de árboles y del patrón de cultivo.

A continuación, con las imágenes segmentadas, se realizó un entrenamiento y validación de los modelos, usando la técnica de la validación cruzada con 5 pliegues. Se hicieron diferentes pruebas en función de los datos utilizados: usando solo las imágenes RGB; y usando las imágenes RGB, las espectrales y el canal de DSM. Estas pruebas se realizaron con las cinco arquitecturas propuestas de redes neuronales: CNN-1, CNN-2, CNN-ST, CNN-LF y ViT. En las Tablas 1 y 2 se muestran los resultados obtenidos. En la Fig. 3 se muestran algunos ejemplos concretos de estimaciones individuales.

Se puede ver que los mejores resultados usando únicamente imágenes RGB de los drones se obtuvieron con la red neuronal ViT, que se basa en la idea de los llamados Visual Transformers. Los resultados de este modelo ofrecieron un error medio absoluto de 23,98 kg por árbol, siendo la producción media por árbol de 88 kg. Aunque estos resultados dejan abierto un campo de mejora de cara a futuros trabajos, las predicciones de la producción son muy prometedoras, puesto que mejoran más de un 30% las predicciones realizadas de los expertos humanos sobre los mismos cultivos. En el futuro, la disponibilidad de mayores conjuntos de imágenes de ejemplo permitirá el entrenamiento más preciso de los modelos usados, con el propósito de mejorar la precisión de las estimaciones.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por la Fundación Séneca, Agencia Regional de Ciencia y Tecnología de Murcia (Fundación Séneca, Plan de Actuación 2022) con el proyecto 22130/PI/22.

REFERENCIAS

Barbosa, A., Trevisan, R., Hovakimyan, N., & Martin, N.F. 2020. Modeling yield response to crop management using convolutional neural networks. Computers and Electronics in Agriculture, 170: 105197.

García-Berná, J.A., Ouhbi, S., Benmouna, B., García-Mateos, G., Fernández-Alemán, J.L., & Molina-Martínez, J.M. 2020. Systematic mapping study on remote sensing in agriculture. Applied Sciences, 10(10): 3456.

Nevavuori, P., Narra, N., & Lipping, T. 2019. Crop yield prediction with deep convolutional neural networks. Computers and electronics in agriculture, 163: 104859.

Vaswani, A., Shazeer, N., Parmar, N., Uszkoreit, J., Jones, L., Gomez, A.N. et al. 2017. Attention is all you need. Advances in neural information processing systems, 30.

Tabla 1. Resultado de los algoritmos de regresión mediante CNN usando solo las imágenes RGB (dataset de 593 árboles, con 5-*fold cross validation*).

Modelo	**MAE (kg)**	**MSE (kg^2)**	**MEAE (kg)**	**R^2**
CNN-1	28,06	1409,85	21,51	0,672
CNN-2	25,33	1233,82	17,77	0,694
CNN-ST	25,60	1211,78	18,66	0,712
CNN-LF	40,98	4220,00	21,97	0,021
ViT	23,98	1099,23	16,08	0,732
Humano	35,36	2549,96	21,48	0,475

Tabla 2. Resultado de los algoritmos de regresión mediante CNN usando los canales RGB más los canales RE, NIR y DSM (dataset de 593 árboles, con 5-*fold cross validation*).

Modelo	MAE (kg)	MSE (kg^2)	MEAE (kg)	R^2
CNN-1	25,57	1229,17	17,31	0,710
CNN-2	25,07	1109,51	19,97	0,723
CNN-ST	24,23	1066,31	17,42	0,743
CNN-LF	25,14	1122,36	18,31	0,729
ViT	25,46	1639,23	13,53	0,599

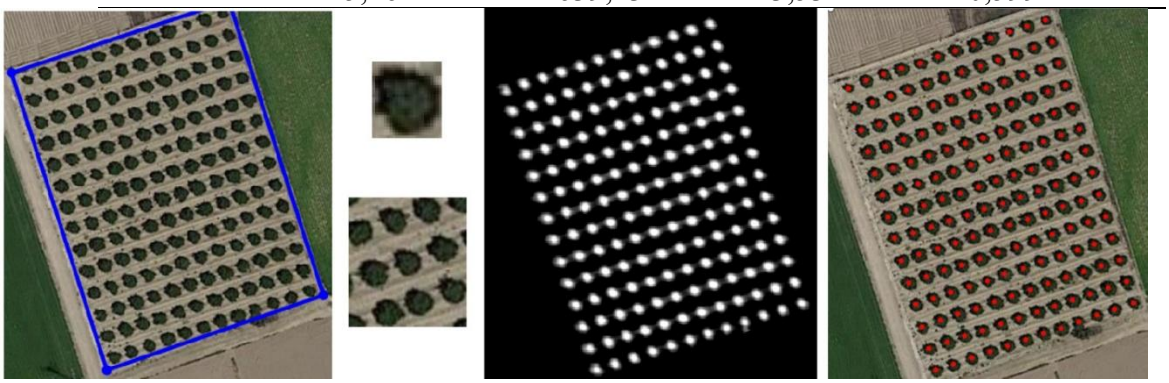


Fig. 1. Ejemplo de la aplicación del proceso de detección de los limoneros. De izquierda a derecha: finca seleccionada para el análisis; patrones buscados; resultado del *template matching* (suma de los patrones); localizaciones encontradas de los árboles.

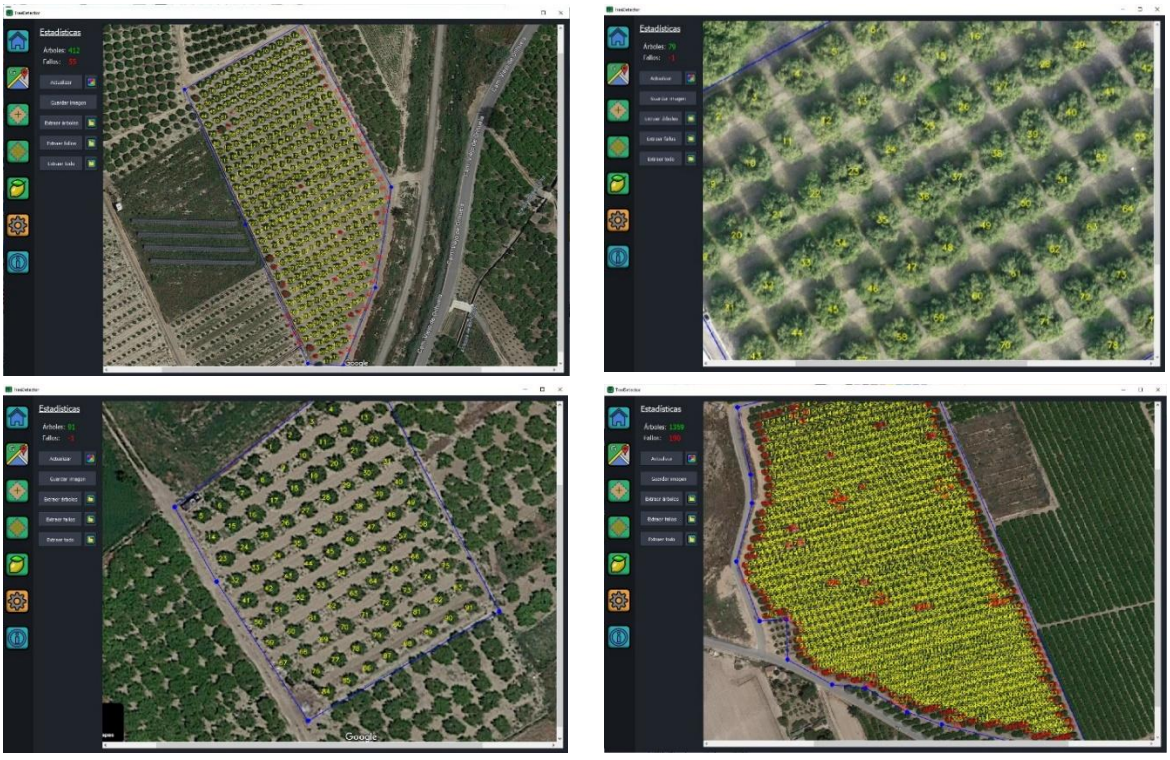


Fig. 2. Ejemplos de resultados de la localización y segmentación de árboles.

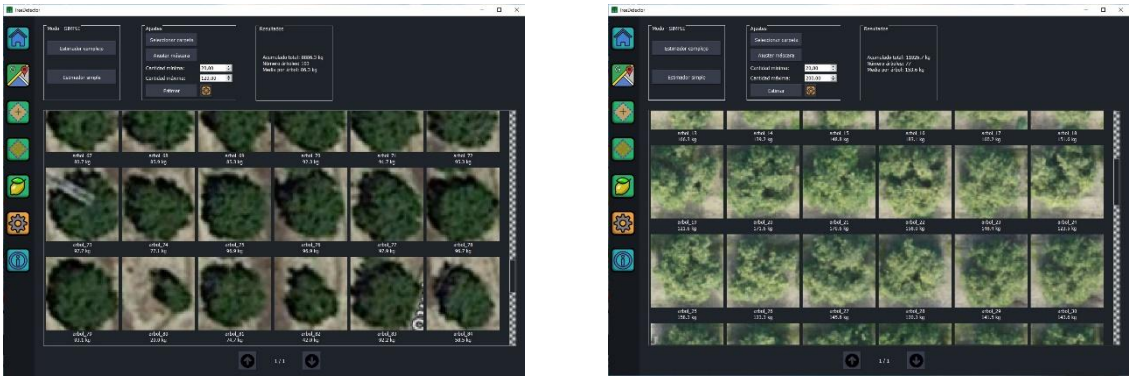


Fig. 3. Ejemplos de la estimación de la producción. Izquierda: usando imágenes de Google Maps. Derecha: usando imágenes RGB capturadas por un dron.

Efectos de dos estrategias de riego en la Respiración, Evapotranspiración y Estrés Hídrico del pistacho estimados mediante imágenes térmicas obtenidas con UAS

Rubén Vacas[1*], David Garcia[1], Lidia Nuñez[1], Sergio Vélez [2], Hugo Martín-Gutierrez[1], Raquel Martínez-Peña[3], Sara Álvarez [1]

[1]Instituto Tecnológico Agrario de Castilla y León (ITACyL). Valladolid, España.
[2]Group Agrivoltaics, Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE. Freiburg, Alemania.
[3]Centro de Investigación Agroambiental "El Chaparrillo" (CIAG). Ciudad Real, España.

***Autor para correspondencia**: ita-vacizqru@itacyl.es

Palabras clave: CWSI, ET, dron, teledetección.

Resumen

El pistachero se ha convertido en una de las especies de mayor interés debido a su adaptación a determinadas regiones en las que antes no era viable su cultivo. Sin embargo, la rentabilidad se ve afectada por factores como el clima y el riego que determinan la producción, haciendo necesario establecer una estrategia de riego adecuada para optimizar el uso del agua, maximizar la eficiencia fotosintética y asegurar una producción de alta calidad en dichas zonas. Las imágenes térmicas de la superficie del *canopy* obtenidas mediante dron permiten la monitorización de procesos fisiológicos clave como la respiración, la evapotranspiración o el índice de estrés hídrico. El objetivo de este trabajo fue analizar la respuesta a dos tratamientos de riego diferenciados, denominados riego control y riego alto, recibiendo el tratamiento de riego alto un 50% más de la cantidad aportada al control. El ensayo está ubicado en la provincia de Valladolid y los datos analizados corresponden a la campaña de 2023. Para su evaluación se emplearon ortofotografías térmicas con el objetivo de estimar la evapotranspiración a partir de un modelo de balance energético basado en DATTUTDUT. También se estimó la respiración del ecosistema a partir de mapas térmicos del dosel teniendo en cuenta el bioma y tipo de planta funcional en el modelo y por último se obtuvo el índice de estrés hídrico del Cultivo (CWSI).

Los resultados de este trabajo mostraron como la eficiencia hídrica y la respuesta del pistacho bajo distintas condiciones de riego, pueden contribuir a mejorar el desarrollo de estrategias de manejo que optimicen la producción permitiendo su adaptación a las condiciones climáticas de áreas específicas, como Castilla y León.

INTRODUCCIÓN

La superficie de pistacho (*Pistacia vera* L.) en Castilla y León ha experimentado una tasa de crecimiento anual promedio del 35%, debido a factores como la alta rentabilidad o su adaptación climática en determinadas zonas (Martín-Gutiérrez et al., 2020). En el año 2022 la superficie en la región era de 2832 ha, distribuidas fundamentalmente entre Valladolid y Zamora, de las cuales, alrededor de 1766 ha están en condiciones de regadío. El pistachero tiene una gran capacidad de

adaptación a lugares con escasos recursos hídricos, gracias a su capacidad para extraer agua del suelo. Incluso cuando se encuentra a potenciales muy bajos es capaz de mantener la fotosíntesis (Behboudian et al., 1986). Se caracteriza por un elevado consumo de agua, de la que solo es capaz de transformar en materia seca una pequeña parte (Couceiro et al., 2013). Sin embargo, a este cultivo se le considera uno de los de mayor productividad en relación a su consumo hídrico. El incremento productivo con aportaciones del 25% de la ETc máxima es considerable sin embargo aumenta muy poco con aportaciones superiores al 70% (Goldhamer et al., 1986). Además, una gestión hídrica adecuada aumenta el porcentaje de frutos abiertos respecto al de frutos vacíos y cerrados (Goldhamer y Beede. 2004).

Dado que el agua es un recurso cada vez más limitado. Las condiciones de estrés hídrico durante el comienzo del desarrollo del grano hasta la cosecha (Fase III) pueden afectar a los procesos fisiológicos del pistachero, incrementado el porcentaje de frutos vanos y cerrados. Por ello, es esencial mantener un monitoreo continuo y efectivo del estado hídrico de este cultivo.

Las tecnologías basadas en imágenes LWIR (infrarrojo de onda larga) permiten la adquisición de datos de temperatura precisos sobre los cultivos. El índice **CWSI**, basado en imágenes térmicas, es un indicador sensible al estrés hídrico en pistachos que permite distinguir claramente entre árboles bien regados y aquellos con riego deficitario (Testi et al., 2008). Otros autores señalan la alta correlación de este índice con varios parámetros de calidad del fruto (Martínez-Peña et al., 2023). Este indicador facilita el ajuste del riego, optimizando el uso del agua para maximizar el rendimiento.

Por otro lado, la estimación de la **respiración del ecosistema** (ER) proporciona información valiosa sobre la actividad metabólica del árbol, permitiendo evaluar su respuesta al estrés y su eficiencia en el uso de recursos. La respiración puede estimarse espacialmente a partir de la temperatura de superficie de la planta o del dosel mediante el modelo desarrollado por Heskel et al. (2016), que describe la relación entre la temperatura y el flujo de respiración en función del bioma o tipo funcional de la planta. Esta información es crucial para entender cómo las plantas responden fisiológicamente bajo diferentes condiciones de riego.

Además, las temperaturas de superficie (LST) son un indicador clave de la **evapotranspiración** (ET), otro aspecto fundamental para evaluar la demanda hídrica del cultivo. Temperaturas más frías en las plantas indican una mayor transpiración, asociada al enfriamiento por evaporación, mientras que temperaturas más altas pueden señalar una menor transpiración, indicando potencialmente una falta de agua. Mediante modelos de balance energético como DATTUTDUT (Timmermans et al., 2015), es posible predecir de forma detallada la distribución espacial de la evapotranspiración real únicamente a partir de imágenes térmicas del dosel (Ellsäßer et al., 2020), cuantificando la cantidad de agua que el árbol está utilizando y perdiendo a través de la transpiración.

Estas mediciones y modelos son fundamentales para comprender cómo el pistacho responde a distintas estrategias de riego bajo condiciones climáticas específicas que permitan desarrollar estrategias de manejo de riego que aseguren tanto la sostenibilidad como la eficiencia hídrica, adaptando el cultivo de pistacho a las condiciones específicas de la región y optimizando su calidad y producción El objetivo de este trabajo fue analizar cómo dos estrategias de riego diferenciadas influyen en los parámetros fisiológicos del árbol mediante el empleo de imágenes térmicas aéreas.

MATERIAL Y MÉTODOS

La parcela experimental de pistacho se localiza en La Seca (Valladolid) (Coordenadas ETRS89/UTM zona 30N, X: 341,455.662; Y: 4,589,735.763) a 753 m de altitud. El material vegetal femenino empleado es *Pistacia vera* cv Kerman plantado en 2013 sobre portainjerto UCB. La variedad masculina empleada fue cv Peter. El diseño de plantación adoptado fue un marco triangular de 7 m entre filas y 6 m entre plantas, con orientación NE-SW. Se siguieron prácticas agrícolas estándar, para control de plagas, enfermedades y malas hierbas. El clima es de tipo semiárido mediterráneo. La precipitación anual y ET_0 en 2023 fue respectivamente de 329 mm y 923 mm (Fig. 2).

El ensayo experimental ocupa 1 ha, dividido en dos sectores de riego. Cada sector mide 50 x 100 m e incluye 5 filas de árboles y 15 árboles por fila, sumando un total de 75 árboles por sector. Con líneas contiguas a ambos lados para amortiguar el efecto borde.

Los pistacheros fueron sometidos a dos tratamientos de riego diferenciados durante su fase de crecimiento. El tratamiento de **riego alto (A)** aplicó un 50% más de agua que el tratamiento de **control (C)**. Los árboles fueron regados de enero a octubre de 2023 mediante un sistema de riego por goteo controlado. En cada episodio de riego se ajustó la cantidad de agua aplicada en cada tratamiento en función de la temporada y las condiciones climáticas. En 2023, los árboles recibieron volúmenes totales de riego de 1380 m^3/ha para el tratamiento de **C** y 1970 m^3/ha para el tratamiento **A**. Esta variación sistemática en la provisión de agua se implementó para estudiar los efectos del riego diferencial en el crecimiento y la productividad de los pistacheros.

Las imágenes multiespectrales y térmicas aéreas se obtuvieron durante la campaña de 2023, a lo largo del ciclo vegetativo, en dos vuelos (19 de julio y 31 de agosto). Se utilizó un dron, o sistema de aeronave no tripulada, DJI Matrice 300 equipado con posicionamiento cinemático en tiempo real (RTK) y un sensor multiespectral Altum Micasense (AgEagle, Inc., Wichita, KS, EE. UU.). Este sensor capturó imágenes en seis bandas espectrales con las siguientes características: rojo (longitud de onda central: 680 nm; ancho de banda: 14 nm), verde (560 nm; 27 nm), azul (475 nm; 32 nm), borde rojo (717 nm; 12 nm), infrarrojo cercano (NIR; 842 nm; 57 nm) e infrarrojo de onda larga (LWIR; 11 µm; 6 µm). Los vuelos se realizaron a una altitud de 40 m sobre el nivel del suelo (AGL), con un solape frontal y lateral del 80% y 75%, respectivamente, y una velocidad de vuelo de 4 m/s. Al inicio y fin de cada vuelo se capturaron imágenes nadir de un panel de reflectancia para la calibración radiométrica. Las imágenes adquiridas se procesaron utilizando el software Agisoft Metashape (v1.7.6, Agisoft LLC, San Petersburgo, Rusia), generando dos ortofotos con una resolución espacial (GSD) de 1,73 cm/píxel en seis bandas espectrales.

Para evaluar la respuesta al estrés hídrico, respiración y evapotranspiración, se siguió la secuencia detallada en la Figura 1 empleando las ecuaciones y modelos que aparecen resumidos en la Tabla 2.

El cálculo del **CWSI** se realizó según la metodología establecida por Bian et al. (2019) que utiliza los píxeles puros de vegetación para calcular los promedios del 0.5% más bajo y 0.5% más alto de los valores de temperatura.

Para estimar la **Respiración del Ecosistema (ER)** se utilizó el Modelo Polinómico Global de Heskel et al. (2016). Para la cual se consideró al pistacho en el Bioma denominado "*Temperate Woodland*" (TeW), en el que se definen los valores de las variables a, b, c como -1.8958, 0.0974 y 0,00040 respectivamente.

Para obtener una estimación la **evapotranspiración** (**ET**) a partir de las imágenes térmicas se utilizó el modelo de balance de energía "DATTUTDUT", desarrollado por Timmermans et al. (2015) y el complemento para QGIS creado por Ellsäßer et al. (2020). El periodo de tiempo para el cual se calculó la ET fue 3600 segundos. Para mejorar la precisión del modelo se incluyó la temperatura del aire en el momento del vuelo. Las cuales fueron recogidas por termohigrómetros MX2301 (HOBO, Bourne, MS, EE. UU) situados en la parcela y que registraron medidas cada 30 minutos y que aparecen reflejadas en la Tabla 1.

Las imágenes fueron analizadas mediante QGIS (versión 3.16.15) con los complementos: QWaterModel y EcoRes y el lenguaje de programación computacional de código abierto R (R Core Team 2023)

El análisis estadístico se realizó mediante el método ANOVA, empleando el software Statgraphics Centurión XVI Versión 16.2.04.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los datos presentados en la Tabla 3 y Figura 2, muestran la respuesta del pistacho bajo los dos tratamientos de riego, analizados en dos fechas diferentes.

Se observó una diferencia significativa en el **CWSI** entre los tratamientos de riego en la fecha de 31 de agosto, lo que sugiere que, hacia el final del verano, los árboles sometidos al tratamiento **A** mostraron un menor estrés hídrico en comparación con el tratamiento **C**. Esto indica que la mayor disponibilidad de agua proporcionada por el riego alto fue efectiva para reducir el estrés en condiciones de mayor demanda hídrica. En la fecha de 19 de julio, las diferencias en el **CWSI** no fueron significativas, lo que podría deberse a condiciones climáticas más moderadas o una menor necesidad de riego en ese momento del ciclo de cultivo.

No se encontraron diferencias significativas en la respiración del ecosistema entre los dos tratamientos en ninguna de las fechas. Los valores de respiración fueron similares, lo que sugiere que, a pesar de la diferencia en el régimen de riego, la actividad respiratoria se mantuvo estable entre ambos tratamientos. Esto podría indicar que el riego adicional no impactó en los niveles de respiración, posiblemente debido a una regulación interna del metabolismo en respuesta a las condiciones de riego.

La evapotranspiración no mostró diferencias significativas entre los tratamientos en ninguna de las dos fechas. Los valores de **ET** fueron similares en ambos tratamientos y fechas, lo cual puede sugerir que la cantidad de agua adicional proporcionada en el tratamiento de riego alto no fue suficiente para generar un cambio detectable en la tasa de evapotranspiración estimada por el modelo, o que los árboles alcanzaron un umbral de regulación hídrica que limitó la diferencia de **ET**.

Aunque no se observaron diferencias significativas en la mayoría de los parámetros, la reducción del estrés hídrico en el tratamiento de riego alto a finales de agosto indica que una mayor disponibilidad de agua puede ser beneficiosa en momentos críticos de alta demanda hídrica. Estos resultados pueden guiar el ajuste de estrategias de riego en pistacho para optimizar el uso del agua y reducir el estrés hídrico en fases sensibles del ciclo de cultivo.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido posible gracias a la ayuda financiada por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y la Unión Europea «NextGenerationEU» //PRTR, con

número de concesión RYC2021-033890. Cofinanciado por fondos FEADER y el soporte de la Junta de Castilla y León.

REFERENCIAS

Bian, J., Zhang, Z. Chen, J., Chen, H., Cui, C., Li, X., Chen, S. and Fu, Q. 2019.Simplified Evaluation of Cotton Water Stress Using High Resolution Unmanned Aerial Vehicle Thermal Imagery. *Remote Sens.11,* 267.

Behboudian, M.H., Walker, R.R., Törökfalvy, E. 1986. Effects of Water Stress and Salinity on Photosynthesis of Pistachio. Sci. Hortic. 29, 251–261.

Couceiro J.F., Guerrero J., Mª Carmen G.L., Alfonso M.E., David P.L., Marina R.F. 2013. El cultivo del Pistacho. Mundiprensa, Madrid (España). 307 pp.

Ellsäßer, F., Röll, A., Stiegler, C., Hendrayanto, Hölscher, D. 2020. Introducing QWaterModel, a QGIS plugin for predicting evapotranspiration from land surface temperatures. Environmental Modelling & Software. Volume 130, 104739, ISSN 1364-8152.

Ellsäßer, F. 2021. QGIS3 Ecosystem Respiration Tool Plugin version 0.2 URL: https://plugins.qgis.org/plugins/ecores/

Goldhameer D., Beede, R., Phene, R.C. 1986. Water use Requirements and Deficit Irrigation Response of Pistachio (Pistacia vera L.) tres. Hortsciece,21.

Goldhamer, David, and Robert Beede. 2004. Regulated Deficit Irrigation Effects on Yield, Nut Quality and Water-Use Efficiency of Mature Pistachio Trees. The Journal of Horticultural Science and Biotechnology 79 (4): 538–45. doi:10.1080/14620316.2004.11511802.

Heskel, M.A., O'Sullivan, O.S., Reich, P.B., Tjoelker, M.G., Weerasinghe, L.K., Penillard, A., Egerton, J.J.G., Creek, D., Bloomfield, K.J., Xiang, J., Sinca, F., Stangl, Z.R., Martinez-de la Torre, A., Griffin, K.L., Huntingford, C., Hurry, V., Meir, P., Turnbull, M.H., Atkin, O.K.. 2016. Convergence in the temperature response of leaf respiration across biomes and plant functional types. Proc. Natl. Acad. Sci. 113, 3832–3837. https://doi.org/10.1073/pnas.1520282113

Idso, S.B., Jackson, R.D., Pinter, P.J., Reginato, R.J. and Hatfield, J.L. 1981. Normalizing the stress-degree day parameter for environmental variability. Agricultural Meteorology 24, 45–55.

Martin-Gutiérrez, H. Álvarez, S., Vacas, R., Barajas, E., Rubio, J.A. 2019. Condicionantes climáticos del cultivo del pistachero en Castilla y León. 2019. Horticultura Interempresas. Nº344, 40p-47p

Martínez-Peña, R., Vélez, S.,Vacas, R., Martín, H., Álvarez, S. 2023. Remote Sensing for Sustainable Pistachio Cultivation and Improved Quality Traits Evaluation through Thermal and Non-Thermal UAV Vegetation Indices. Appl. Sci. 13, 7716. https://doi.org/10.3390/app13137716

Testi, L., Goldhamer, D.A., Iniesta, F., Salinas, M. 2008. Crop Water Stress Index Is a Sensitive Water Stress Indicator in Pistachio Trees.Irrig. Sci.26, 395–405.

Timmermans, W.J., Kustas, W.P., Andreu, A. 2015. Utility of an automated thermal-based approach for monitoring evapotranspiration. Acta Geophys. 63, 1571–1608. https://doi.org/10.1515/acgeo-2015-0016.

Tablas

Tabla 1.- Temperatura del aire según día y hora de vuelo.

DOI 2023	Fecha	Hora inicio	Hora fin	Condiciones de sol	Tª Aire (ºC)	Humedad (%)
200	19-jul	12:10	12:25	Pleno sol	30,20	29,2
243	31-ago	11:10	11:25	Pleno sol	23,80	31,1

Tabla 2.- Índices. T_c, temperatura promedio del dosel adquirida usando la imagen térmica UAV después de la eliminación de pixeles puros del suelo; T_w, temperatura de referencia húmeda; T_{dry}, temperatura de referencia seca.

Índice	Descripción	Fórmula	Referencia
CWSI	Índice de Estrés Hídrico del Cultivo	$CWSI = (T_c - T_w) / (T_{dry} - T_w)$	Idso et al., 1981
ER (µmol/m²/s)	Respiración del Ecosistema	$\ln R = ER = a + bT + cT^2$	Heskel et al., 2016
ET (mm/período tiempo)	Evapotranspiración	DATTUTDUT (Modelo de balance energético)	Timmermans et al., 2015

Tabla 3.- Valores medios de los índices analizados en los dos tratamientos.

Parámetros	Fecha	C	A	Sig.
CWSI	19-jul.	0,355	0,361	ns
	31-ago.	0,443	0,384	*
ER (µmol/m²/s)	19-jul.	1,875	1,827	ns
	31-ago.	1,119	1,125	ns
ET (mm/h)	19-jul.	0,847	0,885	ns
	31-ago.	0,681	0,676	ns

*Significancia estadística. (Sig). * Diferencias significativas (p < 0,05). No significativo (ns)*

Figuras

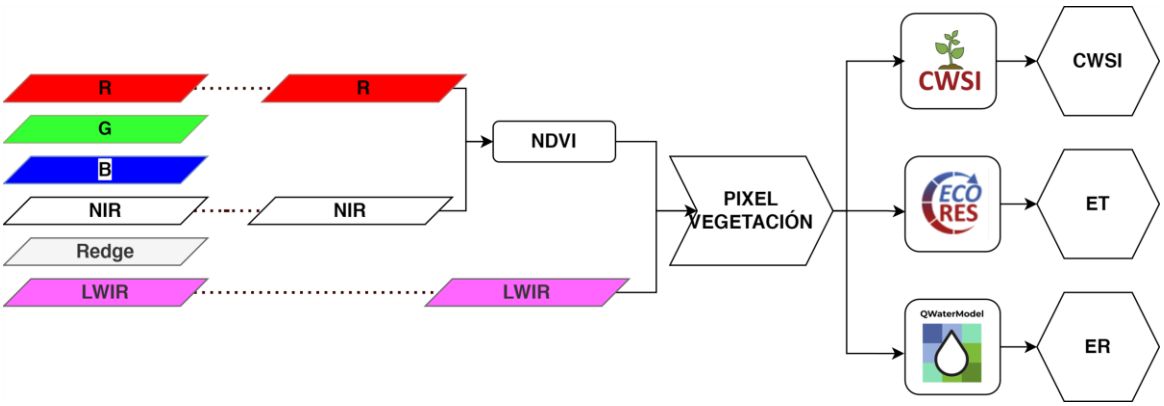


Fig. 1. Flujo de Trabajo para obtener el índice de estrés hídrico (CWSI), la evapotranspiración (ET) y la respiración del ecosistema (ER) a partir de imágenes multiespectrales y térmicas, procesando las diferentes bandas espectrales para identificar píxeles de vegetación.

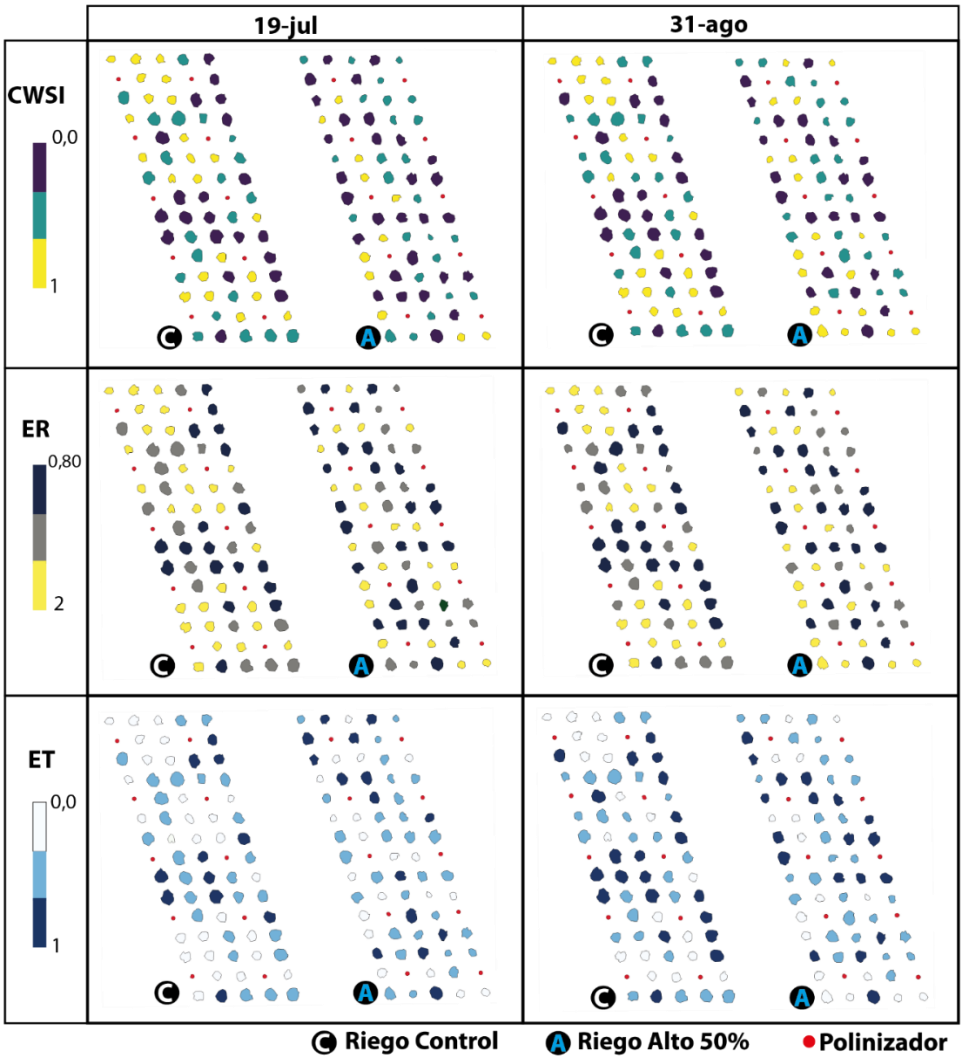


Fig. 1. Mapas de los parámetros CWSI, Respiración (ER) y Evapotranspiración (ET).

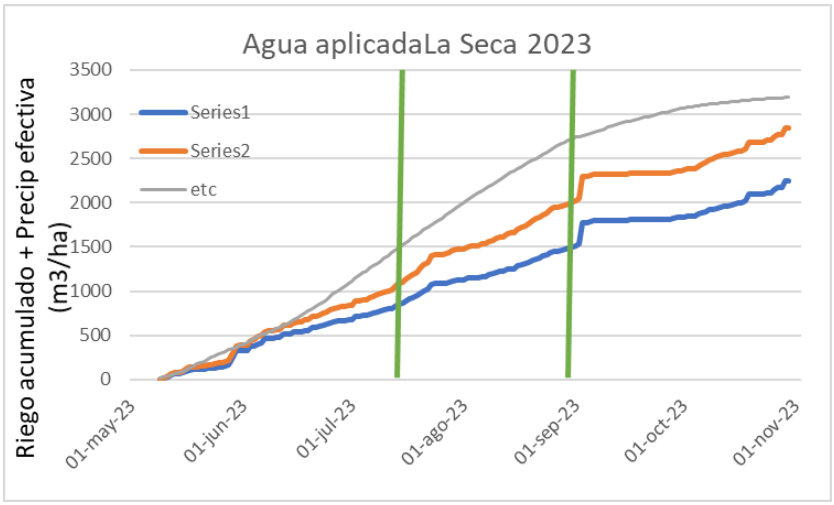


Fig. 2. Cantidad de agua aportada acumulada en cada tratamiento y su relación con la evapotranspiración del cultivo (ETc). Las líneas verdes representan los días de medida.

Efectos de la aplicación de bioestimulantes en el comportamiento agronómico del olivar a través de índices multiespectrales en Castilla y León

Rubén Vacas[1*], Daniel Martínez-Porro[1], Hugo Martín[1], Soraya Arín[1], David Garcia[1], Enrique Barajas [1]

[1]Instituto Tecnológico Agrario de Castilla y León (ITACyL). Valladolid, España

***Autor para correspondencia:** ita-vacizqru@itacyl.es

Palabras clave: AOVE, dron, sostenibilidad, teledetección, Zorzal.

Resumen

La agricultura es un pilar básico de la sociedad, suministra tanto alimentos como una gran variedad de materias primas. Además, debido al incremento de la población, la demanda de los productos también es mayor. Esto ha obligado a buscar diferentes formas de mejorar los rendimientos en la producción, reducir los tiempos de cultivo y aprovechar tierras hasta ahora inaccesibles. El principal método para potenciar las capacidades vegetales consistía en utilizar grandes cantidades de fertilizantes químicos, ocasionando contaminaciones en las aguas cercanas y alteraciones significativas en el ecosistema. En los últimos años se ha potenciado cada vez más el uso de compuestos orgánicos para reducir el consumo de las formulaciones químicas. Dentro de estas opciones cabe resaltar los bioestimulantes, los cuales son capaces de mejorar la eficiencia de las plantas en absorción y asimilación de nutrientes, en la tolerancia a estrés biótico, abiótico o mejorar alguna de sus características agronómicas. En este sentido, se han estudiado los efectos de la aplicación de bioestimulantes, compuestos por extractos de algas, en los parámetros productivos y de calidad de aceite de un olivar del cv. Zorzal situado en Valladolid, aplicados por un vehículo autónomo (AGV), con navegación RTK de alta precisión, durante 2023. Para evaluar el desarrollo vegetativo de los tratamientos experimentales establecidos (BIO y Testigo), se realizaron vuelos con dron obteniendo imágenes térmicas y multiespectrales de alta resolución con las que se calcularon los índices de vegetación: Índice Normalizado de Borde Rojo (NDRE), Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), Índice de Vegetación Normalizado Verde (GNDVI), Índice de Estrés Hídrico de Cultivo (CWSI) y el Área Cenital del Canopy (ACC). Los resultados obtenidos no han mostrado un efecto claro entre los tratamientos estudiados en los parámetros productivos, si bien se ha observado mayor extracción de aceite (método Abencor) en el tratamiento Control. De igual forma, los parámetros de calidad de aceite no han mostrado diferencias significativas, si bien el panel de cata ha discriminado el aceite del tratamiento experimental BIO en el atributo picante respecto al aceite del tratamiento Testigo. Los resultados obtenidos son preliminares ya que el efecto de este tipo de productos en un solo año es poco significativo, necesitando más campañas de estudio para poder sacar conclusiones más determinantes.

INTRODUCCIÓN

En Castilla y León, la superficie dedicada al cultivo del olivo es de aproximadamente 8.000 ha, la gran mayoría en secano. Distribuidas principalmente en las provincias de Ávila (3.800 ha), Salamanca (2.453 ha) y Valladolid (837 ha). La producción anual en la región ha sido superior a las 10.000 t (en años de carga) mientras que en años de descarga ha sido de entorno a las 4.000 t. En este contexto, la variedad Zorzal, originaria de la zona de Arribes, cobra especial relevancia, siendo la única variedad autóctona de Castilla y León, registrada en el banco de germoplasma de Córdoba. Esta variedad destaca por su notable resistencia a las heladas, adaptándose bien al clima de la región y presenta una alta capacidad productiva y un excelente rendimiento graso.

Por otro lado, los objetivos de la regulación agrícola actual promueven un cultivo más sostenible y respetuoso tanto con el medio ambiente como con los consumidores, limitando progresivamente el uso de materias activas. En consecuencia, se requiere una estrategia de manejo que permita combatir de manera rentable los efectos de plagas, enfermedades y el estrés hídrico y térmico. La aplicación de bioestimulantes en el olivar puede mitigar estos efectos, ya que tienen la capacidad de modificar la fisiología de las plantas, favoreciendo su crecimiento (Du Jardin, 2015). Este efecto mejora la respuesta de las plantas al estrés, sin embargo, ninguna estrategia se ha mostrado suficientemente efectiva para controlar la vecería del olivo, aunque es posible limitarla (Barranco et al., 2008). Además, los bioestimulantes contribuyen a reducir la dependencia de insumos, especialmente de fertilizantes nitrogenados, en línea con los objetivos de la Unión Europea en la estrategia “De la Granja a la Mesa”.

Los avances en la regulación de insumos agrícolas ofrecen nuevas oportunidades para mejorar el rendimiento y la sostenibilidad de los cultivos. A nivel europeo, el Reglamento (UE) 2019/1009 sobre productos fertilizantes establece disposiciones para la comercialización de productos fertilizantes en la Unión Europea, incluyendo por primera vez a los bioestimulantes de plantas. Este reglamento define al bioestimulante de plantas como un producto que estimula los procesos de nutrición de las plantas, independientemente del contenido de nutrientes del producto, con el objetivo de mejorar características clave como la eficiencia en el uso de nutrientes, la tolerancia al estrés abiótico, las características de calidad y la disponibilidad de nutrientes en el suelo. A nivel nacional, en España, la comercialización de productos fertilizantes, está regulada por el Real Decreto 506/2013, de 28 de junio, sobre productos fertilizantes. Este decreto ha sido modificado en varias ocasiones para adaptarse a los avances tecnológicos y a las normativas europeas, incorporando productos fertilizantes basados en microorganismos.

La integración de tecnologías avanzadas, como drones y vehículos autónomos, está transformando la agricultura, aumentando la precisión y eficiencia en la aplicación de insumos. En este estudio, se emplearon drones para realizar mediciones multiespectrales en olivares, lo que permitió un análisis detallado del estado vegetativo de los árboles. La aplicación de bioestimulantes se llevó a cabo mediante un pulverizador terrestre autónomo controlado en tiempo real a través de tecnología 5G, lo cual garantizó una distribución precisa y controlada. El objetivo de este trabajo fue evaluar los efectos de la aplicación de bioestimulantes en la producción y calidad del aceite de la variedad Zorzal durante la campaña de 2023.

MATERIAL Y MÉTODOS

El olivar experimental se localiza en una parcela de 0,42 ha de la finca Zamadueñas (Valladolid), perteneciente al Instituto Tecnológico Agrario de Castilla y León (X: 357.718,61, Y:

4.617 .834,08 en ETRS89/UTM zona 30N) a 701 m de altitud. El material empleado es *Olea europaea* L cv. "Zorzal", plantado en 2013, con un marco de plantación de 6 x 4 m (415 árboles/ha). La orientación de filas es N-S. El sistema de conducción es en vaso. El suelo del ensayo es de textura franco-arcillosa con elementos gruesos en superficie. El clima en la zona es semiárido mediterráneo con una precipitación media anual para el año 2023 de 423 mm. Las operaciones culturales llevadas a cabo consisten en abonado periódico de carácter orgánico en forma de pellet, labores en régimen de mínimo laboreo con pase superficial de cultivador entre calles, aplicación de los tratamientos fitosanitarios requeridos, poda en invierno y riego por goteo en función de la evapotranspiración potencial del cultivo.

El diseño experimental se realizó en bloques al azar (Fig. 1) con dos tratamientos: i) combinación de Bioestimulantes no microbianos de aplicación foliar (**BIO**) y ii) Control, sin aplicación de estos productos (**T**). En el tratamiento **BIO**, las repeticiones I, II y III incluyeron 12 olivos (4 de control y 8 de efecto borde), mientras que la repetición IV contó con 15 olivos (5 de control y 10 de efecto borde). Para el tratamiento testigo (**T**), las repeticiones I, II y III contaron con 16 olivos (8 de control y 8 de efecto borde), y la repetición IV con 20 olivos (10 de control y 10 de efecto borde).

Los productos empleados en el ensayo experimental, fueron: a) Bioestimulante 1: Abono liquido con extracto de algas y aminoácidos, incorporando extracto de algas de la especie *Ascophyllum nodosum*. b) Bioestimulante 2: Mezcla líquida de aminoácidos y extracto de algas. Ambos calificados en el Grupo 4, Otros abonos y productos especiales según el RD 506/2013, de 28 de junio, sobre productos fertilizantes. La aplicación foliar fue realizada en cinco fechas distintas del ciclo vegetativo, según figuran en la tabla 1. En el tratamiento **BIO** todas las aplicaciones se realizaron mediante un AGV XAG-R150 con navegación autónoma mediante posicionamiento kinemático en tiempo real (RTK) de alta precisión, equipado con sistema atomizador (60 –200 µm) XAG JetSprayer para productos fitosanitarios y un depósito con capacidad para 100 litros de producto. La dosis empleada de bioestimulante 1 fue de 1,5 ml/L y de bioestimulante 2 fue de 4 ml/L con un volumen total aplicado de 140 L por tratamiento.

El trabajo se llevó a cabo durante la campaña 2023, realizando a lo largo del ciclo de vegetación un total de 4 vuelos en las fechas indicadas en la tabla 1, coincidiendo con el mediodía solar. Para ello se utilizó un UAV, DJI Matrice 300 con (RTK), equipado con un sensor multiespectral (Altum, Micasense, Inc., Seattle, WA, USA) que permite capturar imágenes georreferenciadas con precisión centimétrica de 2064 x 1544 (3,2 MP) de resolución e imágenes térmicas de 160 x 120, con las siguientes características de las bandas espectrales: roja (centro de longitud de onda: 680 nm; ancho de banda: 14 nm), verde (560 nm; 27 nm), azul (475 nm; 32 nm); Red Edge (717nm; 12nm), NIR (842 nm; 57 nm) y LWIR (11 µm; 6µm). La altitud de vuelo fue de 40 m sobre nivel del suelo (AGL). El solape frontal y lateral se estableció en 80% y 75% respectivamente. La velocidad de vuelo se fijó en 3 m/s. Las imágenes adquiridas fueron procesadas mediante el software Agisoft Metashape (v1.7.6 Agisoft LLC, San Petersburgo, Rusia). Se obtuvo un total de 4 ortofotos, geométrica y radiométricamente calibradas, de 1,73 cm/píxel de GSD con 6 bandas espectrales. Para evaluar la respuesta al estrés hídrico, área foliar, vigor y desarrollo vegetativo, se calcularon los siguientes índices de vegetación (IVs): ACC, CWSI, NDVI, NDRE y GNDVI, cuyas fórmulas se detallan en la tabla 2.

El cálculo del CWSI se realizó según la metodología establecida por Bian et al**.** (2019). Este método consiste en la obtención de pixeles puros de vegetación (PPV) mediante la segmentación

con valores de NDVI según el umbral entre vegetación y suelo. A continuación, se calculan los histogramas de temperatura usando específicamente píxeles de vegetación pura de olivo. El ACC se obtuvo a partir de los PPV y corresponde al área de cobertura de las copas.

La estimación de la producción de aceituna se llevó a cabo a través de la recolección manual de un olivo por repetición y tratamiento, situado dentro de las filas control. La determinación del peso medio de la drupa se realizó mediante muestreo de 100 aceitunas en cada olivo recolectado. La determinación del rendimiento en aceite se realizó mediante el método Abencor (Martínez et al., 1975) a partir de las muestras de aceituna de los olivos estudiados.

Para determinar la calidad del aceite de oliva se analizaron los siguientes parámetros: mediante volumetría, cantidad de ácidos grasos libres presentes en el aceite expresados en ácido oleico (%) (grado de acidez) y estado de oxidación inicial del aceite (índice de peróxidos). Mediante espectrofotometría se determinaron los coeficientes ultravioletas que indican la presencia de compuestos de oxidación complejos: K232, K270 y ΔK. Además de ésteres etílicos mediante cromatografía de gases.

La valoración organoléptica se llevó a cabo a través de un análisis sensorial realizado por un panel de cata reconocido en el que se evaluaron los atributos de frutado, amargo y picante, así como defectos, para determinar la calidad del aceite de cada muestra.

Para llevar a cabo el análisis de las imágenes se empleó el programa QGIS (versión 3.16.15). El análisis estadístico se realizó mediante el método ANOVA, empleando el software SPSS versión 16.0.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para analizar el impacto de la aplicación de bioestimulantes en el rendimiento agronómico de los olivos, se evaluaron varios **índices de vegetación**, cuyos resultados se muestran en la tabla 4.

No se observaron diferencias significativas en el ACC entre los tratamientos BIO y T, en ninguna de las fechas de evaluación. Los valores de ACC para ambos tratamientos siguieron una tendencia similar, alcanzando su punto máximo a finales de agosto.

El estrés hídrico (CWSI) no mostro diferencias significativas entre tratamientos hasta el mes de octubre (Fig. 2). en el que se observó una diferencia significativa entre BIO y control. Esta diferencia puede sugerir un leve efecto de los bioestimulantes en la reducción del estrés hídrico al final de la campaña.

Los valores de NDVI no mostraron diferencias significativas entre los tratamientos BIO y T en ninguna de las fechas. Ambos tratamientos presentaron valores similares a lo largo de la campaña, con una ligera disminución en agosto y un leve repunte en octubre.

Tampoco se observaron diferencias significativas en el NDRE ni en el GNDVI, entre los tratamientos. Los valores del NDRE y GNDVI siguieron una tendencia similar a lo largo de las fechas, lo cual es consistente con un estado vegetativo sin cambios drásticos. La falta de diferencias en el NDVI indica que la aplicación de bioestimulantes no tuvo un efecto notable en el vigor vegetativo o en la densidad de la vegetación. Esto podría deberse a la naturaleza de los bioestimulantes, que no necesariamente promueven el crecimiento vegetativo de manera inmediata, sino que mejoran la respuesta al estrés en condiciones adversas.

Los **parámetros de producción** (Tabla 3) no mostraron ninguna diferencia estadísticamente significativa entre los tratamientos BIO y T. Sin embargo, se observó una diferencia significativa

en el la extracción de aceite con un menor porcentaje de rendimiento para el tratamiento BIO.

Los valores de los parámetros del **análisis químico** (Tabla 3) evaluados son similares en los dos tratamientos estudiados, no siendo significativos en ninguno de los dos casos. La calidad química del aceite no fue afectada por la aplicación de bioestimulantes, manteniendo niveles de acidez y estabilidad oxidativa similares en ambos tratamientos.

En cuanto al **análisis sensorial** realizado (Tabla 3), la clasificación del panel de cata fue de "oliva virgen extra" y una calificación para la mayoría de los panelistas como Frutado Verde, Equilibrado para ambos tratamientos. El tratamiento BIO mostró diferencias con significación estadística a su favor en el atributo picante. Por otro lado, el tratamiento BIO presenta mejores valores en los atributos de frutado y amargo, aunque sin encontrarse diferencias estadísticamente significativas. Los datos del panel de cata indican una mejora de calidad del aceite del tratamiento BIO frente al tratamiento T.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este primer año de estudio indican que la aplicación de bioestimulantes en el olivar de la variedad Zorzal, no produjeron efectos significativos en la producción ni en los parámetros químicos analizados en el corto plazo. El menor rendimiento de aceite asociado a la aplicación de bioestimulantes se atribuye principalmente a su capacidad de alterar la fisiología de las plantas, posiblemente retrasando la maduración y limitando la acumulación de aceite en el fruto. Sin embargo, los efectos observados en el CWSI y el perfil sensorial indican que los bioestimulantes podrían tener beneficios específicos bajo ciertas condiciones de estrés. Estos efectos merecen ser evaluados en campañas futuras para eliminar factores como la vecería, incluyendo análisis foliares para conocer el estado nutricional del árbol en más profundidad.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido posible gracias al proyecto "5G con Facilidades de Network-as-Code para Aplicaciones sobre Red Móvil" (5GNaCar) y al soporte de la Junta de Castilla y León, en colaboración con las empresas NOKIA SPAIN S.A y APTICA S.L.

REFERENCIAS

Barranco, D., Fernandez-Escobar, R., Rallo, L. 2008. El Cultivo del Olivo. Mundi-Prensa, Madrid.

Bian, J., Zhang, Z. Chen, J., Chen, H., Cui, C., Li, X., Chen, S. and Fu, Q. 2019.Simplified Evaluation of Cotton Water Stress Using High Resolution Unmanned Aerial Vehicle Thermal Imagery. *Remote Sens.11,* 267.

Comisión Europea. 2019. Reglamento (UE) 2019/1009 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 5 de junio de 2019, por el que se establecen disposiciones relativas a la puesta a disposición en el mercado de los productos fertilizantes UE y se modifican los Reglamentos (CE) n.o 1069/2009 y (CE) n.o 1107/2009 y se deroga el Reglamento (CE) n.o 2003/2003. Diario Oficial de la Unión Europea.
http://data.europa.eu/eli/reg/2019/1009/2024-07-03

Du Jardin, P. 2015. Plant biostimulants: Definition, concept, main categories and regulation. Scientia Horticulturae, Volume 196, 2015, Pages 3-14, ISSN 0304-4238, https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.021

Martínez Suárez, J.M., Martínez Suárez, J.M., Muñoz Aranda, E., Alba Mendoza, J., Lanzón Rey, A. (1975). «Informe sobre utilización del analizador de rendimientos "Abencor"». Grasas y Aceites, 26 (6), 379-38.

Real Decreto 506/2013, de 28 de junio, sobre productos fertilizantes. Boletín Oficial del Estado, 29 de junio de 2013 (164). https://www.boe.es/eli/es/rd/2013/06/28/506/com

Tablas

Tabla 1.- Periodo en los que se realizaron los tratamientos y los vuelos multiespectrales.

Operación	**Jun**	**Jul**		**Ago**		**Sep**	**Oct**	**Nov**
Bioestimulante 1	23-jun	06-jul	27-jul	.	.	.	.	.
Bioestimulante 2	23-jun	06-jul	27-jul	.	25-ago	15-sep	.	.
Vuelos	21-jun	11-jul	.	.	30-ago	.	06-oct	.
Cosecha	.	.	.	.	.	.	.	15-nov

Tabla 2.- Índices de vegetación (IVs). *NIR*, infrarrojo cercano; *RE*, borde rojo; T_l, temperatura promedio del dosel adquirida usando la imagen térmica UAV después de la eliminación de pixeles puros del suelo; T_{wet}, temperatura de referencia húmeda; T_{dry}, temperatura de referencia seca.

Descripción	Índice	Fórmula	Medida	Referencia
Área Cenital del Canopy	ACC	$ACC=PPV * GSD$	Área foliar cenital	(Smart y Robinson, 1991)
Índice Normalizado de Vegetación	NDVI	$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$	Vigor, cantidad, calidad desarrollo vegetación	(Rouse et al., 1973)
Índice de Estrés Hídrico del Cultivo	CWSI	$CWSI = \frac{(T_l - T_{wet})}{(T_{dry} - T_{wet})}$	Tasa de transpiración relativa	(Idso et al., 1981)
Diferencia Normalizada de Borde Rojo	NDRE	$NDRE = \frac{(\mathrm{NIR} - \mathrm{RE})}{(\mathrm{NIR} + \mathrm{RE})}$	Cantidad de clorofila	(Gitelson y Merzlyak, 1994)
Vegetación de Diferencia Normalizada Verde	GNDVI	$GNDVI = \frac{(\mathrm{NIR} - \mathrm{Green})}{(\mathrm{NIR} + \mathrm{Green})}$	Consumo de agua y Nitrógeno	(Gitelson et al., 1996)

Tabla 3.- Valores medios de los parámetros en los dos tratamientos.

Parámetros		**BIO**	**T**	**Sig.**
Producción	Producción (kg/árbol)	35,33	34,65	ns
	Rendimiento (t/ha)	14,72	14,44	ns
	Peso drupa (g)	2,35	2,37	ns
Rto. Aceite	aceite (%)	10,81	16,91	*
Análisis químico	Acidez (% de ácido oleico)	0,19	0,19	ns
	Índice peróxidos (meq O_2/Kg)	8,55	6,50	ns
	K232	1,92	1,98	ns
	K270	0,19	0,19	ns
Panel de Cata	Frutado	6,03	5,00	ns
	Amargo	4,03	3,80	ns
	Picante	4,53	4,05	*

Significación estadística (Sig):(ns) no significativo. (*) diferencias significativas al nivel de p<0.05%.

Tabla 4.- Valores medios de los índices de vegetación analizados en los DOS tratamientos. Aplicación con bioestimulantes foliares (BIO) y Control sin aplicación (T).

Índice	**Fecha**	**BIO**	**T**	**Sig.**
ACC (m2)	21-jun.	8,03	8,08	ns
	11-jul.	8,61	8,52	ns
	30-ago.	9,90	9,80	ns
	6-oct.	9,10	9,14	ns
CWSI	21-jun.	0,346	0,340	ns
	11-jul.	0,261	0,270	ns
	30-ago.	0,281	0,300	ns
	6-oct.	0,47	0,491	*
NDVI	21-jun.	0,708	0,703	ns
	11-jul.	0,669	0,673	ns
	30-ago.	0,627	0,623	ns
	6-oct.	0,664	0,657	ns
NDRE	21-jun.	0,454	0,454	ns
	11-jul.	0,420	0,429	ns

	30-ago.	0,374	0,378	ns
	6-oct.	0,387	0,389	ns
GNDVI	21-jun.	0,657	0,655	ns
	11-jul.	0,623	0,628	ns
	30-ago.	0,374	0,378	ns
	6-oct.	0,657	0,655	ns

(Sig)Significación estadística. (ns) no significativo. (*) diferencias significativas al nivel de p<0.05%



Fig. 1. Croquis del ensayo experimental en la plantación de olivos de la variedad Zorzal.

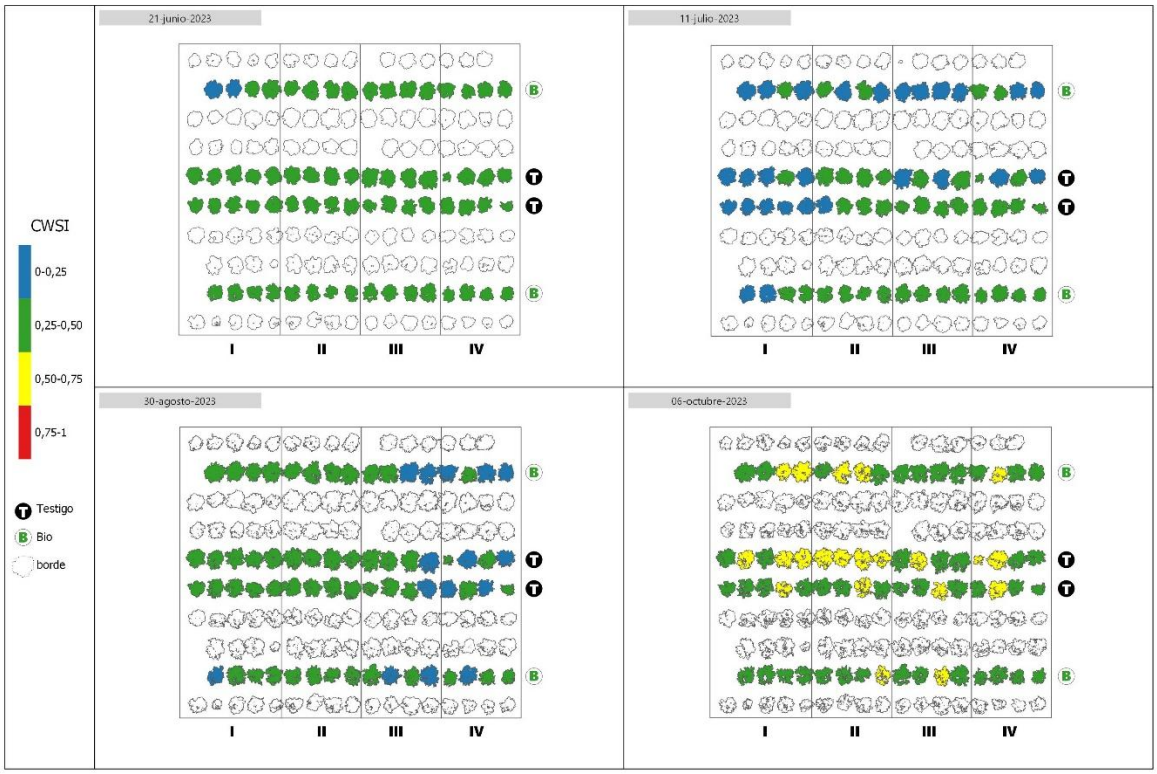


Fig. 2. Detalle del índice de estrés hídrico (CWSI) en el olivar.


Fig. 2. XAG-R150 en modo autónomo aplicando bioestimulantes.

Estimación mediante fotografía digital de la altura de planta a partir de la fracción de cobertura vegetal en un cultivo de Bimi®

J.C. Abellaneda Pividal[1], D.G. Fernández-Pacheco[1*], J.M. Molina-Martínez[1]

[1] Grupo de investigación de Ingeniería Agromótica y del Mar, Universidad Politécnica de Cartagena, C/ Ángel s/n, Ed. ELDI E1.06, 30203, Cartagena, Murcia.

*** Autor para correspondencia:** daniel.garcia@upct.es

Palabras clave: agricultura de precisión, fracción de área sombreada, procesamiento digital de imágenes, brócoli.

Resumen

La estimación precisa de la altura de planta es esencial para el manejo eficiente y el monitoreo del crecimiento de los cultivos, obteniendo así información relativa a los requerimientos de agua y posibilitando una gestión más eficiente del riego. Esta comunicación presenta un enfoque innovador utilizando fotografía digital para inferir la altura de las plantas a partir de la fracción de cobertura vegetal (FCV) en un cultivo de Bimi®, un híbrido entre el brócoli convencional y el brócoli chino o kailan, con un sabor dulce y suave, y un tallo similar al de un espárrago. Empleando una cámara digital, se capturaron imágenes de alta resolución en cuatro parcelas de Bimi® en diferentes etapas de desarrollo. Las imágenes fueron preprocesadas y segmentadas utilizando el software de visión ENVI® Classic. Posteriormente se desarrollaron modelos matemáticos que correlacionan la FCV con la altura de las plantas, utilizando datos de campo recolectados simultáneamente como referencia. Los resultados mostraron una correlación significativa entre la fracción de cobertura vegetal y la altura de las plantas de Bimi®, permitiendo la estimación precisa de la altura a partir de datos de imagen. Este método no invasivo y eficiente ofrece una alternativa prometedora a las mediciones manuales tradicionales, mejorando la toma de decisiones en el manejo de cultivos y contribuyendo a la optimización de recursos y el incremento de la productividad agrícola.

INTRODUCCIÓN

La estimación de la altura de las plantas en cultivos es un parámetro fundamental en el monitoreo agronómico, ya que está correlacionada con el vigor y la productividad del cultivo. Tradicionalmente, esta medición se realiza de forma manual, lo cual implica un consumo significativo de tiempo y esfuerzo, especialmente en extensiones de cultivo grandes. En los últimos años, la fotografía digital ha supuesto una herramienta esencial para la estimación no destructiva de parámetros vegetativos, como la fracción de cobertura vegetal (FCV), que representa el área cubierta por la vegetación en relación con el suelo visible. Este parámetro se obtiene mediante segmentación y análisis de las imágenes obtenidas del cultivo, pudiendo encontrarse en la literatura varios trabajos que lo aplican (García-Mateos et al., 2015, Hernández-Hernández et al., 2016, Hernández-Hernández et al., 2017). Si bien existen algunos estudios que relacionan esta fracción de cobertura vegetal con la altura de la planta en cultivos de lechuga (Fernández-Pacheco et al., 2014), no se ha encontrado nada aplicado a un cultivo de Bimi®, un híbrido entre el brócoli convencional y el brócoli

chino o kailan, con un sabor dulce y suave, y un tallo similar al de un espárrago.

En este artículo se propone una metodología para obtener la fracción de cobertura vegetal en un cultivo de Bimi® y estimar a partir de ella la altura de la planta, permitiendo así conocer el desarrollo de la planta en todo momento y poder estimar sus necesidades hídricas.

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo se desarrolló durante un periodo de 91 días, desde febrero hasta mayo de 2024, sobre un cultivo comercial de Bimi® ubicado en Lorca, provincia de Murcia, España. Las fotografías de la cubierta vegetal se realizaron sobre 4 parcelas de muestreo de 0,5 m^2 (0,5m x 1m), representativas del cultivo y distribuidas aleatoriamente por la finca evitando la zona externa de la plantación para eliminar el efecto borde. Las parcelas estaban convenientemente señalizadas mediante estacas ubicadas en las esquinas de cada parcela. Cada estaca presentaba marcas a intervalos de 20cm desde el suelo, alcanzando una altura total de 1,2m (Fig. 1a). Las fotografías se realizaron a partir del primer día de trasplante a intervalos de 6-7 días, en cada una de las parcelas muestreadas, lo que supuso la obtención de 52 imágenes. Adicionalmente se midió la altura de la planta para cada uno de los días muestreados, con el fin de establecer posibles relaciones entre ésta y la fracción de cobertura vegetal.

Las fotografías se realizaron verticalmente sobre el cultivo a una altura de 2,40 m sobre el nivel del suelo. Para hacer coincidir la fracción de suelo cubierto por vegetación con la fracción de área sombreada por la planta, las fotografías fueron tomadas al mediodía solar.

Las imágenes digitales obtenidas fueron procesadas con el software ENVI Classic v5.0, desarrollado por Exelis Visual Information Solutions, obteniendo la fracción de cobertura vegetal para cada una de las parcelas (Fig. 1b).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 2 se muestran los resultados del cálculo de la fracción de cobertura vegetal mediante el análisis de las fotografías con ENVI para los días 15, 29, 43, 57, 71 y 85. También se indica la altura medida de la planta.

Los valores obtenidos de la FCV y la altura alcanzada por la planta para cada uno de los días muestreados quedan reflejados en la Figura 3.

El análisis de los datos ha permitido establecer una relación entre la FCV con la altura de la planta, obteniéndose una ecuación de tipo polinomial capaz de estimar la altura de la planta a partir de la información obtenida de la fotografía de la cubierta vegetal, con una alta correlación ($R^2 = 0,9856$) (ver Fig. 4).

AGRADECIMIENTOS

Este estudio forma parte del Programa AGROALNEXT que ha sido financiado por MICIN con fondos NextGenerationEU (PRTR-C17.I1) y por la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia a través de la Fundación Séneca - Agencia de Ciencia y Tecnología de la Región de Murcia.

REFERENCIAS

Fernández-Pacheco, D.G., Escarabajal-Henarejos, D., Ruiz-Canales, A., Conesa, J. and Molina-Martínez, J.M. (2014). A digital image-processing-based method for determining the crop coefficient of lettuce crops in the southeast of Spain. Biosystems Engineering 117: 23-34.

García-Mateos, G., Hernández-Hernández, J.L., Escarabajal-Henarejos, D., Jaén-Terrones, S. and Molina-Martínez, J.M. (2015). Study and comparison of color models for automatic image analysis in irrigation management applications. Agricultural Water Management 151: 158-166.

Hernández-Hernández, J.L., García-Mateos, G., González-Esquiva, J.M., Escarabajal-Henarejos, D., Ruiz-Canales, A., Molina-Martínez, J.M. (2016). Optimal color space selection method for plant/soil segmentation in agriculture. Computers and Electronics in Agriculture 122: 124-132.

Hernández-Hernández, J.L., Ruiz-Hernández, J., García-Mateos, G., González-Esquiva, J.M., Ruiz-Canales, A., Molina-Martínez, J.M. (2017). A new portable application for automatic segmentation of plants in agriculture. Agricultural Water Management 183: 146-157.

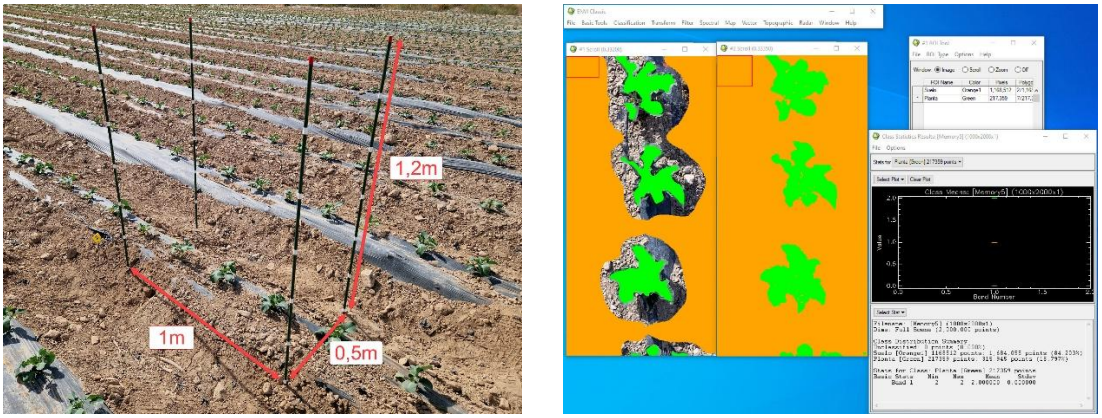


Figura 1. a) Marcación de las parcelas. b) Cálculo FCV con ENVI

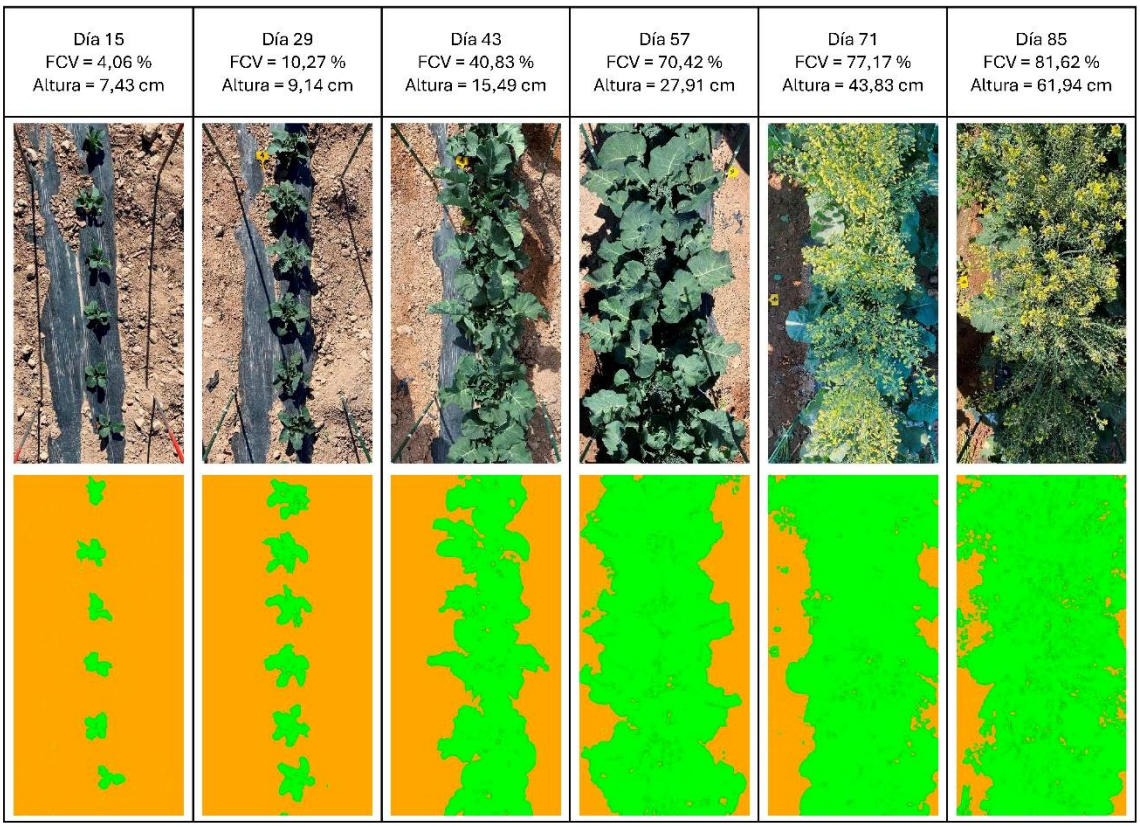


Figura 2. Imágenes del cultivo y cálculo de la FCV mediante ENVI para varios días

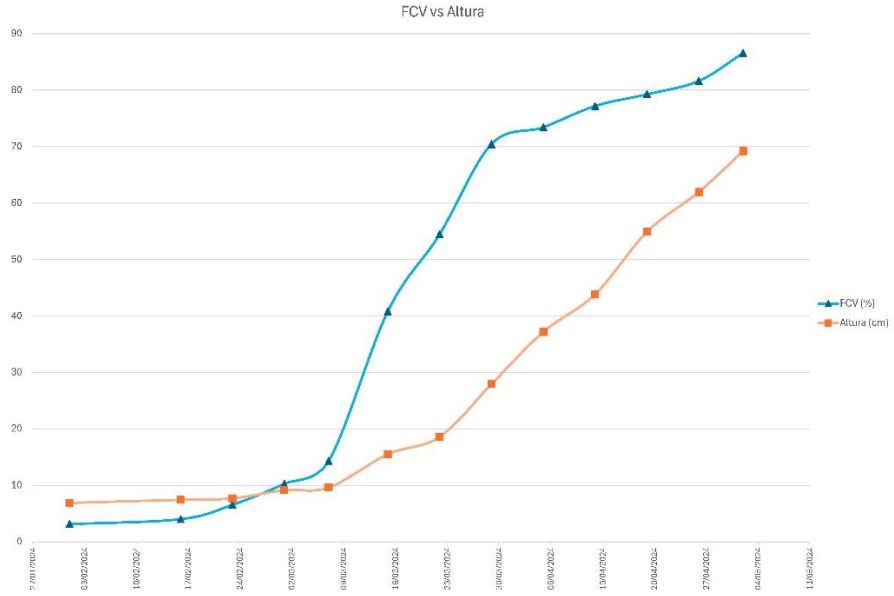


Figura 3. Evolución de la FCV y de la altura de las plantas a lo largo del ciclo de cultivo

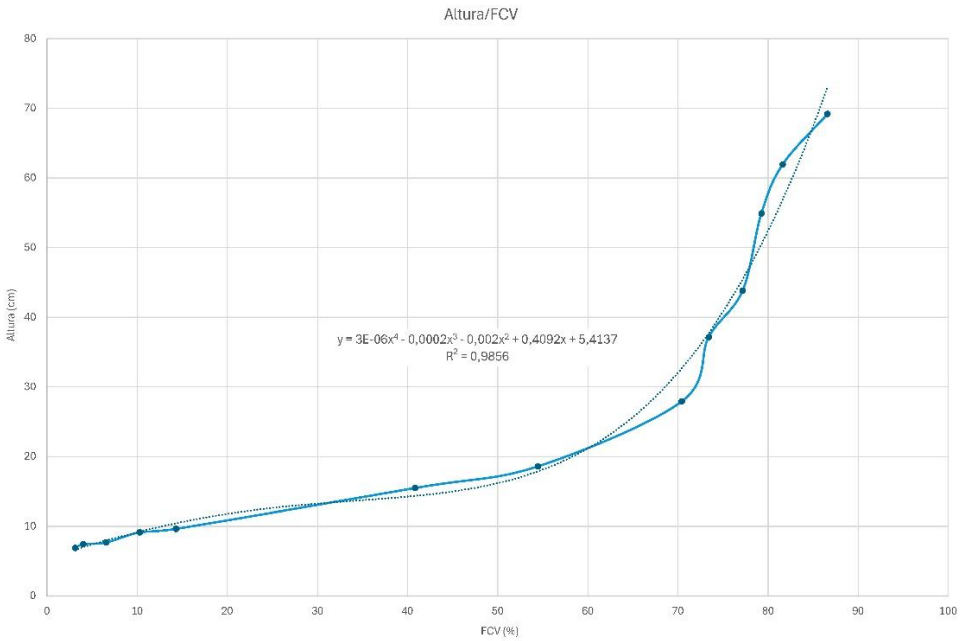


Figura 4. Evolución de la altura de la planta en función de la FCV

Evaluación del impacto del riego con agua marina desalinizada en un cultivo de pomelo en el sureste español mediante monitorización con datos de campo y remotos de dron

A. Imbernón-Mulero[a], B. Gallego-Elvira[a], J.F. Maestre-Valero[a], V. Martínez-Alvarez[a], C. Barrera[b] y C. Ortega[c]

[a] Departamento de Ingeniería Agronómica, Universidad Politécnica de Cartagena, Paseo Alfonso XII Nº48, 30203, Cartagena, alberto.imbernon@edu.upct.es (A.I.M); belen.gallego@upct.es (B.G.E); josef.maestre@upct.es (J,F.M.V); victoriano.martinez@upct.es (V.M.A)
[b] Fora Forest Technologies S.L.L, Campus Universitario Duques de Soria, s/n, 42004, Soria, carlos.barrera@fora.es (C.B)
[c] AEROMEDIA UAV, Centro de negocios BK 1º, Carretera NVI, 15165, A Coruña, cesar.ortega@aeromedia.es (C.O)

Palabras clave: seguimiento agronómico, análisis remoto, fitotoxicidad, respuesta multiespectral, teledetección.

Resumen:

En la última década, el sureste de España ha incrementado el uso de agua marina desalinizada (AMD) para el riego agrícola, con el fin de mitigar la escasez hídrica. Sin embargo, la particular composición química del AMD, caracterizada por su baja conductividad eléctrica y relativamente altas concentraciones de boro, sodio y cloro, puede generar acumulaciones en los cultivos y el suelo, lo que conlleva riegos de fitotoxicidad y sodificación. Esto subraya la necesidad de un monitoreo agronómico constante y temprano para prevenir daños a largo plazo. Actualmente, además de los de análisis foliares y de suelo tradicionales, la teledetección mediante drones permite obtener datos multiespectrales, LiDAR y ortofotos con alta resolución espacial, que ofrecen una información detallada de la respuesta espectral del cultivo en diferentes situaciones ambientales y de manejo agronómico. En este estudio, se monitoreó una parcela comercial de pomelo (*Citrus x paradisi* var. Rio Rojo) regada bajo diferentes proporciones de AMD (100% AMD, 100% AMD con reducción de elementos fitotóxicos, 50% AMD y 0% AMD). Se realizaron análisis foliares, de suelo y vuelos cuatrimestrales con drones equipados con sensores multiespectrales, LiDAR y cámara RGB. Los resultados mostraron una acumulación de iones fitotóxicos en las hojas y en el suelo de los árboles regados con AMD, superando los umbrales de fitotoxicidad indicados en estudios previos. No obstante, los parámetros fisiológicos y la producción no se vieron afectados en el corto plazo. Los datos de teledetección confirmaron el buen estado de la vegetación, que presentó firmas espectrales e índices de vegetación característicos de cultivos saludables. A pesar de estos resultados positivos, el uso prolongado de AMD puede generar problemas agronómicos en futuras campañas. La detección temprana de respuestas fitotóxicas, especialmente en grandes superficies agrícolas, es crucial para prevenir mermas productivas y daños más graves, tanto en cultivos perennes como anuales.

INTRODUCCIÓN

El agua marina desalinizada (AMD) se ha convertido en una opción de interés para el riego en áreas con escasez hídrica, especialmente en regiones semiáridas como el sureste español. Este recurso "inagotable", al no depender de factores climáticos, ofrece una solución sostenible a largo plazo para abastecer a los cultivos agrícolas con agua de salinidad baja (≈0,8 dS/m), lo que contribuye a diluir la alta concentración de sales presentes en otras fuentes de agua (Ghaffour et al., 2013). Sin embargo, el uso de AMD plantea retos importantes en la agricultura que pueden afectar a la viabilidad de los cultivos; destacan principalmente las elevadas concentraciones de elementos como boro (B), cloro (Cl^-) y sodio (Na^+), que pueden resultar tóxicos para los cultivos más sensibles como los cítricos, y las reducidas concentraciones de calcio (Ca^{2+}) y magnesio (Mg^{2+}), que dan lugar a un elevado valor en la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), incrementando el riesgo de desestructuración del suelo a largo plazo. Estas limitaciones, entre otras, requieren la implementación de estrategias de manejo específicas, como la fertilización adecuada, el monitoreo continuo del suelo, y el uso de postratamientos para reducir los efectos adversos de los iones presentes en el agua desalinizada. En el caso de los cítricos, uno de los grupos de cultivos más importantes en España y susceptible a los efectos del AMD, la toxicidad por boro se manifiesta principalmente como amarillamiento y muerte progresiva de las hojas y otros tejidos, respecto a la mayor tolerancia de los cultivos herbáceos debido a su carácter anual y a su baja acumulación en los tejidos. Tradicionalmente, los agricultores han dependido del monitoreo *in situ* para gestionar la salud de los cultivos, evaluando la calidad del agua de riego, y el estado nutricional del suelo y de la masa foliar. Sin embargo, los avances en la agricultura de precisión han abierto nuevas oportunidades para la monitorización remota a través del uso de tecnologías, como drones equipados con cámaras de alta resolución, sensores multiespectrales y LiDAR. Esta instrumentación permite capturar datos de la estructura y altura de los cultivos, así como su reflectancia en diferentes bandas del espectro electromagnético, proporcionando información detallada sobre el estado fisiológico de los cultivos. Estudios recientes han demostrado la eficacia del uso de drones en la identificación de enfermedades (Garza et al., 2020) y en la gestión del estrés hídrico para optimizar el riego (Peres, 2021).

El cultivo de cítricos en España tiene una relevancia estratégica, con una producción anual que alcanza los 7 millones de toneladas, situándose como el sexto mayor productor mundial. En este contexto, este trabajo tiene como objetivo evaluar los riesgos de fitotoxicidad asociados al uso de AMD en el riego de cítricos, utilizando tanto métodos tradicionales in situ como la monitorización remota con drones. En particular, analiza una parcela de pomelo en el sureste español, evaluando el potencial del uso de drones para mejorar la gestión agronómica y mitigar los efectos adversos del riego con AMD. La integración de estos datos puede proporcionar a los agricultores herramientas más precisas para la toma de decisiones, contribuyendo a una agricultura más eficiente y sostenible.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio experimental se realizó en una finca comercial ubicada en Torre Pacheco (Murcia, España) entre septiembre de 2022 y septiembre de 2023. La parcela consta de 0,28 ha de pomelo (*Citrus x paradisi cv.* Rio Red.), injertados sobre macrophylla (*Citrus macrophylla*). Se realizaron cuatro tratamientos de riego: (i) AMD proveniente de la desaladora de Escombreras (AMD), (ii) AMD con concentración reducida de elementos fitotóxicos (AMD-B) (iii) agua suministrada por la comunidad de regantes del Campo de Cartagena (CR), (iv) y una mezcla a partes iguales de los

tratamientos 100% AMD y 0% AMD (AM). Los cuatro tratamientos de riego fueron aplicados en bloques aleatorios de 4x3 árboles en la parcela.

Para el seguimiento del cultivo se recogieron muestras cuatrimestrales de hoja, agua y de suelo de cada tratamiento durante el periodo experimental. Se tomaron tres muestras de suelo de cada tratamiento, a profundidades de 0-0,25 m y 0,25-0,50 m, y a una distancia de 0,30 m del emisor. En las muestras de agua y suelo se evaluó el pH, la CE (dS/m) y el contenido de aniones (Cl^- y NO_3^-) y cationes (Na^+, K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+} y B). Para el muestreo foliar se seleccionaron dos árboles de cada uno de los doce grupos de tratamientos, recolectando, desde mayo hasta noviembre, hojas jóvenes de los brotes nuevos de ese año, y cuatrimestralmente, hojas maduras de años anteriores. Por último, se realizaron cuatro vuelos con dron, coincidiendo con los muestreos de campo cuatrimestrales. El dron empleado (Fig. 1), obtuvo datos RGB, imágenes multiespectrales y una cobertura de altura de superficie (LiDAR), a partir de los cuales se realizó una individualización y segmentación de las copas de los árboles de la parcela, y la obtención de los valores de reflectancia de cada árbol para cada banda espectral registrada. Finalmente, se estimaron diversos índices de vegetación empleados en agricultura de precisión, para determinar el estado fisiológico del cultivo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de los muestreos de campo pusieron de manifiesto la acumulación de boro en el suelo y en las hojas de los árboles regados con AMD, alcanzándose concentraciones que superaron los límites de fitotoxicidad, principalmente en hojas maduras (Fig. 2). Sin embargo, la producción y los parámetros fisiológicos no fueron alterados, ni se presentaron daños visibles característicos de toxicidad, no mostrando diferencias significativas con el resto de tratamientos de riego. El sodio y el cloro se mantuvieron por debajo de los umbrales de toxicidad en todos los casos. La acumulación de estos elementos también se evaluó en el suelo, observándose mayores concentraciones en las zonas regadas con AMD, pero sin superar umbrales críticos. Por otro lado, la combinación de los datos multiespectrales y el sensor LiDAR posibilitó la separación con alta precisión de los datos de vegetación y de suelo de la parcela, así como una correcta segmentación de las copas de los árboles y la obtención de una señal limpia de vegetación, sin interferencias del suelo.

En consonancia con los datos de producción y análisis fisiológicos, los datos de reflectancia obtenidos para las distintas bandas multiespectrales, mostraron firmas espectrales características de un cultivo sin patologías (Fig. 3), sin observarse diferencias significativas entre tratamientos. De igual forma, los índices de vegetación calculados para analizar distintos parámetros del estado del cultivo, se mantuvieron en valores normales. Estos resultados proporcionan una valiosa información para la gestión del riego con AMD en cultivos cítricos, especialmente sensibles a los efectos de este recurso. Aunque durante el periodo de estudio no se han observado síntomas patológicos en los árboles durante el periodo de estudio, es de especial importancia continuar la monitorización a largo plazo, prestando especial atención a la acumulación de elementos potencialmente fitotóxicos en el suelo y en la planta. Los datos de teledetección pueden completar y extender a toda la parcela la información proporcionada por los muestreos de campo.

REFERENCIAS

Garza, B. N. Ancona, V. Enciso, J. et al. 2020. Quantifying Citrus Tree Health Using True Color UAV Images. Remote Sensing. 12:1.

Ghaffour, N. Missimer, T. M. Amy, G. L. 2013. Technical review and evaluation of the economics of water desalination: Current and future challenges for better water supply sustainability. Desalination. 309:197-207.

Peres, D. J. Cancelliere, A. 2021. Analysis of Multi-Spectral Images Acquired by UAVs to Monitor Water Stress of Citrus Orchards in Sicily, Italy.

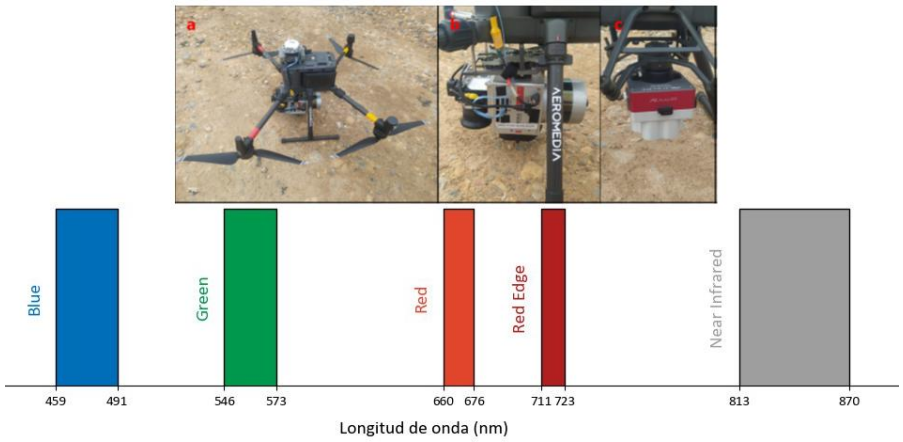


Fig. 1.
Fotografías del dron y sensores utilizados, y bandas del espectro registradas.

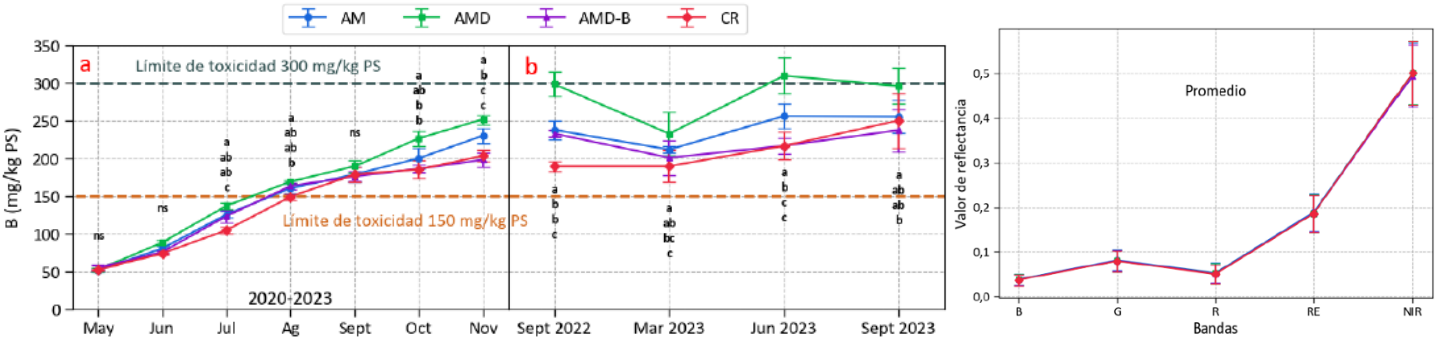


Fig. 2. Concentración de boro en hojas jóvenes (a) y viejas (b) para los distintos tratamientos

Fig. 3. Promedio de los cuatro vuelos de las firmas espectrales de los tratamientos de riego

Experiencia educativa en vermicompostaje

Laura Garcia-España1, Francisco Garcia2, Josep Llinares3, Maria Desamparados Soriano4*

1Departamento de Biología Vegetal, Universitat de Valencia, Andrés Estellés s/n, 46100, Burjasot, València
2 Departamento de Hidráulica, Universitat Politècnica de València, 46025, Valencia
3 Departamento de Química, Universitat Politècnica de València. Parininfo, 46730, Gandía, Valencia
4 Departamento de Producción Vegetal, Universitat Politècnica de València. Cami de Vera s/n 46023, Valencia

***Autor para correspondencia**: asoriano@prv.upv.es

Palabras Clave: Suelo, vermicompostaje, residuos agrícolas

Resumen.
Durante los últimos años se vienen realizando diversas experiencias de vermicompostaje con alumnos de la ETSIAMN, mayormente dedicados a la realización de su Trabajo Final de Grado. Las experiencias se basan en el estudio de la transformación de residuos utilizando técnicas de vermicompostaje. La utilización de estas técnicas de vermicompostaje consisten en un proceso de descomposición de los biorresiduos realizado por la actividad de ciertas especies de lombrices, principalmente las del género *Eisenia,* utilizándose mayoritariamente las especies *andrei y foétida*. El vermicompost es un producto que se produce a través del proceso de compostaje con lombrices, que digieren la materia orgánica y la transforman en un abono rico en macro y micronutrientes, así como de microorganismos beneficiosos para el correcto desarrollo de los cultivos. Estos estudios entre el alumnado tienen en común el tratamiento de transformación de residuos agrícolas, y en especial los residuos de aquellos cultivos mediterráneos más frecuentes tales como olivo, naranjo, viña, así como restos de plantas aromáticas o restos de café. Los alumnos aprendieron en estas experiencias a realizar operaciones culturales tradicionales como es el compostaje y vermicompostaje, que cada vez más, vuelven a ser aplicadas por los agricultores. Además, algunos de ellos, con estas experiencias finalizan su último trabajo de carrera que les servirá para obtener su título e iniciarse en el mercado laboral.

INTRODUCCIÓN

Experiencia educativa, practica educativa, son conceptos que definen una experiencia social y educativa, que pretende activar al alumno hacia una participación que conlleva hacia procesos de cambio y transformación educativa (Schon, 1992).

Este tipo de experiencias facilita a los alumnos el aprendizaje por experiencias vividas y enseña a desarrollar habilidades y destrezas para enfrentar retos y desafíos en la vida ...se trata pues de

metodologías activas

La experiencia se planteó como una versión de la conservación del suelo, para conocer las técnicas de vermicompostaje, proceso que consiste en la descomposición de los biorresiduos realizado por la actividad de ciertas especies de lombrices, en este caso del género *Eisenia foétida*.

La experiencia de vermicompostaje puede utilizarse como un recurso educativo en los distintos niveles educativos.

Las razones que nos han motivado para la selección de estas actividades han sido diseñar actividades que se puedan realizar en el aula o en prácticas, y que permitan motivar al alumnado y permitan también una participación activa.

El principal objetivo de las actividades propuestas consiste en diseñar un caso relacionado con la valorización de los residuos y aplicación de la normativa que regula dichos aspectos.

Descripción de las actividades Valorización de residuos.
Fase previa: El vermicompostaje. Cómo hacer vermicompost.

El vermicompostaje es un proceso tradicional que consiste en descomponer la materia orgánica realizada por bacterias y hongos y otros organismos descomponedores con colaboración de las lombrices.

La experiencia se centró en dos asignaturas, «Conservación de suelos», optativa de los estudios de Ingeniería Técnica Agrícola y Tratamiento gestión y uso agrícola de residuos orgánicos asignatura del grado del Grado de Agronomía, en la Universitat Politècnica de València, durante numerosos cursos académicos.

La actividad consiste en la valorización de residuos agrícolas para realizar un vermicompostaje, proceso para reciclar estos residuos. En primer lugar, se explica al alumnado los principales aspectos relativos al vermicompostaje y sus características, considerando el vermicompostaje como un proceso por el cual la materia orgánica presente en diferentes materiales se degrada por acción de microrganismos en presencia de lombrices y de oxígeno consiguiendo de esta manera un producto denominado vermicompost, que es adecuado para aplicarlo a los suelos como fertilizante. Los estudiantes consultan la legislación aplicable como es el Real Decreto 865/2010, de 2 de julio, sobre sustratos de cultivo y el Real Decreto 1051/2022, de 27 de diciembre, por el que se establecen normas para la nutrición sostenible en los suelos agrarios, elaborando un dosier sobre dicha actividad. Es imprescindible conocer las características físicoquímicas de los materiales de partida ya que una adecuada proporción entre ellas va a ser determinante para conseguir un proceso eficiente.

Los *objetivos* en esta actividad consistieron en:

• Dar a conocer conceptos sobre fertilidad del suelo. Introduciendo los conceptos de valorización de residuos, sostenibilidad y economía circular.

• Conocer qué materiales y residuos podemos vermicompostar, su naturaleza y producción.

• Comprender los principios básicos del proceso de agrocompostaje así como sus principales necesidades y requerimientos científico-técnicos.

• Conocer y entender el valor del producto vermicompost y sus diferentes usos agrícolas y medioambientales.

• Informar sobre la normativa de aplicación en la gestión europea, estatal y autonómica de residuos especialmente dirigida hacia la economía circular.

• Formar al alumno en casos prácticos de gestión sostenible en el entorno específico de cada estudiante, favoreciendo el estudio de cada caso.

Premisas para realizar el vermicompostaje:

¿Qué podemos compostar? En principio cualquier sustrato o material de naturaleza orgánica es susceptible de ser compostado. Los materiales inorgánicos no son vermicompostables, aunque pueden usarse para mejorar algunos aspectos del proceso como el control del pH (Bueno et al., 2008; Moreno y Moral, 2008).

¿Cual es el secreto del vermicompostaje? Según algunos autores, los pasos a seguir para obtener un buen vermicompostaje consisten en:

• Mezclar bien tus residuos orgánicos para conseguir una adecuada proporción de C/N.

• Controlar la humedad.
• Favorecer la porosidad y la estructura física (añadiendo estructurante si es necesario).
• Controlar la temperatura, La temperatura indicará cuando empieza y cuando termina el proceso.
• Oxigenar volteando repetidamente.

Fase avanzada. Utilización del vermicompost. Usos y aplicaciones.

El vermicompost es un producto que se produce a través del proceso de compostaje con lombrices, que digieren la materia orgánica y la transforman en un abono rico en macro y micronutrientes, así como de microorganismos beneficiosos para el correcto desarrollo de los cultivos. Este proceso puede ser utilizado para la eliminación de ciertos contaminantes emergentes, siguiendo su evolución en el sistema suelo-planta o para el desarrollo vegetal como sustrato.

Los alumnos estudian el tratamiento de transformación de residuos agrícolas, y en especial los residuos de aquellos cultivos mediterráneos más frecuentes tales como olivo, naranjo, viña, así como restos de plantas aromáticas o restos de café y su utilidad para eliminar contaminantes emergentes.

CONCLUSIONES

El objetivo de esta experiencia fue desarrollar operaciones culturales tradicionales como el vermicompostaje, aplicadas por los agricultores cada vez con mayor asiduidad.

La aceptación de estas actividades propuestas nos indica que el alumnado se ve cada vez más motivado por actividades diferentes, en las que puede interactuar con otros compañeros/as y en las que se involucra intensamente en la asignatura. Le permite desarrollar mucho mejor su autoaprendizaje, su autonomía y la comprensión de los conceptos.

Estas dos actividades propician no solamente la comprensión de los procesos, sino también se involucran en el aprendizaje de los alumnos con dos propuestas muy diferentes que giran en torno a los residuos y el vermicompostaje.

Con estas propuestas el alumnado está comprometido con actividades y le permitan desarrollar su autoaprendizaje, y el conocimiento del medio. Estas actividades, además, se relacionan plenamente con los contenidos docentes de la asignatura, de tal forma que el alumnado parte de una base previa, unos conceptos que se les han explicado, y a partir de ahí le permite profundizar de forma más intensa en otros aspectos de interés.

Estas actividades permiten al alumnado interactuar de forma más intensa con el grupo, ya que le permite desarrollar las dos competencias transversales, referidas a la innovación y creatividad y la del trabajo en grupo y liderazgo.

Referencias

Bueno M.J., Gomez, M.J., Herrera, S., Hernando, M.D., Agüera, A., Fernández-Alba, A.R. 2008. Occurrence and persistence of organic emerging contaminants and priority pollutants in five sewage treatment plants of Spain: Two years pilot survey monitoring. Environmental Pollution, 164, 267–273.

Moreno, J., Moral, R. 2008. Compostaje. Edit: Mundi-Prensa. Madrid.

Schon, D. 1992. La formación de los profesionales reflexivos. Ed. Paidos, Barcelona, 9p.

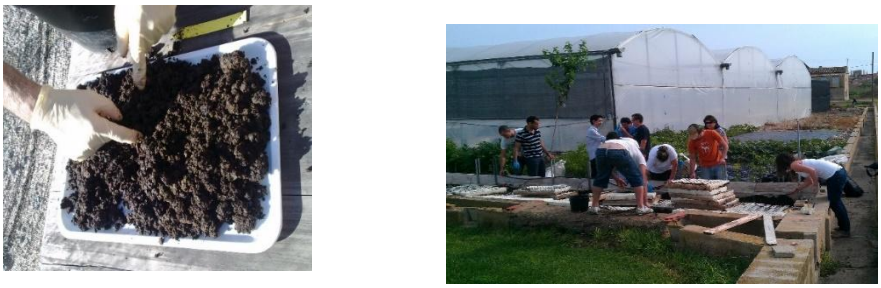


Figura 1. Elaboración del vermicompost

Análisis, diseño y cálculo de estructuras para su empleo en sistemas agrovoltaicos de cultivos hortícolas.

J. D. Carrasco Gómez[1], D. Mayordomo Martínez[3], F. J. Cánovas Rodríguez[2], D. Parras-Burgos[3] y J.M. Molina-Martínez[1]

[1] Grupo de investigación de Ingeniería Agromótica y del Mar, Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT), C/ Ángel s/n, Ed. ELDI E1.06, 30203, Cartagena, Murcia. jesusdavid.carrasco@edu.upct.es, mailto:josem.molina@upct.es

[2] Dpto de Automática, Ingeniería Eléctrica y Tecnología Electrónica, UPCT, C/Doctor Fleming s/n, 30202, Cartagena, Murcia. fcojavier.canovas@upct.es

[3] Dpto de Estructuras, Construcción y Expresión Gráfica, UPCT, C/ Doctor Fleming s/n, 30202, Cartagena, Murcia. dolores.parras@upct.es

[3] Dpto de Estructuras, Construcción y Expresión Gráfica, UPCT, C/ Doctor Fleming s/n, 30202, Cartagena, Murcia. diego.mayordomo@upct.es

Palabras clave: fotovoltaica, estructura, metálica, placas móviles

Resumen

En esta comunicación se propone, ante la necesidad cada vez más imperativa de obtener energía utilizando fuentes renovables, una estructura útil para ser utilizado en un sistema agrovoltaico. Entre los diversos criterios iniciales de diseño cabe destacar que se busca al máximo la reutilización de los medios materiales de los agricultores, por lo que, por ejemplo, la anchura de dicha estructura se vio muy condicionada por la maquinaria agrícola habitualmente utilizada –valorándose incluso que equipamiento era el más extendido en la zona-, de forma que la estructura no supusiera un obstáculo para el uso habitual de la maquinaria

Se parte de la base de que la presente estructura soportará placas solares. El gran aporte de este trabajo proviene desde el Grupo de Investigación de Ingeniería Agromótica y del Mar de la Universidad Politécnica de Cartagena, proponiendo que estas placas serán en parte fijas y en parte móviles. Se ha diseñado tal instalación, con la peculiaridad de que las placas móviles podrán situarse bajo las placas fijas, en función de las necesidades de iluminación directa del sol por parte del cultivo, de forma que en función de dichas necesidades y de la producción energética de nuestro sistema agrovoltaico, se podrá regular la apertura y cierre de las placas móviles, buscando siempre el punto óptimo entre la generación eléctrica, y el crecimiento del cultivo. En la estructura se ha tenido en cuenta, que se implementará un sistema o instalación de alumbrado, que, en función de las necesidades lumínicas, podrá complementar parcial o totalmente las necesidades lumínicas de nuestro cultivo.

INTRODUCCIÓN

La Región de Murcia en particular, y la de otras regiones en España con comportamiento semejante como podría ser Andalucía, se sitúan en la zona de Europa caracterizada por el gran número de horas de sol que recibe anualmente [1]. Por otra parte, existe una necesidad cada vez más presente, de intentar reorientar en aquellos cultivos que lo permitan, la posibilidad de integrar sistemas de generación eléctrica basadas en fotovoltaica. Este intento de integración motiva que haya que replantearse aspectos relacionados tanto con el cultivo, como con el diseño habitual de las estructuras que deben diseñarse. En esta comunicación, se plantea los pasos seguidos para el análisis, diseño y cálculo de las estructuras que soportan nuestra instalación fotovoltaica, teniendo siempre presente la normativa vigente. Se ha considerado en dicho diseño todos los aspectos relacionados con estabilidad, rigidez, coste, paso de luz hacia al cultivo, incorporación de luces led, y que parte de la estructura deberá soportar placas móviles. La necesidad de incorporar placas móviles, y, por tanto, la existencia de esos huecos en la estructura, generan esfuerzos que varían con la posición de los paneles fotovoltaicos, que se han tenido en cuenta. Dado que el agua es un bien escaso en la zona, se cuida también en el diseño de la estructura la recogida del agua de lluvia. Por tanto, se presenta los pasos y peculiaridades del análisis, diseño y cálculo de una estructura metálica con perfiles tubulares, sobre las que se sitúa un mecanismo con placas solares móviles. El sistema está compuesto de placas fijas y placas móviles, estando estas instaladas bajo las placas fijas, y en función de la necesidad de luz solar para los cultivos, se desplazan más o menos, aportando la luz natural necesaria para el cultivo. La estructura diseñada está compuesta por tres cubiertas con una luz total de 15 m., entre las cubiertas se sitúa un canalón de recogida de aguas pluviales al igual que en los laterales, las cubiertas están formadas por tres cerchas Pratt, sobre las cuales se sitúan unos cordones tipo IPE, que soportan el mecanismo de las placas solares, las cubiertas tienen una inclinación de aproximadamente 10º para poder aprovechar al máximo la luz solar. La estructura será regulable y busca en todo momento cubrir las necesidades de luz solar de los cultivos y, a su vez, la obtención de energía fotovoltaica, optimizando la producción del conjunto (cultivo-instalación fotovoltaica). Como novedad incluso, se plantea la colocación de focos led situados bajo la cubierta, de forma que, en función de las necesidades de luz para el crecimiento del cultivo y la producción de energía eléctrica de las placas, se pueda regular el funcionamiento de estas lámparas para optimizar nuestra instalación.

MATERIALES Y MÉTODOS

De inicio se partía de una estructura, cuyas dimensiones debían ser de 13x15m y entre 4,5-5 m de altura – (Fig.1).

La cubierta tendrá una inclinación de 10º que ayuda a la óptima obtención de energía solar, gracias al aprovechamiento de casi la totalidad de las horas y a su vez a la evacuación de aguas pluviales.

Para el diseño se ha utilizado el software Cype 3D, especializado en cálculo de estructuras metálicas, con el cual se ha calculado la estructura necesaria para soportar las placas solares.

La estructura se basa en tres pórticos formados por cerchas a base de barras tubulares, sobre las cuales se sitúan las correas portadoras de las placas solares. Por su parte en cada limahoya se situará un canalón para la recogida de pluviales.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como resultado, se obtiene una estructura formada por una cercha tubular donde las mayores tensiones se obtienen en las barras próximas a las limahoyas, siendo éstas las que condicionan las dimensiones de la estructura teniendo que utilizar perfiles tubulares cuadrados de hasta 175x10 mm en los cordones superior e inferior de las cerchas. Además, los pilares estarán compuestos por perfiles HEB 200.

Por otro lado, las correas sobre las que se sitúa el mecanismo de movimiento de las placas son a base de perfiles IPE 180.

Esta estructura será capaz de soportar las cargas necesarias para asegurar la integridad del sistema fotovoltaico y a su ver permitir la libre transición de maquinaria agrícola.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio forma parte del Programa AGROALNEXT que ha sido financiado por MICIU con fondos NextGenerationEU (PRTR-C17.I1) y por la Fundación Séneca con fondos de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia (CARM).

REFERENCIAS

[1] MurciaEnCifras. Observatorio de Murcia. https://murciaencifras.es/

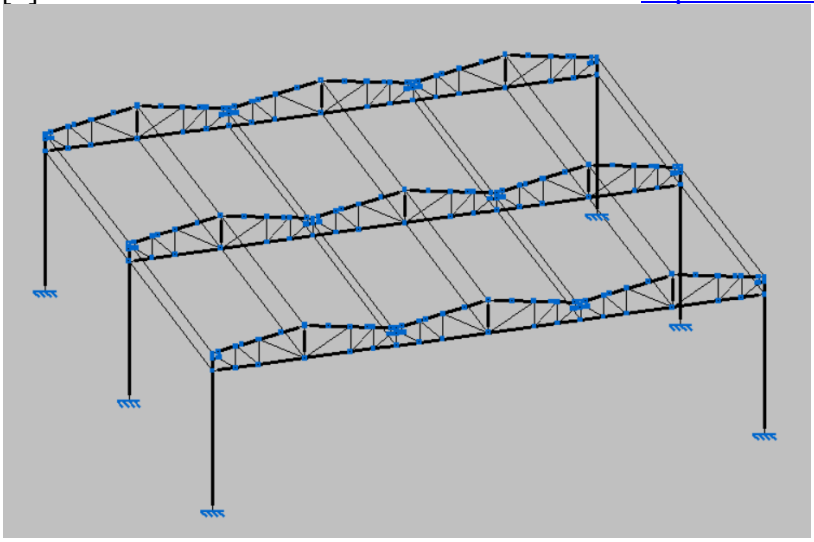


Figura 1. Estructura inicial en la que se basa el Proyecto.

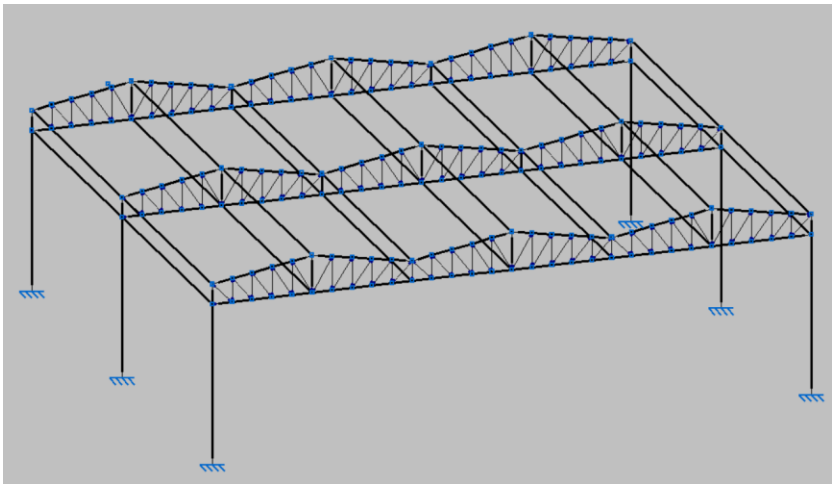


Figura 2. Estructura tras la modificación de la cercha.

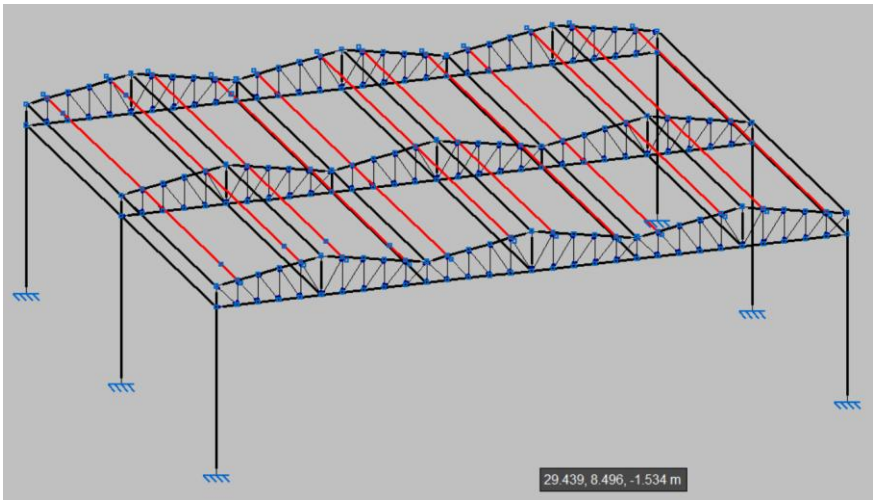


Figura 3. Estructura modificada donde aparecen las correas (en rojo) que soportarán el mecanismo de las placas.

Análisis de la configuración de los pasillos de un invernadero de tipo mediterráneo para la navegación de robots móviles

Fernando Cañadas-Aránega[1*], José Carlos Moreno[1], Francisco Rodríguez[1] y José Luis Blanco-Claraco[2]

[1] Departamento de Informática, CIESOL, CeiA3. Universidad de Almería, 04120, Almería, España.
[2] Departamento de Ingeniería, CIESOL, CeiA3. Universidad de Almería, 04120, Almería, España.

[*] **Autor de correspondencia**: fernando.ca@ual.es

Palabras clave: Robótica en agricultura, análisis económico, MVSim y ROS2 Humble.

Resumen

Este estudio analiza las diferentes configuraciones de pasillos en un invernadero mediterráneo, con el objetivo de optimizar la eficiencia y sostenibilidad de la agricultura intensiva, esencial ante el crecimiento poblacional. El objetivo es mejorar la automatización y reducir la pérdida de producción provocada por la adaptación de los invernaderos para la navegación de robots. Se examinan configuraciones de pasillos típicas en un invernadero experimental de Agroconnect, ubicado en la Universidad de Almería, utilizando el simulador MultiVehicle Simulator (MVSim) y ROS 2 Humble para emular el comportamiento del robot en condiciones reales de terreno. Las simulaciones consideraron distintas variables, como el tiempo de recorrido en tareas de pulverización, el impacto de la pendiente y la distribución de pasillos centrales y laterales. Los resultados concluyen que ciertas configuraciones de acceso y distribución de los pasillos pueden optimizar el consumo energético del robot, reducir la mano de obra y mantener la productividad del cultivo, presentando ventajas en términos económicos y de sostenibilidad.

INTRODUCCIÓN

La adopción de robots en la agricultura de invernadero ha avanzado lentamente debido a los altos costos (referencia), asociados tanto al robot como a las adaptaciones de infraestructura necesarias para optimizar su eficiencia (aplanamiento del suelo, reorganización y/o reducción de los cultivos para facilitar la navegación, etc.). Estos cambios, aunque sostenibles desde el punto de vista de la robótica, generan rechazo entre los agricultores, ya que la reducción de la superficie de cultivo reduce la producción. Para una integración efectiva de robots en invernaderos, es fundamental realizar un análisis de viabilidad que evalúen distintas configuraciones de los invernaderos mediterráneos, buscando el compromiso entre la producción y la integración de la tecnología. En este proceso, los simuladores juegan un papel clave al proporcionar datos preliminares, identificar fallos de diseño y permitir ajustes antes de la construcción de prototipos, mejorando la eficiencia y sostenibilidad de la robótica en la agricultura (Cañadas-Aránega et al., 2024b).

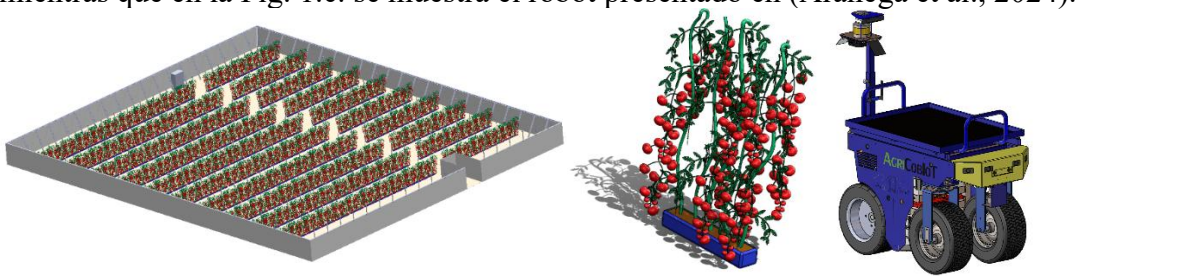
Este trabajo se centra en el estudio de diferentes configuraciones típicas de los pasillos de invernaderos mediterráneos, analizando el consumo del robot frente a la producción.

1. MATERIALES Y MÉTODOS

En esta sección se describen los materiales y métodos para llevar a cabo este trabajo.

Invernadero Agroconnect

Para la simulación se emplea un modelo 3D del invernadero experimental de Agroconnect[1], ubicado junto a la Universidad de Almería y descrito en (Cañadas-Aránega et al., 2024a). En las Fig. 1.a. y Fig. 1.b. se muestran los modelos 3D del invernadero y tomatera, respectivamente, mientras que en la Fig. 1.c. se muestra el robot presentado en (Aranega et al., 2024).



(a) Invernadero Agroconnect *(b) Tomatera* *(c) Robot AGRICOBIOT II*

Figura 4: Modelos 3D de los componentes de la simulación

Robot AgriCobIoT II

Las simulaciones se realizan con el modelo 3D del robot móvil real "AGRICOBIOT II", una plataforma diseñada y desarrollada íntegramente por el grupo de Automática, Robótica y Mecatrónica (ARM) en el marco del proyecto AGRICOBIOT[2] (Moreno Úbeda et al., 2022).

MultiVehicle Simulator

Para la simulación, se utilizará el simulador *MultiVehicle Simulator* (MVSim) (Blanco-Claraco et al., 2023), en el que se pueden emular diferentes escenarios junto a diferentes tipos de suelos. Para este trabajo, se utilizará una superficie de enarenado con pendiente variable, propia de un invernadero Mediterráneo.

MATERIAL Y MÉTODOS

Para realizar una comparativa cuantitativa, se definirá la tasa de producción normalizada ($T_{p_{nor}}$) frente a una configuración de referencia. Este indicador permite combinar la capacidad de cultivo con la eficiencia de uso del robot, con el fin de comparar distintas configuraciones e identificar la óptima para la correcta integración de la robótica. Es importante notar que cuanto mayor es la eficiencia de uso del robot, en términos del tiempo invertido en recorrer el invernadero, menor es su consumo, y por tanto mayor es su autonomía y menor es su huella de carbono. Con el consumo total, es posible estimar los Kg de CO_2 que se lograrán reducir con el uso del robot en el invernadero.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección, se muestran los resultados de las cuatro configuraciones típicas de un invernadero mediterráneo con plantación en hidropónico:

[1] Agroconnect: https://agroconnect.es/

[2] Proyecto AgriCobIoT: PY20_00767 (CTEICU/FEDER)

- **Pasillo central (PC)**. Esta configuración es la que actualmente se encuentra en el invernadero de ensayos. En este caso, el robot debe navegar hasta final de cada pasillo y volver sobre el trayecto ya recorrido, realizando el doble de consumo (Fig. 3.a.), invirtiendo 43 min y 30 s, lo cual coincide con los ensayos reales realizados (Cañadas-Aránega, 2024a).
- **Dos pasillos laterales (PL)**. El robot debe navegar al final de cada pasillo y realizar un cambio al final del mismo, invirtiendo 20 min y 30 s (Fig. 3.b.).
- **Pasillo central con tresbolillo al final de cada pasillo PCT)**: el robot gira al final de cada pasillo, invirtiendo 20 min y 21 s (Fig. 3.c.).
- **Un pasillo lateral con huecos al final de cada pasillo par (PCL)**: Como en el caso anterior, el robot gira al final de cada pasillo, invirtiendo 20 min y 23 s (Fig. 3.d.).

CONCLUSIONES

Para realizar una comparativa, se tomará el escenario PC como referencia ya que es el que tenía el invernadero Agroconnect en la última campaña, en la que se estimó una producción media de 45 Kg/saco. En la Tabla. 1 se exponen los datos proporcionados por el agricultor locales, acorde con la última campaña, así como el valor de la tasa de producción normalizada para cada configuración.

Como se puede observar, la configuración PCL presenta un valor de producción de 450 Kg menos que la PC (referencia), pero invirtiendo 22 min y 31 s menos en el desplazamiento, llegando a una tasa de producción normalizada casi del doble de la de la PC. Esta configuración implica una reducción de consumo de 25 Ah a 24 V, (0,6 kwh) y reduciendo la huella de carbono 0,285 Kg de CO_2. Para una tarea de inspección donde el robot realiza, como mínimo, un análisis completo diario, supondría una reducción de 104 Kg de CO_2 anual. Por tanto, es necesario alcanzar un compromiso entre una pérdida de producción, disminución de mano de obra, aumento de la seguridad en las tareas y una mejora en la sostenibilidad con menor consumo de energía y menor emisión de CO_2.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Proyecto 'CyberGreen', PID2021-122560OB-I00, y la infraestructura 'AgroConnect.es' utilizada para llevar a cabo esta investigación, beca EQC2019-006658-P, (MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y FEDER). Asimismo, el autor Fernando Cañadas-Aránega cuenta con una beca FPI (PRE2022-102415) del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades.

Referencias

Aranega, F. C., Claraco, J. L. B., Álvarez, F. J. M., & Úbeda, J. C. M. (2024). Navegación de un robot Ackermann para tareas de transporte en invernaderos mediterráneos con MultiVehicle Simulator (MVSim). Jornadas de Automática, (45).

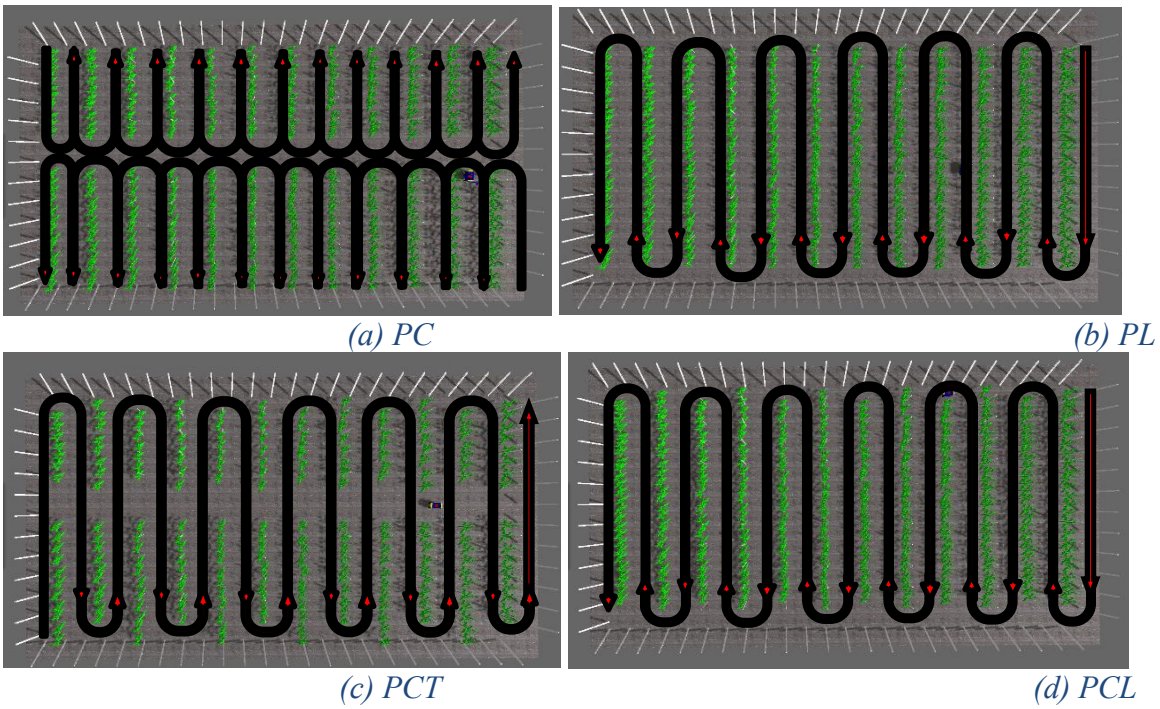
Blanco-Claraco, J. L., Tymchenko, B., Mañas-Alvarez, F. J., Cañadas-Aránega, F., López-Gázquez, Á., & Moreno, J. C. (2023). MultiVehicle Simulator (MVSim): Lightweight dynamics simulator for multiagents and mobile robotics research. SoftwareX, 23, 101443.

Cañadas-Aránega, F., Blanco-Claraco, J. L., Moreno, J. C., & Rodriguez-Diaz, F. (2024a). Multimodal Mobile Robotic Dataset for a Typical Mediterranean Greenhouse: The GREENBOT Dataset. Sensors, 24(6), 1874.

Cañadas-Aránega, F., Moreno, J. C., Blanco-Claraco, J. L., Giménez, A., Rodríguez, F., & Sánchez-

Hermosilla, J. (2024c). Autonomous collaborative mobile robot for greenhouses: Design, development, and validation tests. Smart Agricultural Technology, 100606.

Moreno Úbeda, J. C., Cañadas-Aránega, F., Rodríguez, F., Sánchez-Hermosilla, J., & Giménez, A. (2022). Modelado 3D y diseño de un robot colaborativo para tareas de transporte en invernaderos. In *XLIII Jornadas de Automática* (pp. 785-791). Universidade da Coruña. Servizo de Publicacións.



(a) PC *(b) PL*

(c) PCT *(d) PCL*

Figura 5: Distintas configuraciones de pasillos de invernaderos mediterráneos

Tabla 1: Datos de producción de cada configuración (conf∈ {PC,PL,PCT,PCL})

Config.	Nº sacos	Producción (Kg)	Tiempo Robot (s)	$\left(\frac{Kg_{conf}}{t_{conf}}\right)$	$T_{p_{nor}} = \frac{T_{p_{conf}}}{T_{p_{PC}}}$
PC	440	19.800	2568	7,69	1
PL	420	18.900	1258	15,02	1,953
PCT	418	18.810	1251	15,03	1,955
PCL	430	19.350	1253	15,44	2,007

Desarrollo de un robot de siega para invernadero

S. Bayano-Tejero [a*], G. L. Blanco-Roldán [a], R. R. Sola-Guirado [a]
[a] Universidad de Córdoba, Campus de Rabanales, Ctra. Nacional IV km 396, 14014, Córdoba, España.

***Autor para correspondencia:** p52bates@uco.es

Palabras clave: robotización, navegación, acolchado plástico, malas hierbas, ROS

Resumen
El uso de acolchado plástico en los invernaderos para controlar las condiciones del cultivo está muy extendido, pero tiene un alto impacto medioambiental debido a la mala gestión de los residuos plásticos generados una vez que dejan de usarse. El uso de cubiertas vegetales podría suponer una alternativa al acolchado plástico y aportar grandes beneficios a los cultivos como una mayor fertilidad del suelo, mayor absorción de carbono o aumento de la biodiversidad. Sin embargo, las cubiertas vegetales requieren de cierto mantenimiento para cortar su crecimiento cuando sea necesario con lo que se torna necesaria la mecanización de las operaciones de siega. En este trabajo se presentan los avances realizados en el proyecto GO Bioterrabot en el que se está desarrollando una solución robotizada para la siega de las cubiertas vegetales en invernaderos donde se ha eliminado el acolchado plástico. Se está empleando un pequeño robot comercial programado mediante el entorno de desarrollo de aplicaciones robóticas ROS (Robotic Operative System), al que se le ha dotado de las tecnologías necesarias para la navegación autónoma como un sistema GNSS-RTK, una unidad inercial y un sensor LiDAR. Adicionalmente se le va a incorporar un apero de corte lineal. Se están realizando una serie de ensayos para validar la gestión de la cubierta vegetal de manera autónoma y estudiar su factibilidad.

INTRODUCCIÓN

España es uno de los líderes en producción hortofrutícola en invernadero, con 76.600 hectáreas (Castillo-Díaz et al., 2021). El uso de acolchado plástico es común debido a sus beneficios como la protección contra patógenos, el aumento de la temperatura del suelo, la retención de humedad y el control de malas hierbas. Sin embargo, presenta desventajas como la instalación laboriosa, dificultad para trabajar la tierra, refugio para organismos no deseados, alto costo y problemas de desecho, lo que genera un impacto ambiental significativo (Salama & Geyer, 2023). Una alternativa ecológica es el uso de cubiertas vegetales de plantas autóctonas, que ofrecen beneficios como la absorción de carbono, aumento de la biodiversidad y mejora de la fertilidad del suelo. No obstante, requieren control de crecimiento mediante mecanización y siega, aportando nutrientes al suelo (Iqbal et al., 2020).

La democratización del sistema operativo robótico (ROS) ha facilitado la introducción de la robótica en la agricultura. Los invernaderos, con condiciones controladas, son ideales para implementar

robots que realicen tareas como la siega de manera precisa y eficiente, reduciendo la intervención humana. Esto unido a la tecnología IoT permitiría ajustar las operaciones en tiempo real, mejorando la eficiencia y sostenibilidad (Fue et al., 2020). Este trabajo busca avanzar en el uso de robots autónomos para el mantenimiento de cubiertas vegetales en invernaderos sin acolchado plástico, utilizando un robot comercial adaptado con tecnologías específicas para esta tarea.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se ha empelado un robot (Robotnik, Valencia, España) que se ha adaptado mediante las tecnologías necesarias para la navegación autónoma y la detección del entorno. Para la navegación se han instalado principalmente 2 sensores, un sistema GNSS RTK (C099-F9P-1, Ublox, Suiza) y una unidad inercial (VN-100T-CR, VectorNav, USA). El sistema GNSS RTK se encarga de la georreferenciación del robot mediante conexión a la Red Andaluza de Posicionamiento (RAP) para la recepción de correcciones que permitirán navegar con precisión centimétrica. La unidad inercial calcula la orientación del robot con el objetivo de seguir las trayectorias predefinidas. Para el mapeo del entorno y la detección de obstáculos se emplea un Light Detection And Ranging (LiDAR) (RS-LiDAR-16, RoboSense, China). Todos los sensores se han conectado a la CPU (JNF797-Q370, Jetway, USA) que ejecuta Linux y permite el desarrollo de la aplicación robótica descrita usando ROS.

Los *waypoints* necesarios para indicar al robot la ruta a realizar se registraron mediante un sistema GNSS RTK, similar al empleado por el robot para la navegación. La lista de *waypoints* fue enviada al robot en formato .csv e incorporada por este en un comando de ROS empleado para iniciar las trayectorias. El planificador local implementado fue el Time Elastic Band (TEB), que recoge la lista de *waypoints* y crea la ruta que los une, recalculándola cuando se presentan obstáculos en ella (Maximilian Pittner et al., 2018).

Se han realizado varios ensayos para identificar los parámetros que más influyen en la exactitud de la navegación en un entorno urbano, sin desnivel ni obstáculos. Para ello se definió una ruta mediante una serie de *waypoints* y una batería de repeticiones con los principales parámetros de navegación ajustados a diferentes valores (Teb_Local_Planner - ROS Wiki, n.d.). Para evaluar cómo la ruta ejecutada se ajusta a la planificada se calculó la distancia de Fréchet (Hutt et al., 2021). Posteriormente, se simuló el entorno del invernadero, donde posteriormente se aplicará la solución desarrollada, mediante dos hileras de plantas artificiales en un terreno agrícola de características similares. El invernadero de 3 calles definidas por las 2 hileras de plantas se configuró con una calle central de un ancho mayor (2.80 m entre plantas con 0.60 m de caballón) que las calles laterales (1.80 m entre planta y pared con 0.30 m de caballón). Debido a las dimensiones del apero se realizaron 2 pasadas en la calle central para asegurar el segado de la hierba. El ensayo consistió en 5 repeticiones de la ruta con un apero de corte de 1.20 m de ancho acoplado al robot (Fig. 1). La navegación fue evaluada mediante el mismo parámetro para calcular el área de segado cubierta.

En una fase posterior se evaluará la eficiencia del corte del apero desarrollado con la mejor configuración de navegación y obstáculos obtenida de estas fases.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La evaluación de los parámetros de navegación demostró que los parámetros relacionados con los *viapoints*, que son puntos intermedios entre *waypoints* empleados para la planificación de la trayectoria, son los que permiten obtener una ruta más ajustada a la planificada. El parámetro *global_plan_viapoint_sep,* que define la separación entre los *viapoints* generados automáticamente a lo largo de la trayectoria, ajustado a 0.01 m permite obtener una distancia media de Fréchet de

0.13±0.01 m. El parámetro *weight_viapoint*, que asigna la importancia de los *viapoints* mediante un peso, ajustado a un valor de 800, permitió obtener una distancia media de Fréchet de 0.14±0.01 m. Otro parámetro reportó resultados similares, como el parámetro *max_global_plan_lookahead_dist,* que indica la distancia máxima a lo largo de la ruta global que el planificador local debe considerar al generar la trayectoria, se ajustó a 1 m y permitió obtener una distancia media de Fréchet de 0.14±0.01 m.

Se observó que un valor alto de *weight_viapoint* hace que el robot siga una línea más suave y alineada, pero puede disminuir la capacidad de maniobra en entornos muy dinámicos o estrechos. En el caso del invernadero, al ser un entorno controlado, un valor alto puede ser adecuado. Un resultado similar también se obtuvo con *max_global_plan_lookahead_dist* ya que un valor mayor proporciona una planificación más amplia y estable, pero menos ágil frente a cambios inmediatos mientras que un valor menor permite reacciones rápidas y ajustes cercanos, pero podría hacer que la trayectoria sea menos suave en espacios abiertos (Yang et al., 2022). No se han considerado pruebas combinadas de los mejores parámetros, con lo que podría ser beneficioso hacerlo para mejorar más la exactitud del robot en la navegación. Los valores de navegación ajustados por defecto son los que ofrecieron peor resultado con grandes desviaciones (0.83±1.68 m).

Para el ensayo en invernadero simulado se obtuvo una distancia media de Fréchet de 0.22±0.01 m. Este valor fue debido principalmente a una planificación en el giro en las curvas más suave. En la calle central se produjo un solape debido a las 2 pasadas programadas para asegurar el segado de la hierba. En las calles laterales, al ser de ancho menor, no se requieren 2 pasadas y, además, el ancho del apero contribuye a dejar unos 0.30 m sin segar en la zona cercana a la pared del invernadero, favoreciendo la gestión del terreno en esa zona proclive al encharcamiento por la lluvia. Se ha logrado cubrir aproximadamente el 86% de la superficie de siega necesaria, siendo la superficie sin segar mayoritariamente la cercana a los caballones. Un porcentaje mayor podría conseguirse mediante algún mecanismo de aproximación al caballón para asegurar el apure de las zonas próximas a las plantas.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo forma parte del proyecto de investigación ‘Robotización para el control de cubiertas vegetales eliminando el acolchado plástico de suelo en el cultivo ecológico de frutos rojos (GO BIOTERRABOT)’, que ha sido cofinanciado por el Consejería de Economía, Conocimiento, Empresas y Universidad de la Junta de Andalucía.

REFERENCIAS

Castillo-Díaz, F. J., Belmonte-Ureña, L. J., Camacho-Ferre, F., & Tello-Marquina, J. C. (2021). The Management of Agriculture Plastic Waste in the Framework of Circular Economy. Case of the Almeria Greenhouse (Spain). *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *18*(22), 12042. https://doi.org/10.3390/ijerph182212042

Fue, K., Porter, W., Barnes, E., & Rains, G. (2020). An Extensive Review of Mobile Agricultural Robotics for Field Operations: Focus on Cotton Harvesting. *AgriEngineering*, *2*(1), 150–174. https://doi.org/10.3390/agriengineering2010010

Hutt, O. K., Bowers, K., & Johnson, S. D. (2021). The effect of GPS refresh rate on measuring police patrol in micro-places. *Crime Science*, *10*(1), 3. https://doi.org/10.1186/s40163-021-00140-1

Iqbal, R., Raza, M. A. S., Valipour, M., Saleem, M. F., Zaheer, M. S., Ahmad, S., Toleikiene, M., Haider, I., Aslam, M. U., & Nazar, M. A. (2020). Potential agricultural and environmental benefits

of mulches—a review. *Bulletin of the National Research Centre*, *44*(1), 75. https://doi.org/10.1186/s42269-020-00290-3
Maximilian Pittner, Markus Hiller, Florian Particke, Lucila Patiño-Studencki, & Jörn Thielecke. (2018). *Systematic Analysis of Global and Local Planners for Optimal Trajec- tory Planning*.
Salama, K., & Geyer, M. (2023). Plastic Mulch Films in Agriculture: Their Use, Environmental Problems, Recycling and Alternatives. *Environments*, *10*(10), 179. https://doi.org/10.3390/environments10100179
Teb_local_planner - *ROS Wiki*. (n.d.). https://wiki.ros.org/teb_local_planner
Yang, Y., Li, Y., Wen, X., Zhang, G., Ma, Q., Cheng, S., Qi, J., Xu, L., & Chen, L. (2022). An optimal goal point determination algorithm for automatic navigation of agricultural machinery: Improving the tracking accuracy of the Pure Pursuit algorithm. *Computers and Electronics in Agriculture*, *194*, 106760. https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.106760



Fig. 1 Pruebas de navegación de robot con apero en entorno de invernadero simulado

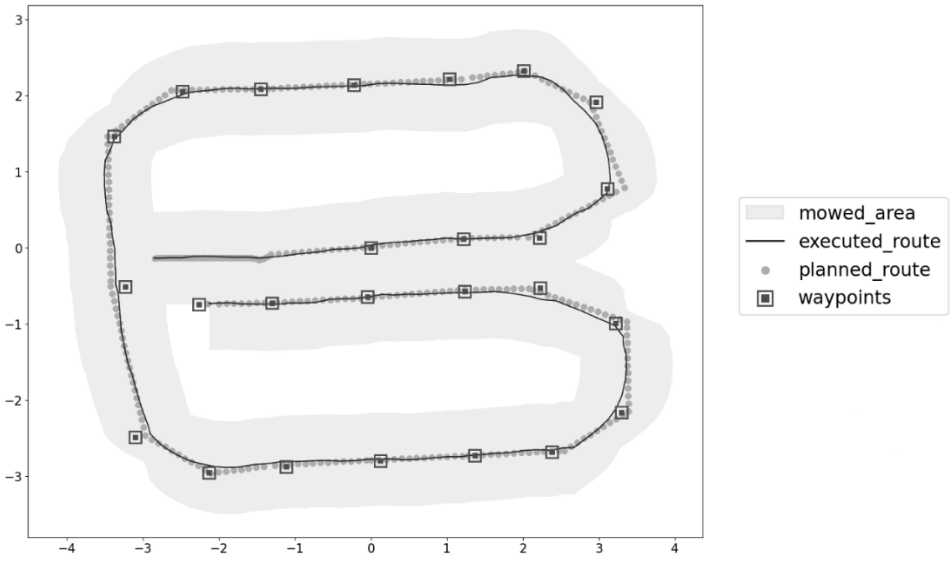


Fig. 2. Ruta realizada para el segado de la hierba.

Energy Hub para el modelado y optimización del consumo de recursos en un contenedor transportable para cultivo vertical de lechuga

R. A. González[1*], F. García-Mañas[1], E. Ruipérez-Algarra[1], F. Rodríguez[1]

[1] Departamento de Informática, CIESOL, ceiA3, Universidad de Almería, 04120, Almería, España.

[*] Autor de correspondencia: r.gonzalez@ual.es

Palabras clave: agricultura vertical, sostenibilidad, reparto de recursos, planificación óptima.

Resumen

Este trabajo presenta el uso de la metodología Energy Hub para optimizar el consumo de recursos en un contenedor de cultivo vertical. El objetivo presentado consiste en minimizar los costes de operación del contenedor, gestionando recursos como la electricidad y el agua, requeridos para el adecuado crecimiento de un cultivo de lechuga. Se han simulado dos escenarios: un día soleado y un día nublado. Los resultados muestran que, en el día soleado, el agua demandada por el cultivo se puede abastecer principalmente mediante desalación, aprovechando la producción de energía fotovoltaica. En el día nublado, la capacidad de generación fotovoltaica es insuficiente y se utiliza agua de la red para cubrir la demanda de riego, aumentando el coste de la operación un 19,4 %. Este enfoque permite una planificación económica y eficiente para cultivos en contenedores y también puede ser empleado para dimensionar sistemas auxiliares del contenedor, como un sistema fotovoltaico.

INTRODUCCIÓN

La agricultura vertical en contenedores transportables destaca en la actualidad por ofrecer un entorno altamente controlable en lo que respecta a variables climáticas y de fertirriego, que afectan al desarrollo óptimo de los cultivos. Aunque esa es una de sus principales ventajas, el mantenimiento de un clima de forma artificial en recintos cerrados conlleva un consumo considerable de recursos como electricidad, agua y CO_2. Desde una perspectiva económica, el objetivo no es únicamente maximizar el crecimiento del cultivo, sino maximizar el beneficio entre la venta de la producción del cultivo y los costes asociados por el consumo de recursos demandados por dicho cultivo (Rodríguez et al., 2015).

En este artículo se presenta un modelo de tipo Energy Hub (EH) (Geidl et al.,2006) como una manera de modelar las transformaciones, conversiones y almacenamientos que experimentan un conjunto de recursos de entrada para obtener otro conjunto de recursos de salida. En la literatura, los EH se utilizan principalmente para la resolución de dos tipos de problemas: la optimización de la operación y la planificación óptima. La optimización de la operación implica la distribución eficiente de recursos, en tiempo real o a largo plazo, para minimizar costes y maximizar la eficiencia de los recursos utilizados, considerando objetivos económicos, medioambientales y sociales. Por otro lado, la planificación óptima se enfoca en el diseño y la configuración a largo plazo de los sistemas analizados.

En este trabajo, el modelado EH se ha aplicado para un contenedor comercial con un cultivo de lechuga. Los resultados obtenidos en simulación y combinados con datos reales muestran que abordar el problema con el modelado EH permite planificar el reparto de recursos bajo criterios económicos.

MATERIALES Y MÉTODOS

En este trabajo se ha utilizado un contenedor de la empresa *Agrikubic Systems, S.L.,* situado en el centro experimental *Fundación Tecnova*, Almería, España. El contenedor (Figura 1) posee unas dimensiones de 12,20 x 2,44 x 1,5 m. Para poder cultivar en vertical, cuenta con mesas de cultivo colocadas en estanterías.

Las condiciones climáticas necesarias para el cultivo se consiguen mediante un conjunto de sistemas que demandan y consumen energía eléctrica, térmica y agua. El contenedor cuenta con un sistema de luces LEDs que consumen 7168 W y otros elementos como extractores de aire, destratificadores y humidificadores con un consumo medio de 500 W. Para mantener la temperatura interna del contenedor en los valores deseados (22 ºC, en este caso de estudio), se cuenta con un aire acondicionado con una potencia calorífica y frigorífica nominal de 11,14 y 10,55 kW, respectivamente.

Las plantas se cultivan de forma hidropónica y el riego se realiza mediante inundación de las mesas de cultivo. Las demandas de agua son abastecidas por un sistema de fertirriego cuyas bombas consumen 1,38 kW. El tanque de riego demanda unos 2400 L de agua, y el cultivo se riega a las 08:00 y a las 22:00. El agua de riego se puede obtener de la red de agua municipal o de un sistema de desalación por ósmosis inversa (OI) que permite desalar agua de mar. Para abastecer las demandas eléctricas se ha considerado que se cuenta con la red eléctrica, y un sistema de ocho placas fotovoltaicas con capacidad para generar hasta 3,6 kW. Para el caso de estudio propuesto en este trabajo se va a considerar que el uso de la OI está sujeto a la disponibilidad de energía fotovoltaica.

Para calcular los costes operativos óptimos del contenedor, se utiliza el modelado mediante EH. Se trata de una metodología basada en matrices, con balances energéticos y de masa entre un conjunto de recursos de entrada (I) que pueden transformarse en otro conjunto de recursos de salida (O). En la Figura 2 se puede observar un esquema de todos los elementos modelados. El problema de optimización (Ramos-Teodoro et al., 2021) que permite minimizar los costes de la operación del contenedor se formula como:

$$min \sum_{k=0}^{H-1} \boldsymbol{c}(k)\boldsymbol{I}(k)$$

s. a.
$$\boldsymbol{\delta o}(k)\boldsymbol{O}(k) = \boldsymbol{C}(k)\boldsymbol{P}(k) - \boldsymbol{Q_{ch}}(k) + \boldsymbol{Q_{dis}}(k)$$
$$\boldsymbol{S}(k+1) = \boldsymbol{C_s}(k)\boldsymbol{S}(k) + \boldsymbol{C_{ch}}(k)\boldsymbol{Q_{ch}}(k) - \boldsymbol{C_{dis}}(k)\boldsymbol{Q_{dis}}(k)$$
$$\boldsymbol{I}(k) = \boldsymbol{C_i}(k)\boldsymbol{P}(k)$$
$$\boldsymbol{g_i}(x) \leq 0; \qquad i = 1, \ldots, m.$$

donde **c**(k) es el vector de precios de los recursos consumidos, **I**(k) los flujos de entrada de recursos, **O**(k) los flujos de demanda, $\boldsymbol{\delta_o}$(k) representa la activación de estos flujos de demanda, **P**(k) define los caminos que pueden seguir los flujos de energía, $\boldsymbol{Q_{ch}}$(k) y $\boldsymbol{Q_{dis}}$(k) contienen los flujos de carga y descarga del depósito de riego, **S**(k) el nivel del depósito de riego, y las matrices **C**(k), $\boldsymbol{C_s}$(k), $\boldsymbol{C_{ch}}$(k) y $\boldsymbol{C_{dis}}$(k) contienen parámetros relacionados con los rendimientos de los sistemas. H es el horizonte de predicción, y k un instante de tiempo discreto. $\boldsymbol{g_i}$(x) representa un conjunto de restricciones relacionadas con las capacidades físicas de los sistemas, incluyendo flujos operativos y límites de almacenamiento.

RESULTADOS

En este trabajo se ha realizado el reparto de recursos óptimo para el contenedor descrito en la sección 2.1. Se simulan dos escenarios: un día soleado en junio y un día nublado en enero. Para la simulación se han utilizado datos meteorológicos de un año patrón (TMY).

En la Figura 3 se presentan los resultados del día soleado. Se puede observar que el agua demandada por el cultivo (a las 8:00 y a las 22:00) es abastecida, siempre que es posible, por la desaladora. Sin embargo, en los momentos en los que la producción fotovoltaica no es suficiente para cubrir el gasto eléctrico de la desaladora, se recurre al suministro de agua de la red. Realmente, la demanda de riego es abastecida directamente desde el depósito, el cual se llena en los momentos previos a la demanda. Los resultados para el día nublado se muestran en la Figura 4, donde se puede observar una producción fotovoltaica (en amarillo) mucho menor, que no es suficiente para abastecer a la desaladora. Por tanto, el agua demandada para los riegos es abastecida por el agua de red.

El gasto total de la operación del contenedor durante un día, considerando gastos eléctricos e hídricos es de 40,93 € para el día soleado y 49,53 € para el día nublado. En el día nublado la falta de producción fotovoltaica y agua desalada, hace que se incremente el coste diario en un 19,4%. Cabe destacar que, en ambos escenarios, el mayor coste y consumo está asociado a la electricidad demandada por las luces LED y por el sistema de aire acondicionado. Lógicamente, estos consumos dependen del tipo de cultivo y de la ubicación geográfica del contenedor.

CONCLUSIONES

Se han simulado dos escenarios distintos para demostrar que el modelado mediante EH permite obtener una planificación eficiente para el uso de los diferentes recursos demandados por un contendor para cultivo vertical. En días con una menor producción fotovoltaica, el coste de la operación puede incrementarse al no poder hacer uso de instalaciones de energías renovables. En trabajos futuros, esta metodología puede ser utilizada para realizar el dimensionamiento de diferentes sistemas auxiliares para el contenedor, como un sistema fotovoltaico o una desaladora por ósmosis inversa.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es resultado del proyecto CPUENTE2023/12, financiado por el Plan Propio de Investigación y Transferencia 2023 de la Universidad de Almería (PPIT-UAL, Junta de Andalucía-FEDER 2021-2027. Programa: 54.A). El autor R. A. González cuenta con una ayuda FPU (PRE2022-102415) del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades.

BIBLIOGRAFIA

Geidl M, Koeppel G, Favre-Perrod P, Kl¨ockl B, Andersson G, Fröhlich K., 2006. Energy hubs for the future. IEEE Power Energy Mag, 5, 24-30.

Ramos, J., Giménez, A., Rodríguez, F., y Berenguel, M., 2020. A flexible tool for modeling and optimal dispatch of resources in agri-energy hubs. Sustainability 12, 1–24.

Rodríguez, F., Berenguel, M., Guzmán, J. L., y Ramírez-Arias, A. 2015. Modeling and control of greenhouse crop growth. Basel, Switzerland: Springer.



Figura 1. Contenedor transportable para cultivos en vertical (https://agrikubic.com/).

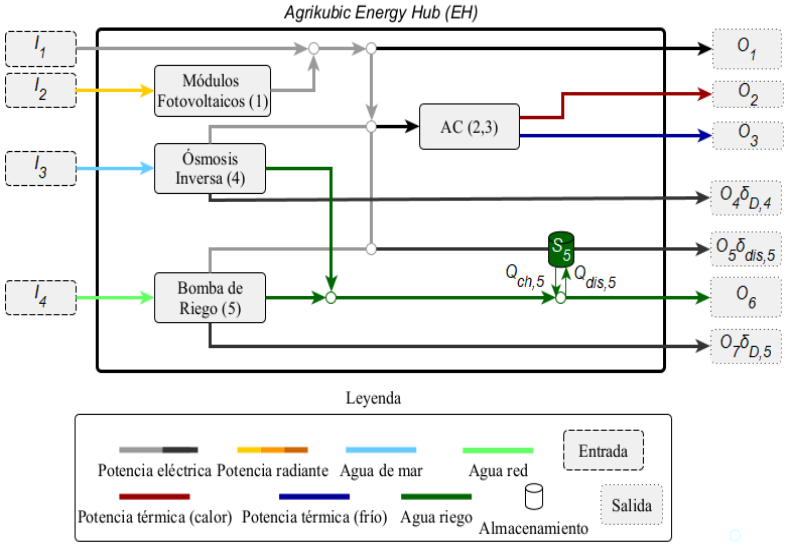


Figura 2. Representación gráfica del modelo EH para el contenedor Agrikubic.

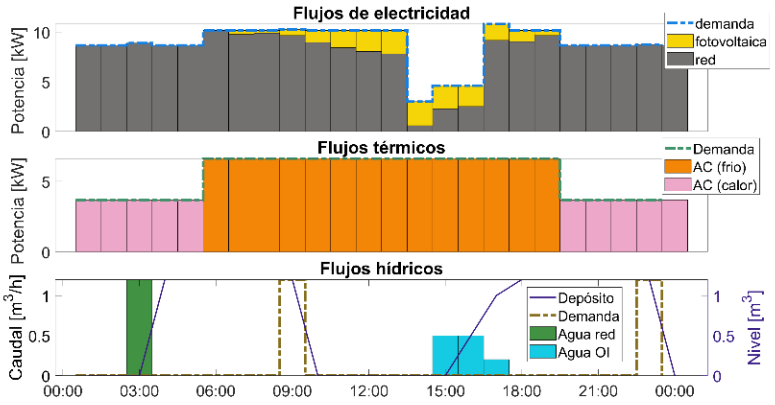


Figura 3. Reparto de recursos (electricidad, calor, frío y agua) para un día soleado.

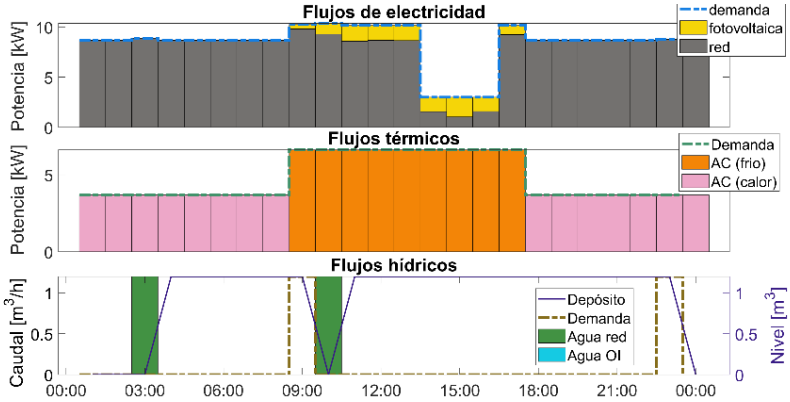


Figura 4. Reparto de recursos (electricidad, calor, frío y agua) para un día nublado.

Diseño de una estructura agrovoltaica para cultivos hortícolas utilizando perfiles de invernaderos comerciales

J.A. Nicolás-Cuevas[1], D. Parras-Burgos[1] y J.M. Molina-Martínez[1]

[1] Grupo de Investigación de Ingeniería Agromótica y del Mar, Universidad Politécnica de Cartagena, 30202 Cartagena, España; manuel.ia@agrosolmen.es

Palabras clave: Agrivoltaica, Construcciones agrícolas, Horticultura, Sostenibilidad, CYPE

Resumen

Esta comunicación presenta el diseño de una estructura agrovoltaica para cultivos hortícolas, empleando perfiles de invernaderos comerciales con el fin de maximizar tanto la producción agrícola como la generación de energía solar. En primer lugar, se describen los condicionantes en el proceso de diseño, tales como la orientación y las dimensiones de los paneles solares, así como la compatibilidad con la maquinaria agrícola utilizada en cultivos hortícolas. A continuación, se identifican, mediante simulaciones, las configuraciones geométricas que equilibran la generación de energía, la producción agrícola y los perfiles utilizados en invernaderos comerciales. Estas simulaciones permiten evaluar diversas configuraciones estructurales y seleccionar las más adecuadas, considerando los requisitos de resistencia y deformabilidad. Finalmente, los resultados obtenidos muestran que el uso de perfiles de invernaderos comerciales es viable para determinadas configuraciones geométricas, lo que facilitaría su instalación por parte de empresas especializadas en invernaderos y reduciría los costes de construcción. El diseño propuesto proporciona una solución comercial para la producción agrícola y energética sostenibles.

INTRODUCCIÓN

La creciente demanda de energía renovable y la necesidad de optimizar el uso del suelo agrícola han impulsado la investigación en sistemas agrovoltaicos, que combinan la producción agrícola con la generación de energía solar. Este enfoque busca maximizar la eficiencia del uso del terreno, proporcionando beneficios tanto económicos como ambientales. El problema radica en encontrar un diseño estructural que permita la coexistencia eficiente de cultivos hortícolas y paneles solares, sin comprometer la productividad de ninguno de los dos sistemas (Amaducci et al. 2018; Weselek et al, 2020). Estudios previos han demostrado que la sombra parcial de los paneles solares puede afectar el crecimiento de ciertos cultivos, pero también puede reducir la evaporación del agua del suelo, lo que podría ser beneficioso en climas áridos (Dupraz et al., 2011; Marrou et al., 2013).

En este contexto, la comunicación se centra en el diseño de una estructura agrovoltaica utilizando perfiles de invernaderos comerciales. Estos perfiles son utilizados por empresas especializadas en la construcción de invernaderos y ofrecen una solución potencialmente económica y compatible con las prácticas agrícolas existentes. La hipótesis de trabajo plantea si es posible diseñar una estructura que optimice la producción agrícola y la generación de energía solar utilizando estos perfiles comerciales. Los objetivos del trabajo son establecer los condicionantes del diseño, como la inclinación y las dimensiones de la estructura compatibles con los paneles solares y la maquinaria agrícola, y analizar la viabilidad del uso de perfiles de invernaderos comerciales a partir

de estos condicionantes.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para el diseño de la estructura agrovoltaica, se utilizaron perfiles de invernaderos comerciales, seleccionados a partir de su disponibilidad y compatibilidad con las prácticas agrícolas actuales en la construcción de invernaderos. El material empleado para los perfiles estructurales fue el acero galvanizado S235. La estructura propuesta tiene una luz de 20 metros, diseñada para integrar los paneles solares y el paso de maquinaria agrícola con los brazos desplegados. La separación entre pórticos se estableció en función de las dimensiones de los paneles solares (1303x2384x33 mm), permitiendo integrar tres paneles entre cada pórtico y cuatro paneles en cada faldón de la estructura. La separación entre pórticos fue de 3,91 metros, correspondiente a las dimensiones de tres placas fotovoltaicas. El número total de pórticos fue de cinco, lo que permite ubicar 12 placas, con una longitud total de 15,64 metros.

La configuración de la estructura se realizó mediante cerchas inclinadas a dos aguas. El resto de la estructura es similar al estándar de invernaderos, excepto el ángulo de salida del pórtico, que es de 5º. La altura del canto de las cerchas se analizó para dimensiones de 1,00 metro, 1,40 metros y 1,80 metros utilizando perfiles tubulares RHS para el cordón superior e inferior y perfiles para las diagonales.

Las configuraciones geométricas de la estructura agrovoltaica fueron analizadas mediante el programa informático CYPE 3D. Se analizaron las diferentes configuraciones con los perfiles de invernaderos comerciales bajo diferentes combinaciones de cargas, incluyendo el peso de los paneles solares, y las sobrecargas de mantenimiento, viento y nieve.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las simulaciones realizadas con el programa CYPE 3D permitieron evaluar la resistencia y deformabilidad de las celosías inclinadas a dos aguas, utilizando perfiles de invernaderos comerciales (Figura 1). Los perfiles tubulares RHS 140x80x4.0 fueron seleccionados para el cordón superior e inferior, y perfiles CHS 80x3.0 para las diagonales. Los perfiles utilizados en las simulaciones cumplieron con los requisitos de resistencia y deformabilidad bajo las cargas consideradas (Figura 2).

Para un canto de 1,00 metro, la flecha máxima fue de 4,6 cm. La tensión máxima a resistencia de las secciones fue de 194,57 MPa. El esfuerzo axil máximo de compresión fue de 58,8 kN y el esfuerzo axil máximo de tracción fue de 57,3 kN. Para un canto de 1,40 metros, la flecha máxima fue de 2,1 cm. La tensión máxima a resistencia de las secciones fue de 131,12 MPa. El esfuerzo axil máximo de compresión es de 39,6 kN y el esfuerzo axil máximo de tracción fue de 38,3 kN. Para un canto de 1,80 metros, la flecha máxima fue de 1,26 cm. La tensión máxima a resistencia de las secciones fue de 99,34 MPa. El esfuerzo axil máximo de compresión fue de 30 kN y el esfuerzo axil máximo de tracción fue de 28,6 kN.

CONCLUSIONES

El análisis de estos resultados sugiere que se debería optar por cantos de más de 1,4 metros para obtener esfuerzos axiles admisibles para los perfiles utilizados en invernaderos comerciales. A partir de ese canto, las deformaciones son de aproximadamente 2 cm, por lo que sería necesario valorar si son compatibles con los mecanismos utilizados en los paneles solares

Agradecimientos

Este estudio forma parte del Programa AGROALNEXT que ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades (MICIU) con fondos NextGenerationEU (PRTR-C17.I1) y por la Fundación Séneca con fondos de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia (CARM).

El presente proyecto forma parte la convocatoria para proyectos de innovación de interés general por grupos operativos de la asociación europea para la innovación en materia de productividad y sostenibilidad agrícolas (AEI-AGRI), con fondos procedentes del Fondo Europeo Agrícola de Desarrollo Rural (FEADER) y por el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.

Referencias

Amaducci S., Yin X., & Colauzzi, M. 2018. Agrivoltaic systems to optimise land use for electric energy production. Applied Energy, Volume 220, 545-561.

Dupraz, C., Marrou, H., Talbot, G., Dufour, L., Nogier, A., and Ferard, Y. 2011. Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: Towards new agrivoltaic schemes. Renewable Energy, 36(10), 2725-2732.

Marrou, H., Dufour, L., and Dupraz, C. 2013. Productivity and radiation use efficiency of lettuces grown in the partial shade of photovoltaic panels. European Journal of Agronomy, 44, 54-66.

Weselek, A., Ehmann, A., Zikeli, S., Lewandowski, I., Schindeleand, S., and Högy, P. 2019. Agrophotovoltaic systems: applications, challenges, and opportunities. A review. Agron. Sustain. Dev. 39, 35.

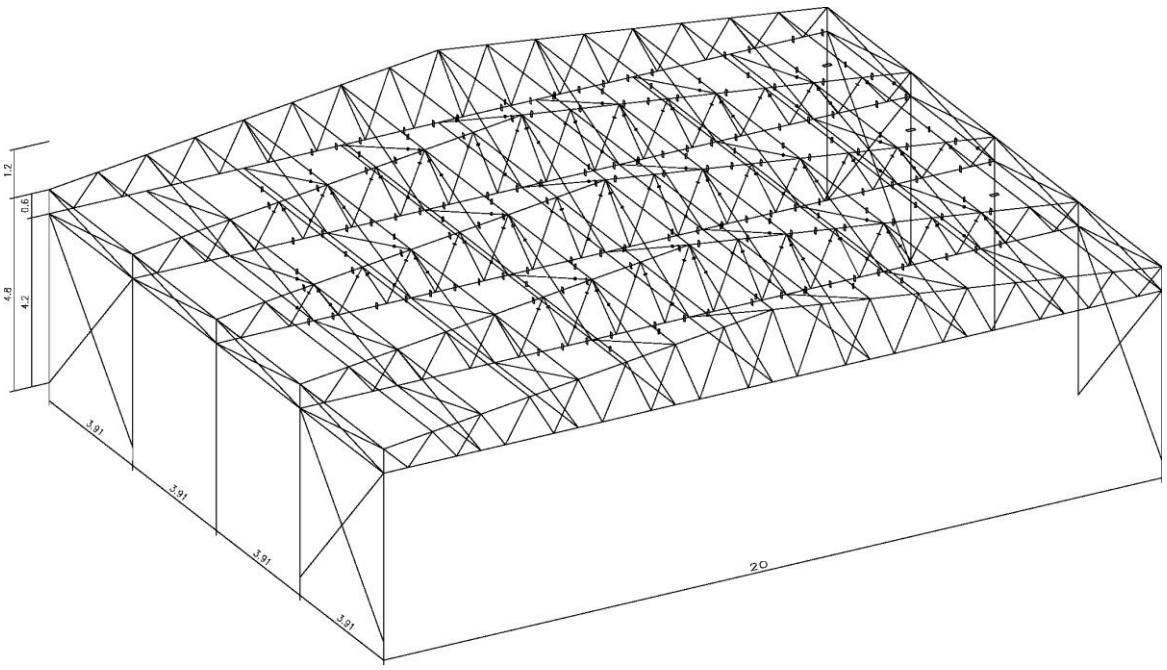


Figura 1: Vista tridimensional de la estructura

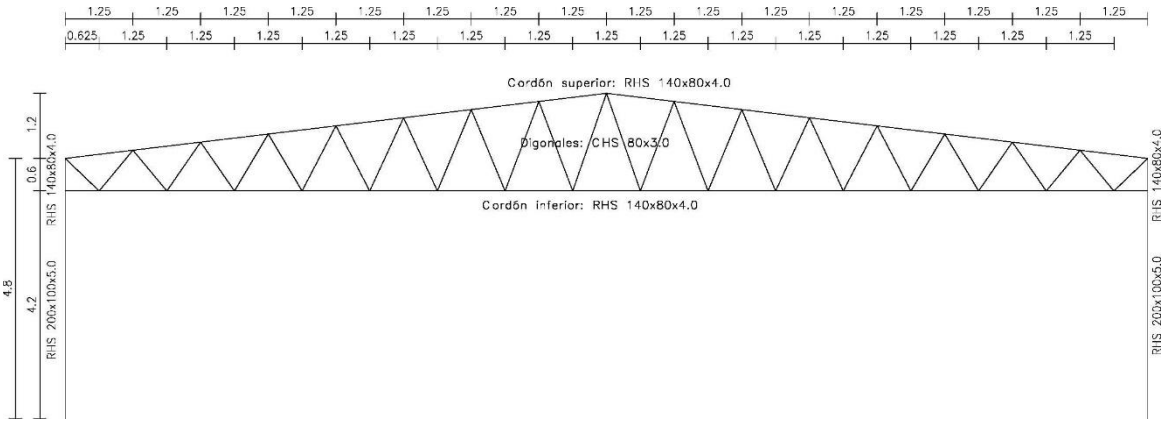


Figura 2: Alzado del pórtico a dos aguas con los perfiles seleccionados en CYPE 3D

Invernaderos agrivoltaicos inteligentes en la región del Mediterráneo

Pablo González-Planells[1*], Coral Ortiz-Sanchez[1], Francisco Rovira-Mas[1], Elena Chaveli- Lopez[2], Carmina Reig-Valor[2]

[1]Laboratorio de Robótica Agrícola. Dpto Ingeniería Rural y Agroalimentaria. Universitat Politècnica de València, Valencia.
[2]Instituto Agroforestal Mediterráneo, Dpto Producción Vegetal, Universitat Politécnica de Vaència, Valencia.

*Autor para correspondencia: pabgonpl@upvnet.upv.es

Palabras Clave: Sistemas Agrivoltaico, Sensores, Agricultura de Precisión, Paneles Solares, Avisos y alertas

Resumen: **Este estudio presenta el diseño e implementación de sensores en invernaderos experimentales para crear sistemas agrivoltaicos (APV) inteligentes en cultivos de alto valor. Integrando tecnologías de sensores al sistema, permite un monitoreo continuo de parámetros clave como la temperatura, humedad y el índice de vegetación (NDVI), optimizando el manejo del cultivo y el uso de recursos. En los invernaderos, se evaluaron configuraciones de paneles solares en densidades media y total para investigar el impacto de estos en las condiciones ambientales. Los resultados indicaron que el tratamiento de media densidad aumentó la temperatura de la hoja y el ambiente, probablemente debido a la radiación difusa generada por los paneles, mientras que los valores de NDVI fueron más elevados en el control (sin paneles). Esto podría estar indicando que el sombreado de los paneles solares está relacionado con estrés térmico afectando la actividad de los estomas. El sistema también incluye una red de avisos automáticos, activados cuando las condiciones exceden umbrales críticos, como temperaturas de hoja por encima de 34ºC en pitahaya, facilitando la toma de medidas, como ventilación forzada o riego, para mitigar el estrés térmico e hídrico. Este control permitió optimizar tanto el crecimiento del cultivo como la producción de energía, demostrando la viabilidad de los sistemas agrivoltaicos inteligentes para una agricultura sostenible.**

INTRODUCCIÓN

Se define "invernadero inteligente" como la integración de sensores, internet de las cosas (IoT) y otras tecnologías innovadoras en un invernadero tradicional (Rayhana *et al.*, 2020). Esta implementación permite tomar decisiones razonadas al disponer de ciertos parámetros esenciales, como NDVI o temperatura, mejorando el estado y rendimiento del cultivo. Un ejemplo claro en esta tecnología es el manejo del riego cuando la humedad del suelo baja cierto umbral o la ventilación forzada cuando la temperatura de la hoja excede según el criterio del agricultor o técnico (González-Planells, P. 2024).

Por otro lado, un sistema agrivoltaico consiste en el uso dual del suelo entre paneles solares con diferente configuración y cultivo agrícola. Pueden estar unidos o separados en la misma unidad de suelo, es decir, puede estar el cultivo debajo de los paneles o pueden estar separados en las filas sin interaccionar (Dupraz *et al.,* 2011).

En este artículo se presenta el diseño de instalación de diferentes sensores en

invernaderos experimentales para el monitoreo del estado de dos cultivos de alto valor: la higuera y la pitahaya, evaluando dos configuraciones de sistema agrivoltaico (APV). Los objetivos de este estudio fueron: (1) describir la sensórica utilizada para convertir los invernaderos en sistemas inteligentes; y (2) presentar ejemplos del uso de los datos generados para evaluar las condiciones ambientales y de cultivo bajo distintas configuraciones de paneles solares, explorando su viabilidad y potencial para una agricultura sostenible.

MATERIALES Y MÉTODOS

1. Invernaderos agrivoltaicos inteligentes

Configuración de paneles solares

En los invernaderos se implementaron dos configuraciones de paneles solares: media densidad de paneles solares y densidad total, además de un control sin paneles. Los paneles se dispusieron en una configuración fija con una inclinación de 20º, tecnología bifacial y una potencia máxima pico de 390 W.

Sensorización de los invernaderos

En cada invernadero se instaló una serie de sensores ambientales y de cultivo (Tabla 1). Las estaciones meteorológicas se ubicaron en medio del pasillo en cada tratamiento de paneles solares a una altura de 0,8 m sobre el suelo. Los sensores de cultivo (excepto el sensor de suelo) se colocaron en una planta representativa dentro de la fila de cultivo. El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) se posicionó a una distancia adecuada para abarcar la máxima superficie foliar sin generar error. El sensor de suelo se enterró cerca de la zona radicular de la planta, entre 8-12 cm de profundidad. El sensor de dióxido de carbono se situó próximo a la vegetación. En cuanto a los sensores de irradiación solar, se instalaron por encima de la altura de la copa del árbol para determinar la cantidad de irradiación incidente en cada tratamiento. La Fig. 1 muestra la distribución de los sensores dentro de los dos invernaderos (pitahaya e higuera).

Sistema de control, adquisición de datos y avisos

El sistema de control consistió en un software programado específicamente para el proyecto (C++, Microsoft Visual Studio). Este recogía todos los datos y los visualizaba en la pantalla de inicio, además de guardarlos en un archivo tipo “txt” cada 15 minutos. Los ficheros se subían a la nube a través de un controlador lógico programable (PLC) permitiendo el acceso remoto y la visualización con la interfaz de usuario “Grafana” (Grafana Labs, NY, EEUU). Desde esta interfaz se emitían dos tipos de aviso mediante correo electrónico a los usuarios: “Error de lectura” y “Fuera de Rango”.

2. Caso de estudio

Durante la campaña de 2023 se recogieron los datos de los diferentes sensores instalados en los invernaderos (Fig.2 y Fig.3). A modo de ejemplo, se presentan y discuten los resultados obtenidos en el invernadero de higuera para la temperatura de hoja, ambiente y NDVI, analizados con Matlab 2023b (MathWorks, MA, EEUU), comparando el tratamiento de media densidad de paneles solares con el control sin paneles.

En cuanto a la temperatura de la hoja (promedio, máximo y mínimo), se observaron diferencias significativas entre el tratamiento de media densidad y el control sin paneles, con un aumento de la temperatura al incorporar los paneles. De manera similar, la temperatura ambiente promedio fue estadísticamente superior en el tratamiento de media densidad (aproximadamente 2ºC más) (Fig.2). La mayor

temperatura registrada podría deberse a que la radiación difusa emitida por los paneles solares calentara el aire próximo a la planta.

Finalmente, respecto al NDVI, el valor promedio fue más elevado en el control ($NDVI_{control}$ » 0,925) en comparación con el tratamiento de media densidad ($NDVI_{MD}$ » 0,856). Esto podría explicarse por el estrés causado por el sombreado, lo que generó un cierre de estomas y el consiguiente aumento de temperatura.

Además, el sistema de avisos o alerta resultó muy útil en diversas situaciones; por ejemplo, en el cultivo de pitahaya, cuando la temperatura de la hoja aumentaba en exceso (umbral = 34ºC), se enviaba una notificación por email para poder actuar y proceder a la ventilación forzada, reduciendo así el estrés térmico al que podía estar sometida la planta. También fue útil para monitorear el estado hídrico de la planta y proporcionar el agua necesaria.

CONCLUSIONES

La implementación de sensores para convertir el invernadero en un sistema inteligente ha permitido monitorizar de forma continua el estado ambiental y de las plantas, evaluando empíricamente distintas configuraciones de paneles solares en cultivos de alto valor para probar su viabilidad. Las alertas automáticas demostraron ser eficaces para prevenir condiciones adversas, como el estrés térmico o hídrico, facilitando así la implementación de estrategias de manejo que optimizan tanto el crecimiento de los cultivos como la producción de energía, y resaltando el potencial de los sistemas agrivoltaicos para aplicaciones sostenibles en la agricultura.

Agradecimientos: Los autores quieren agradecer a los proyectos “integración de sistemas agronómicos y fotovoltaicos para la producción inteligente de cultivos mediterráneos y subtropicales (INNEST/2022/115)” y “RECOLECCIÓN INTELIGENTE Y AUTOMATIZADA DE CULTIVOS DE ALTO VALOR EN INVERNADEROS
SOSTENIBLES (INNEST/2023/106)” financiados por la Agencia Valenciana de la Innovación.

Referencias

Dupraz, C., Marrou, H., Talbot, G., Dufour, L., Nogier, A., & Ferard, Y. (2011). Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: Towards new agrivoltaic schemes. *Renewable energy*, *36*(10), 2725-2732.

González-Planells P., Ortiz C, Rovira-Más F, Elena Chaveli-López, Carmina Reig, Víctor Añón (2024) Effect of solar panels on fruit quality for photovoltaic greenhouses. EurAgEng Conference (Fecha) Proceedings. 710-718

Gonzalez Planells, P. (2024). Pitahaya and fig production, and quality, under agrivoltaic systems in Spain. Economic limitations. Universitat Politècnica de València. http://hdl.handle.net/10251/210173

Rayhana, R., Xiao, G., & Liu, Z. (2020). Internet of things empowered smart greenhouse farming. *IEEE Journal of Radio Frequency Identification*, *4*(3), 195-211.

Tabla 1. Implantación de múltiples sensores en el proyecto Smart Agrivoltaic (2022-

2024).

Puntos de medida	Sensores	Fabricante	Variables estimadas	Unidades	Tipos
4	Comet T7311	COMET SYSTEM, s.r.o (República Checa)	Temperatura del aire	°C	Ambiente
4	Comet T7311	COMET SYSTEM, s.r.o	Humedad relativa del aire	%	Ambiente
4	Comet T5240	COMET SYSTEM, s.r.o	Presión atmosférica	hPa	Ambiente
2	Comet T5240	COMET SYSTEM, s.r.o	Concentración de CO_2	ppm	Cultivo / Ambiente
6	Apogee SP-215 Thermal Pyranometer	Apogee Instruments, Inc. (EE. UU.)	Irradiación solar	W/m^2	Cultivo / Ambiente
-	Apogee SI-431 / S2-411 / S2-412	Apogee Instruments, Inc. (EE. UU.)	Irradiación solar (radiómetro)	W/m^2	Cultivo / Ambiente

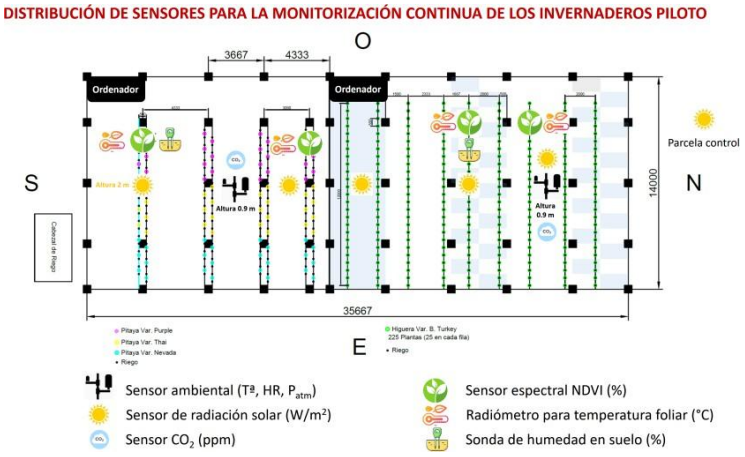


Figura 1. Red de sensores para la monitorización continua en invernaderos (proyecto Smart Agrivoltaic).

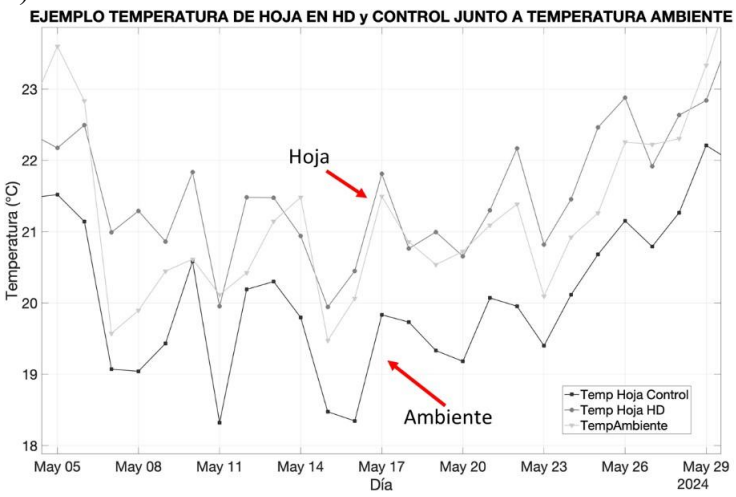


Figura 2. Ejemplo de los datos de temperatura promedio diario de hoja y ambiente en higuera en el mes de mayo 2023

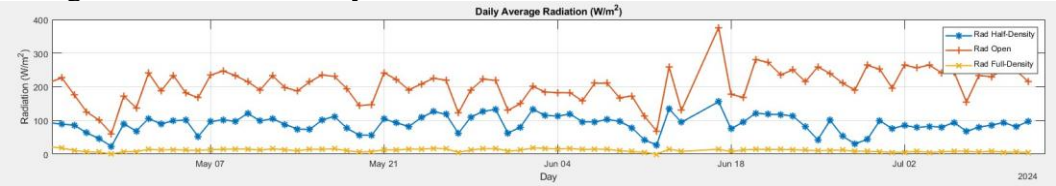


Figura 3. Irradiación Solar promedio diario para cada tratamiento de higuera en 2023

Modelización 3D de un sistema mecánico para el movimiento de un módulo agrovoltaico.

Manuel Sijes Marín [1], Dolores Parras-Burgos [2,*], Francisco J. Cánovas [3], y José Miguel Molina-Martínez [1]

[1] Grupo de investigación de Ingeniería Agromótica y del Mar, Universidad Politécnica de Cartagena, C/ Ángel s/n, Ed. ELDI E1.06, 30203, Cartagena, Murcia.
manuel.sijes@edu.upct.es, manuel.ia@agrosolmen.es, josem.molina@upct.es
[2] Departamento de Estructuras, Construcción y Expresión Gráfica, Universidad Politécnica de Cartagena, C/ Doctor Fleming s/n, 30202, Cartagena, Murcia. dolores.parras@upct.es
[3] Departamento de Automática, Ingeniería Eléctrica y Tecnología Electrónica, Universidad Politécnica de Cartagena, C/ Doctor Fleming s/n, 30202, Cartagena, Murcia. fcojavier.canovas@upct.es

Palabras clave: sistema agrovoltaico, movimiento placas solares, sistema mecánico, iluminación de cultivos, sombreado de cultivos.

Resumen

En esta comunicación se presenta un sistema que pretende optimizar en una misma superficie la gestión de energía de una forma inteligente con la producción hortícola. Este sistema está configurado con una estructura que contiene un conjunto de placas fotovoltaicas que pueden desplazarse de forma horizontal por debajo de otros paneles que son fijos. Esto permite el paso de luz al interior de la nave agrovoltaica variando la sombra entre un 50% y el 100%. Para conseguir esto, el Grupo de Investigación de Ingeniería Agromótica y del Mar de la Universidad Politécnica de Cartagena ha diseñado y modelado en 3D con el software de diseño asistido por ordenador SolidWorks, un proyecto completo para su futura fabricación e implantación en una zona de cultivo. La novedad de este sistema es la configuración y el control de las placas fotovoltaicas móviles, el cual consiste en un sistema mecánico que consta de un conjunto de engranajes capaz de mover la mitad de las placas de una cubierta a la vez y en sentido contrario que la cubierta contigua. Además, se puede destacar la robustez de la estructura, la versatilidad y la escalabilidad del diseño, para adaptarlo a cualquier superficie, mejorando su mantenimiento con sus diferentes módulos.

INTRODUCCIÓN

La Región de Murcia se sitúa en la zona de Europa que mayor cantidad de horas de sol recibe anualmente, cuya cifra se situó en el año 2020 en 3.302,4 horas ("MurciaEnCifras. Observatorio de Murcia.,"). La solar fotovoltaica murciana generó en 2022 un total de 2.104 GWh, un 4,7% más que en el ejercicio anterior. La contribución de esta tecnología al mix de generación fue del 18,1%, una cifra clave para que la producción renovable fuera responsable del 22,9% del total. Además, para ese mismo año, la superficie dedicada a cultivos herbáceos fue de 309.610 ha ("Portal Estadístico de la Región de Murcia," 2020). siendo el sector agroalimentario de la Región de Murcia responsable de la generación del 20% del Producto Interior Bruto (PIB), lo que lo convierte en uno de los pilares básicos de la economía regional, y situando a Murcia como la primera provincia exportadora de frutas y verduras con 2,5 millones de toneladas exportadas en el último año, lo que ha generado un valor de 2.364,95 millones de euros.

Teniendo en cuenta todos estos datos, se deduce que el impacto económico que tendría el

que estas dos actividades tan importantes se pudieran desarrollar sobre una misma superficie, potenciaría modalidades de explotación muy diversas y rentables: desde el productor agrícola que asume la inversión tanto de la estructura como de la cubierta fotovoltaica, desdoblándose además de como explotador agrícola, también como productor y comercializador de energía fotovoltaica, hasta el agricultor que asume el rol de consumidor de la energía fotovoltaica que se produce sobre sus cultivos, sin necesidad de tener que invertir en infraestructuras nuevas y pagando una energía eléctrica a precio muy inferior a la que le ofrece el mercado eléctrico nacional (Real decreto 244/2019; Real decreto 413/2014). Por ejemplo, algunos estudios recientes (Mamun, Dargusch, Wadley, Zulkarnain, & Aziz, 2022) han demostrado que los sistemas agrovoltaicos son capaces de aumentar la productividad total del suelo (entendida como la suma de ambos beneficios) alrededor de un 70%. De este beneficio, una parte muy importante, hasta un 80%, podría provenir de la venta de electricidad. Además, aunque la implantación de estas explotaciones supone una importante inversión inicial, algunos trabajos han observado que, en un cultivo tradicional, un 50% de la inversión requerida se puede recuperar en los 2 primeros años (Majumdar & Pasqualetti, 2018).

Teniendo en cuenta lo anterior, en esta comunicación se presenta un estudio para unificar la producción hortícola y la energética en un mismo espacio. El sistema estructural agrovoltaico que se propone es un diseño mecánico modelado en 3D con el movimiento sincronizado de las diferentes placas solares, para conseguir una apertura y cierre de todos los paneles y obtener así la mayor producción fotovoltaica y hortícola posible según el tipo de cultivo, optimizando el espacio disponible y favoreciendo ambas actividades.

MATERIALES Y MÉTODOS

Las características previas que se han considerado para el diseño del sistema estructural agrovoltaico, es que las dimensiones del pórtico debían tener 4 m de alto, 14 m de ancho, y 13,5 m de largo. El ángulo de inclinación de la cercha debía ser de 9,33º aproximadamente. A partir de estas medidas y conociendo las placas a utilizar (panel solar 450 W, 24 V monocristalino ERA) se han diseñado las cubiertas, de forma que se pueda aprovechar la mayor cantidad de espacio y poder generar la mayor cantidad de energía posible. El sistema lo conforman 72 placas en total divididas en 3 cubiertas, cuya potencia instalada sería de 32,4 kW. Además, todos los componentes y el sistema propuesto en esta comunicación se han modelado en 3D con el software de diseño asistido por ordenador SolidWorks 2023.

En cuanto a los materiales, se han estudiado aquellos más adecuados para cada uno de los elementos que conforman el sistema estructural:

1. Aluminio: se utilizará en prácticamente todos los elementos excepto en la viga base para evitar problemas a la hora de soldar. Se elige el aluminio ya que su coste y peso son menores a los del acero. También tiene una gran resistencia a la corrosión, humedad, radiación solar y a los cambios de temperatura.
2. Acero: el uso de este material se limita solamente al elemento llamado viga base que es el que se suelda directamente a la estructura, la cual es también de acero evitando de esta forma problemas a la hora de soldar.

RESULTADOS

El sistema estructural propuesto está formado por un ensamblaje fijo y otro móvil conectados entre sí mediante raíles, los cuales aumentan la rigidez de la estructura (Fig. 1). El sistema engranaje/cremallera conecta los ensambles móviles de cada mitad de la cubierta, haciendo que se muevan a la vez y en sentido contrario (Fig. 2 izq.). La cumbrera, además de proteger la apertura superior de la cubierta, añade un poco más de rigidez al conjunto (Fig. 2 der.).

Una vez diseñado todo el sistema, se han realizado diversas simulaciones y cálculos estructurales, donde se puede analizar la distribución de los esfuerzos producidos por el propio peso de la estructura según Von Mises (N/m^2). Como se muestra en la Figura 3, los esfuerzos a lo largo de toda la estructura son aproximadamente de 900 N/m^2 cuando está cerrado y unos 550 N/m^2 cuando está abierto o al 50%. De estos resultados, se concluye que la estructura tiene una gran resistencia, además, el criterio elegido para el cálculo del factor de seguridad ha sido el de Tensión de cortadura máxima, y en las tres posiciones el factor de seguridad es mayor que 3.

CONCLUSIÓN

La actual coyuntura geopolítica y económica, está provocando que los agricultores de la Región de Murcia estén empezando a reorientar su producción agrícola en zonas de regadío por producción fotovoltaica, desaprovechando la posibilidad de convivir ambas formas de explotación en la misma superficie. Para resolver este problema, en esta comunicación se presenta una solución novedosa que puede permitir que convivan ambas actividades de forma simultánea. El resultado es un sistema estructural mecánico para el movimiento sincronizado de módulos fotovoltaicos que permite regular la apertura y cierre de los diferentes paneles fotovoltaicos. Teniendo en cuenta las condiciones climáticas y las necesidades de las plantas en cada fase de crecimiento, se puede regular de forma controlada la entrada de luz al cultivo. Con esta propuesta, se puede reducir el impacto en la flora y fauna debido a grandes instalaciones fotovoltaicas y se evitaría que los suelos cultivables perdieran fertilidad.

Agradecimientos
Este estudio forma parte del Programa AGROALNEXT que ha sido financiado por MICIU con fondos NextGenerationEU (PRTR-C17.I1) y por la Fundación Séneca con fondos de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia (CARM).

Referencias

Majumdar, D., & Pasqualetti, M. J. (2018). Dual use of agricultural land: Introducing 'agrivoltaics' in Phoenix Metropolitan Statistical Area, USA. *Landscape and Urban Planning, 170*, 150-168. doi:https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2017.10.011

Mamun, M. A. A., Dargusch, P., Wadley, D., Zulkarnain, N. A., & Aziz, A. A. (2022). A review of research on agrivoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 161*, 112351. doi:https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112351

MurciaEnCifras. Observatorio de Murcia. Retrieved from https://murciaencifras.es/

Portal Estadístico de la Región de Murcia. (2020). Retrieved from https://econet.carm.es/

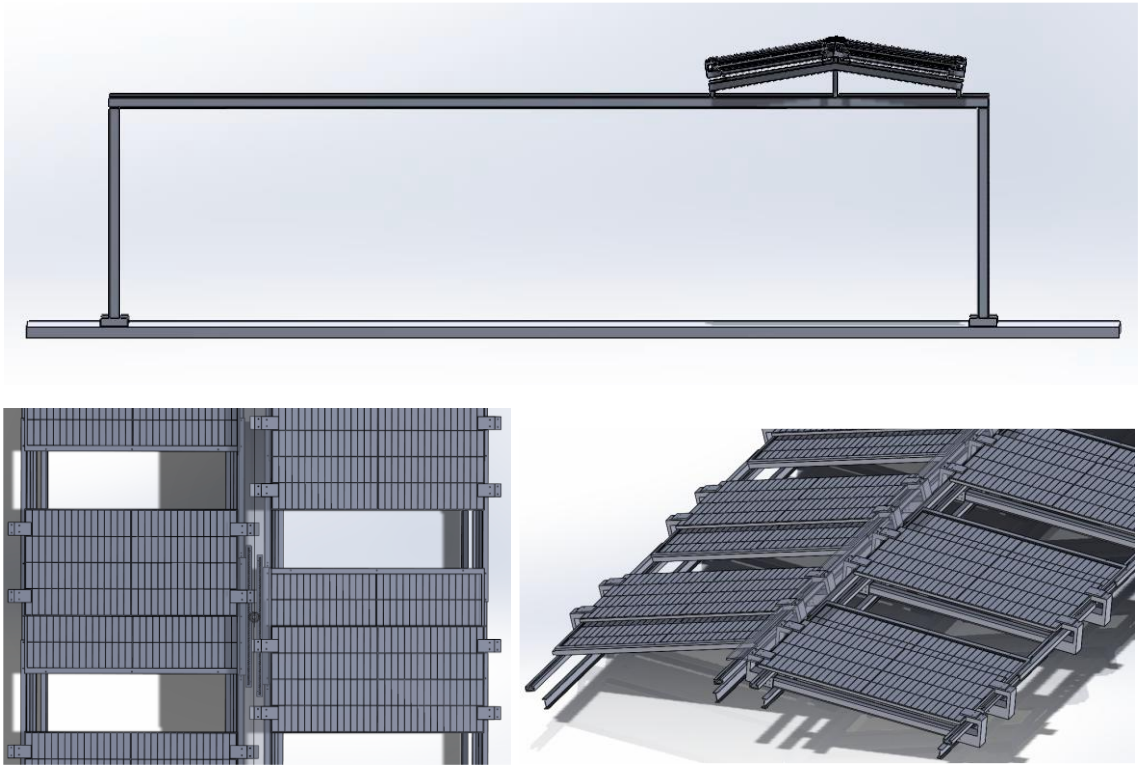


Figura 1. Sistema estructural y paneles fotovoltaicos móviles.

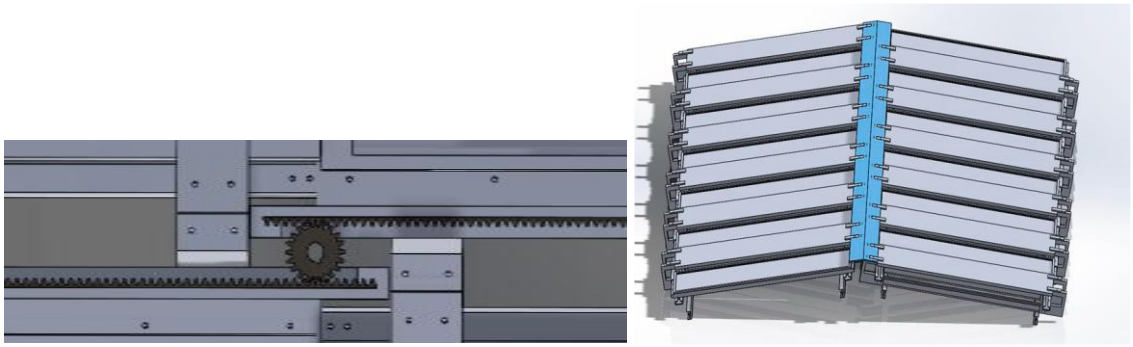
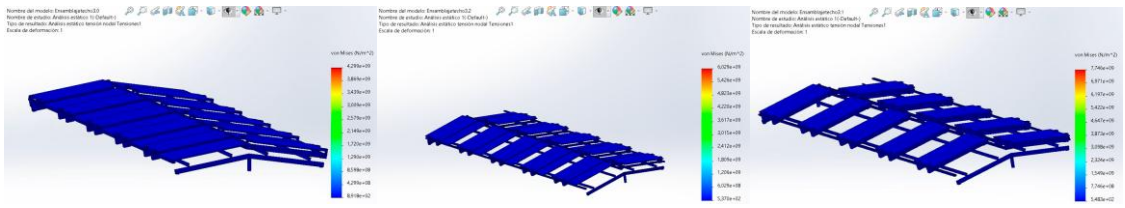


Figura 2. Sistema engranaje/cremallera (izq.) y cumbrera del sistema estructural (der.).



(a) (b) (c)

Figura 3. Esfuerzos Von Mises sobre la estructura: (a) paneles cerrados, (b) paneles con 50% de apertura, y (c) paneles abiertos.

Hacia una solución para la reducción de vibraciones en el transporte de cajas de frutas en campo mediante láminas impresas

P. Sánchez-Cachinero*, S. Bayano-Tejero, R R. Sola-Guirado

Universidad de Córdoba, Campus de Rabanales, Ctra. Nacional IV km 396, 14014, Córdoba
*Autor para correspondencia: p42sacap@uco.es

Palabras Clave: Fruto, Logística, Daño, Amortiguación, Calidad.

Resumen

Tras la recolección de la fruta, su transporte hacia el punto de acopio se realiza principalmente mediante tractores con remolques u otros vehículos similares. Estos trayectos suelen atravesar terrenos irregulares, expuestos a piedras, baches y cárcavas que producen vibraciones e impactos afectando negativamente a la calidad de la fruta. Existen soluciones para mitigar estos efectos, tales como sistemas de amortiguación o sistemas antivibración en los remolques, o bien envases específicos. Sin embargo, no se encuentran estudios que aporten soluciones en el origen, esto es, aplicadas directamente a las cajas de transporte tras la recolección diseñadas para amortiguar eficazmente las vibraciones. En este contexto, la fabricación aditiva, o impresión 3D, surge como una técnica innovadora y económica para la creación de metamateriales con propiedades dinámicas controlables a través del diseño estructural. En este estudio, se investigaron diversos tipos de metamateriales para la mitigación de vibraciones, fabricándose láminas de 1 cm de espesor de ABS mediante impresión aditiva, que pudieran simular fondos de cajas. Las variables analizadas incluyeron el número de patrones, el espesor y ángulo de estos patrones. En total, se evaluaron seis probetas diferentes, comparándolas con una probeta maciza que se utilizó como control y se registraron las vibraciones generadas en un camino rural mediante un acelerómetro ubicado en el suelo del remolque. Esta vibración fue reproducida en ensayos de laboratorio mediante un vibrador electromagnético, evaluando la eficacia de mitigación de impactos colocando sobre el vibrador las láminas ancladas con un peso de fruta. Las aceleraciones registradas mostraron una reducción de los impactos entre un 40% y un 80%. También se realizaron unas pruebas de impacto sobre las probetas que permitieron identificar aquellas con mejor capacidad de amortiguación donde se obtiene el mismo orden que en el estudio previo.

INTRODUCCIÓN

El transporte de la fruta tras su recolección en campo hasta la industria se produce en diferentes vehículos de diferentes tipologías y generalmente utilizando cajas. El tránsito por diferentes vías genera vibraciones e impactos que se transmiten a través del chasis del vehículo hasta el fruto (Al-Dari et al., 2022), ejerciendo un impacto negativo sobre la calidad de las frutas. La mayoría de las investigaciones existentes se enfocan en los efectos del transporte del fruto en carretera, pero no se han encontrado estudios que analicen los efectos del transporte previo desde el punto de recolección hasta el punto de acopio o carga en camión en campo. Estos trayectos, aunque sean cortos, discurren sobre terrenos especialmente irregulares y heterogéneos y se ven afectados por piedras, baches y cárcavas. Algunos autores proponen soluciones en la maquinaria como sistemas de solución neumática (Soleimani y Ahmadi, 2015) o plataformas antivibración en remolques. Sin embargo, las adaptaciones en máquinas no son fáciles de llevar a cabo en la práctica. Por ello, este trabajo pone el foco en la utilización de láminas antivibración colocadas en

el fondo de las cajas de frutas como opción de bajo coste y alternativa a las adaptaciones en la maquinaria. La literatura reporta diferentes trabajos que abordan el efecto de los envases en el transporte, como poliestireno en cajas o envases de cartón corrugado (Fernando et al., 2020), aunque existe un vacío en torno al desarrollo de recubrimientos mitigadores de vibraciones. Los modelos quasi-zero-stiffness (QZS), resultan muy prometedores para el diseño de dispositivos aisladores de vibración (Liu et al., 2024) gracias a sus características no lineales. En este contexto, los metamateriales, cuyas propiedades dependen de su estructura más que de su composición, presentan no linealidades con cualidades de mitigación de vibraciones.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se diseñó un modelo de probeta de 100 x 100 x 10 mm con las capas superior e inferior de 0.8 mm de espesor, con propiedades de un aislante QZS. Varios son los autores que plantean el uso de modelos con flexión con puntos fijos que tienen la característica de una zona de alta rigidez. El uso de elementos inclinados es útil conceptualmente para conseguir el fenómeno de flexión. Además, el uso de perfiles multisegmento permite rigidizar el perfil y obtener una zona de alta rigidez (Hamzehei et al., 2023). Los nervios de estas probetas se parametrizaron en ángulo de inclinación (A), separación o patrón lineal (P) en términos del número de nervios por cada 100 mm lineales y espesor (T). Por otro lado, de cara a simular el comportamiento de una caja de plástico comercial sin amortiguación, se fabricó una probeta de control completamente maciza.

Para caracterizar las vibraciones presentes durante el transporte de fruta en campo, se circuló con un tractor a 10 km/h por un trayecto realizado regularmente con 1000 kg de manzanas en cajas (Fig. 1a). Se colocó un acelerómetro uniaxial en la base del remolque alineado con el eje del remolque registrando la vibración. Esta señal fue reproducida como salida del vibrador electromagnético y se observó la capacidad de reducir 3 picos relevantes de la señal con cada una de las probetas, desde la base metálica a una masa a aislar (A_{TRANS}=A_{RMS}masa/A_{RMS}base-chapa) (Fig. 1b).

Se evaluó la ratio de amplitud de vibración con el propósito de caracterizar la capacidad de amortiguación ante impactos de las distintas probetas en comparación con la lámina de control planteada. Se utilizó un dispositivo diseñado para lanzar la fruta en vertical desde una posición fija establecida en 20 cm de altura como una medida representativa de la posición desde la que se suele soltar la fruta dentro de una caja, diseñada con un espacio destinado a la colocación de un acelerómetro triaxial inalámbrico (Fig. 1c).

RESULTADOS

Las distintas grabaciones de señal en el remolque observan que su respuesta temporal se caracteriza por estar compuesta de un gran número de aceleraciones pico (impactos), abarcando frecuencias principales de 3-4Hz. En la Tabla 1 se muestra la A_{RMS} y la A_{TRANS} base-masa de los 3 picos máximos seleccionados en el estudio. En el pico 1, la placa de control muestra diferencias significativas con todas las demás (ANOVA, $p < 0.05$), teniendo la mayor A_{TRANS} 57.40%, chapa-masa que el resto de las probetas. La configuración A45-P4-T0.8, no mostró diferencias significativas con A45-P6-T0.4 y A30-P4-T0.8. La configuración A30-P4-T0.8, muestra diferencias significativas con todas las demás, excepto con A45-P4-T0.4 y A45-P4-T0.8. Los menores valores de ATRANS de en torno al 19% se dieron en A30-P6-T0.4 y A30-P4-T0.4, las cuales muestran diferencias significativas con todas las demás excepto con ellas mismas. En Pico 2 se muestran diferencias significativas de todas las probetas con todas ellas (ANOVA, $p < 0.05$). En el estudio de reducción del Pico 3, la probeta de control muestra diferencias significativas con todas las demás, ofreciendo la mayor A_{TRANS}, en este caso del 83.70%, al igual que en el pico 2 (ANOVA, $p < 0.05$). A45-P4-T0.8 muestra diferencias significativas con todas las demás excepto

con A30-P4-T0.8. La configuración A45-P6-T0.4 muestra diferencias significativas con todas excepto con A45-P4-T0.4. Los menores valores de A_{TRANS} chapa-masa del pico 3, se dieron en A30-P6-T0.4 y A30-P4-T0.4 como los picos 1 y 2 (Fig. 1b). Los resultados de ratio de amplitud de vibración obtenidos las probetas teniendo como referencia la lámina de control, reportaron valores de aceleración pico de 619.17 ms^{-2}. La probeta A30-P4-T0.4 mostró una mayor ratio con respecto a las demás (331.46 ms^{-2}), presentando diferencias significativas con todas las demás (ANOVA, $p < 0.05$). A30-P6-T0.4 (244.91 ms^{-2}) y A45-P4-T0.4 (137.78 ms^{-2}), que también presentaron diferencias significativas con las demás. Las probetas A30-P4-T0.8 (64.03ms^{-2}), A45-P6-T0.4 (32.53 ms^{-2}) y A45-P4-T0.8 (13.96 ms^{-2}) son las que menores ratio de amplitud ofrecieron (Fig. 1c).

DISCUSIÓN

Existen diversos factores que afectan a la vibración registrada en el transporte como es la velocidad, condiciones del asfalto, tipo de frenos, suspensión etc. Estos factores modifican la amplitud y frecuencia de la señal registrada, tal y como se reporta en las señales reales reproducidas. Varios autores emplean el Power Spectrum Density (PSD) para el análisis en vehículos, así como para entender la exposición a la energía a las que se expone la fruta (Al-Dari et al., 2022). Los rangos de frecuencias de vibración reportados en la literatura con valores de 2-4 Hz para camiones o 2-10 Hz para semi-trailer comprendieron los valores obtenidos en este estudio, 3-4 Hz (Al-Dari et al., 2022). Las vibraciones e impactos desde la plataforma del camión, combinados con un uso inadecuado e insuficiente de envases pueden reducir considerablemente los atributos de calidad de los productos frescos. La vibración reportada en el tramo de estudio se encuentra caracterizada principalmente por impactos, pues las irregularidades y piedras son los elementos con mayor influencia en la generación de estas vibraciones. Las tres aceleraciones pico estudiadas o impactos muestran una reducción de aceleración en el orden a los resultados obtenidos en la ratio de amplitud de vibración, siendo A30-P4-T0.4 y A30-P6-T0.4 las que menores porcentajes de transmisibilidad ofrecen, y por tanto mayores capacidades de amortiguación. Se puede observar que estos porcentajes son diferentes en una misma probeta y esto se debe a la propia naturaleza del pico de aceleración donde influye la cantidad de presión ejercida, el tiempo empleado y el material de uso (Ibrahim et al., 2018).

Referencias

Al-Dairi, M., Pathare, P. B., Al-Yahyai, R., & Opara, U. L., 2022. Mechanical damage of fresh produce in postharvest transportation: Current status and future prospects. In Trends in Food Science and Technology 124, 195–207. Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.04.018

Fernando, I., Fei, J., Stanley, R., & Rouillard, V., 2020. Evaluating packaging performance for bananas under simulated vibration. Food Packaging and Shelf Life. https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2019.100428

Hamzehei, R., Bodaghi, M., Iglesias Martinez, J. A., Ji, Q., Ulliac, G., Kadic, M., Wang, C., Zolfagharian, A., & Wu, N., 2023. Parrot Beak-Inspired Metamaterials with Friction and Interlocking Mechanisms 3D/4D Printed in Micro and Macro Scales for Supreme Energy Absorption/Dissipation. Advanced Engineering Materials. https://doi.org/10.1002/adem.202201842

Ibrahim, A., Ramini, A., & Towfighian, S., 2018. Experimental and theoretical investigation of an impact vibration harvester with triboelectric transduction. Journal of Sound and Vibration. https://doi.org/10.1016/j.jsv.2017.11.036

Liu, C., Zhang, W., Yu, K., Liu, T., & Zheng, Y., 2024. Quasi-zero-stiffness vibration isolation: Designs, improvements and applications. In Engineering Structures. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.117282

Soleimani, B., & Ahmadi, E., 2015. Evaluation and analysis of vibration during fruit transport as a function of road conditions, suspension system and travel speeds. Engineering in Agriculture, Environment and Food. https://doi.org/10.1016/j.eaef.2014.08.002

Tabla 2. Registro de A_{RMS} y A_{TRANS} en las probetas en los 3 picos de estudio.

	Pico 1		**Pico 2**		**Pico 3**	
	***A*$_{RMS}$ (ms^{-2})**	**ATRANS base-masa (%)**	***A*$_{RMS}$ (ms^{-2})**	**ATRANS base-masa (%)**	***A*$_{RMS}$ (ms^{-2})**	**ATRANS base-masa (%)**
Control	3.897(0.187)	57.40(1.210) a	3.949(0.058)	63.69(0.630) a	3.619(0.024)	83.70(0.160) a
A45-P4-T0.8	4.167(0.033)	41.47(2.77) b	4.179(0.057)	47.40(0.330) b	4.01(0.056)	22.96(0.590) b
A45-P6-T0.4	3.791(0.001)	43.08(0.130) bc	3.119(0.016)	44.41(0.160) c	3.598(0.000)	20.38(0.030) c
A30-P4-T0.8	3.922(0.031)	37.00(0.33) cd	3.484(0.003)	42.45(0.080) d	4.031(0.002)	22.34(0.360) b
A45-P4-T0.4	3.903(0.036)	35.93(0.490) d	3.07(0.042)	40.78(0.380) e	3.867(0.010)	20.62(0.030) c
A30-P6-T0.4	3.868(0.041)	19.13(0.090) e	3.529(0.002)	34.67(0.140) f	4.099(0.015)	14.36(0.600) d
A30-P4-T0.4	3.709(0.028)	19.68(0.140) e	3.523(0.012)	33.36(0.140) g	4.071(0.001)	13.27(0.020) d

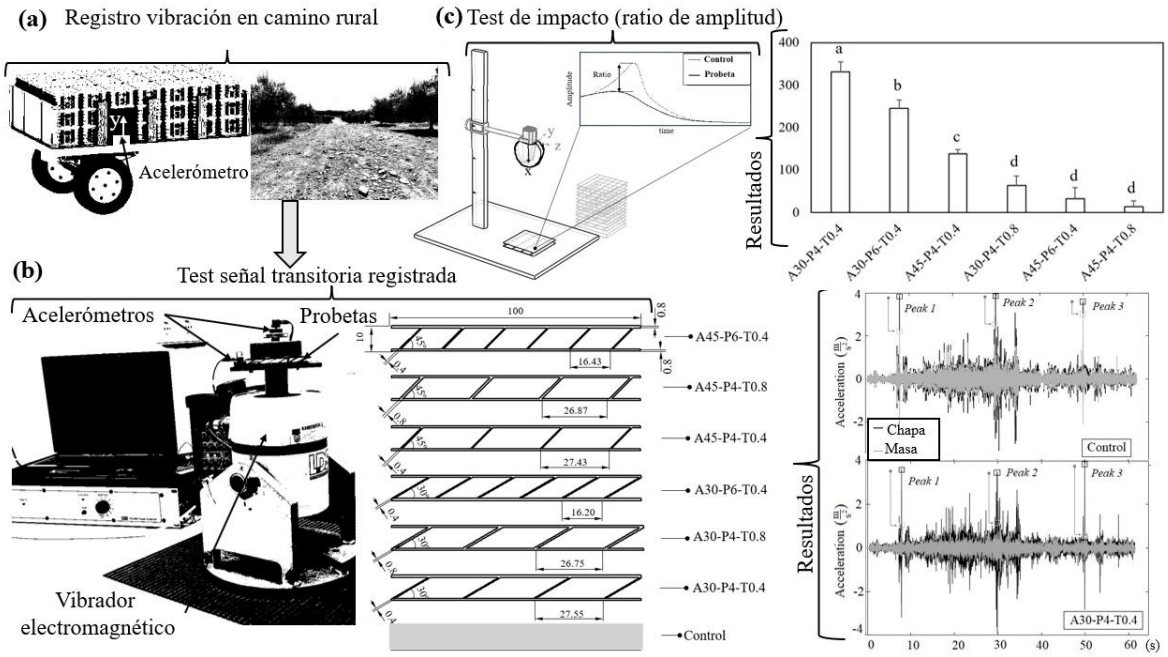


Figura 6. Materiales y métodos utilizados junto con los resultados obtenidos

Integración del inversor Huawei en la plataforma GENHIDRO para la gestión energética de la fertirrigación en explotaciones agrícolas

M. Soler Méndez[1], D. Parras Burgos[2] y J.M. Molina Martínez[1]

[1] Grupo de Investigación de Ingeniería Agromótica y del Mar, Universidad Politécnica de Cartagena, 30202 Cartagena, España; manuel.ia@agrosolmen.es
[2] Departamento de Estructuras, Construcción y Expresión Gráfica, Universidad Politécnica de Cartagena, 30202 Cartagena, España

Palabras clave: Energía fotovoltaica, eficiencia energética, fertirrigación, placas solares, inversores

Resumen

La energía es un factor de producción que puede ser limitante, además de que su precio presenta una tendencia alcista. La energía eléctrica es una fuente de energía ampliamente utilizada para muchos sectores productivos, entre ellos el sector agrícola. La disponibilidad de la red de suministro eléctrico en el ámbito rural no siempre es fácil, y una de las alternativas más viable tanto técnica como económicamente es la energía fotovoltaica. Para una gestión energética eficiente de una explotación agrícola es necesario conocer la información de la instalación fotovoltaica, para poder organizar los patrones de consumo eléctrico de la explotación. Con tal fin, se integra la información de los inversores Huawei en la plataforma GENHIDRO, brindando la posibilidad de conocer la capacidad productiva de energía de la instalación fotovoltaica, y así ajustar las tareas de fertirrigación de la explotación agrícola. Además, ayuda a comprobar el dimensionamiento de las baterías y a prever tareas de mantenimiento.

INTRODUCCIÓN

Una de las principales demandas de energía eléctrica en las explotaciones agrícolas proviene de los equipos de bombeo y de fertirrigación. La nutrición de los cultivos es importante para conseguir una cantidad y calidad de producción adecuada, y para explotaciones tecnificadas mediante riego localizado aplican al riego los nutrientes mediante la fertirrigación (Manzano et al, 2015, Soler et al, 2022). Existen varios sistemas de inyección, principalmente venturis, bombas inyectoras y tanques fertilizantes (Manzano et al, 2015), pero nos centramos en las bombas inyectoras eléctricas.

La energía eléctrica puede ser limitante, pues no siempre se encuentra disponible en el entorno rural. Esta situación, junto con la tendencia alcista de los costes de la energía, hacen que la energía fotovoltaica sea una alternativa realmente viable frente a soluciones como un grupo electrógeno (Beecham et al, 2019, López Vela, 2021). Ésta tiene una característica intrínseca a su funcionamiento, y es que no está disponible todo el día, porque solo capta energía mientras que el sol está irradiando en la zona de ubicación del campo fotovoltaico. Por esta razón, es necesario almacenar la energía en baterías, para que esté disponible en el momento en que el sistema de riego la necesite. Puesto que las baterías son finitas, su dimensionamiento, junto con el del campo fotovoltaico, deben permitir no solo que las baterías tengan capacidad suficiente para abastecer al

menos la energía demandada por el sistema de riego durante un día tipo, sino que también, el campo fotovoltaico permita recuperar esa energía para recargar por completo las baterías. Pero la cantidad de radiación solar puede variar, disminuyendo la energía disponible, y provocando una descarga de las baterías.

El equipo de investigación del Grupo de Ingeniería Agromótica y del Mar (GI-IAM) ha trabajado profundamente en proteger la vida útil de las baterías, mediante sistemas que monitorizan el estado de las baterías, y deciden si es viable o no el empleo de la energía para los motores de fertirrigación. Esta solución es efectiva, pero a posteriori, una vez que se ha agotado la energía permitida de las baterías. Una gestión predictiva de la energía facilitaría una mejor adaptación de las tareas de fertirrigación a la energía disponible. El conocimiento de la producción fotovoltaica va a servir de diagnóstico del campo fotovoltaico (Firman et al, 2014), además de facilitar las previsiones de disponibilidad de energía para las tareas de fertirrigación.

Partiendo del desarrollo que se está realizando mediante los trabajos del GI-IAM encaminados a la monitorización y protección de las baterías, así como los desarrollos para el establecimiento de la programación de la fertirrigación, se plantea este trabajo para completar el análisis predictivo de la instalación productora de energía, a fin de establecer el mejor de los programas de fertirrigación posibles en cada momento.

MATERIAL Y MÉTODOS

El equipo de investigación GI-IAM ha desarrollado una herramienta destinada a la selección adecuada de la tarifa de energía eléctrica, que engloba la lectura de la información más importante de instalaciones fotovoltaicas a través de inversores Huawei. Centrándose en la parte de la instalación fotovoltaica, se desarrollan los algoritmos que permitirán controlar una instalación fotovoltaica aislada para cabezales de fertirrigación.

La Interfaz de Programación de Aplicaciones (del inglés, API) de Huawei permite conocer la potencia fotovoltaica que está generando el inversor. Esta potencia está destinada tanto al consumo de los receptores eléctricos de la instalación como a la carga del conjunto de baterías que estén conectadas. Por tanto, esta herramienta nos ayudará a conocer el estado productivo del campo fotovoltaico. Sin embargo, se hace necesaria la incorporación de otros elementos para que ofrezcan la información necesaria para la gestión adecuada de un sistema fotovoltaico.

Un contador de energía para la instalación receptora discriminará qué parte de la potencia producida por el inversor se destina a consumo directo y, por tanto, la parte restante estará encaminada a la carga del conjunto de baterías. Mediante un voltímetro, se podrá comprobar la tensión del conjunto de baterías, y definir su estado de carga. En caso de que el estado de carga se sitúe por debajo del límite inferior establecido por el instalador de baterías, entonces, el sistema debe conocer que hay que detener el consumo de los receptores principales o más consumidores.

La integral de la energía consumida por los receptores ofrece la información del patrón del consumo de la instalación. La integral de la energía producida por el campo fotovoltaico ofrece la información del patrón de disponibilidad de energía. La evolución de la tensión del conjunto de baterías muestra el nivel de extracción de energía de las mismas.

En base a lo expuesto, se considera como hipótesis de partida que, para un día soleado, la integral de energía fotovoltaica es mayor que la integral de energía consumida, para que el campo fotovoltaico pueda ofrecer la energía que necesita la instalación receptora con suficiente garantía. Si la integral de energía fotovoltaica es menor que la integral de energía consumida, entonces los receptores consumirán toda la energía almacenada en el conjunto de baterías, de forma que la variación de tensión con respecto al tiempo será negativa; esta situación es síntoma de que se

consume más de lo que se produce, y la energía almacenada en el conjunto de baterías se agotará.

Las variables a considerar para el algoritmo de control de la activación de los motores de fertirrigación serán: 1. Media producción fotovoltaica diaria en los últimos 15 días (EPV_{15}); 2. Producción fotovoltaica del día anterior (EPV_{-1}); 3. Pérdida de producción fotovoltaica del día anterior (P_{EPV}).

$$P_{EPV} = \frac{EPV_{15} - EPV_{-1}}{EPV_{15}}$$

El tiempo programado corregido para los motores de fertirrigación (T_{fertC}), aplicado a la programación almacenada en GENHIDRO, será, con respecto al tiempo programado inicial para los motores de fertirrigación (T_{fertI}):

$$Tf_{ertC}=T_{fertI}\cdot(1-P_{EPV})$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la figura 1 se muestra la representación gráfica de los valores de producción obtenidos a través de la API.

Hasta el momento, ningún software de gestión de fertirriego contempla el análisis de la energía disponible para el ajuste del trabajo de los motores de fertirrigación.

CONCLUSIONES

Se consigue con el desarrollo expuesto la monitorización del sistema fotovoltaico para poder hacer un análisis preventivo de su comportamiento, y sobre todo de la energía disponible, para corregir la programación de la fertirrigación y proteger el conjunto de baterías.

Agradecimientos

Este estudio forma parte del Programa AGROALNEXT que ha sido financiado por MICIU con fondos NextGenerationEU (PRTR-C17.I1) y por la Fundación Séneca con fondos de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia (CARM).

Referencias

Ferreyra E., R., Sellés V., G., Ahumada B., R., Maldonado B., P., Gil M., P., Barrera M., C. 2005. Manejo del riego localizado y fertirrigación. Instituto de Investigaciones Agropecuarias de Chile.

Firman, A., Toranzos, V., Vera, L., Busso, A., de la Casa, J. 2014. Passive Monitoring of the Power Generated in Grid Connected PV Systems. Energy Procedia 57, 235-244.

Pagan F.J., Fernández Villena, M., Fernández Pacheco, D.G. Rosillo, J.J., Molina Martínez, J.M. 2015. Optifer: An application to optimize fertiliser cost in fertigation. Agricultural Water Management 151: 19-29.

Manzano, J., Palau, C.V., Moreira de Azevedo, B., Vieira do Bomfim, G. Vieira Vasconcelos, D. 2015. Design and installation alternatives of Venturi injectors in drip irrigation. Ciencia Agronómica 46: 287-298.

Beecham, S.; Razzaghmanesh, M.; Bustami, R.; Ward, J. Chapter 20 - The Role of Green Roofs and Living Walls as WSUD Approaches in a Dry Climate. In Approaches to Water Sensitive Urban Design, Sharma, A.K.; Gardner, T.; Begbie, D., Eds. Woodhead Publishing: 2019; pp 409-430

López Vela, M. Estudio de viabilidad para aplicaciones de energía solar en el cultivo bajo

invernadero del sudeste español. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2021

Soler Méndez, M., Parras Burgos, D., Intrigliolo, D.S, Molina Martínez, J.M. 2022. Development of a fertilization dosing tool for irrigation heads. 14th Frutic international symposium.

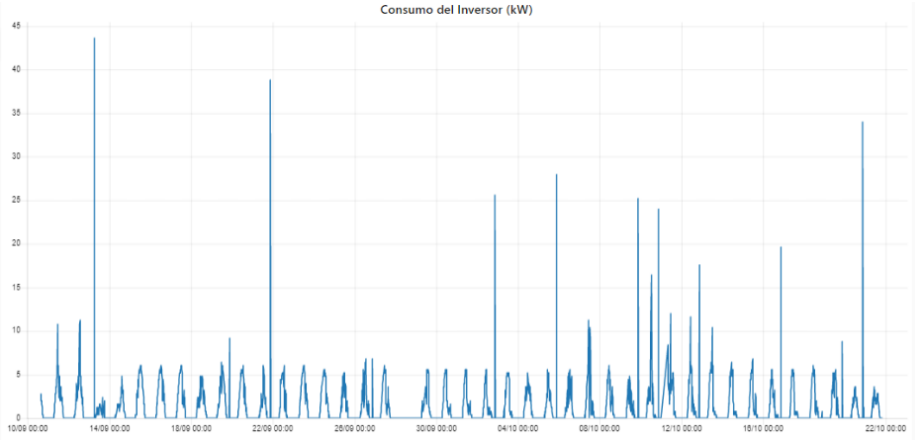


Figura 1: Representación gráfica de los valores extraídos a través de la API.

Diagnosis por visión artificial y la red neuronal *Segment Anything Model* en máquinas deshuesadoras de aceitunas (*Olea europaea,* L.)

Antonio Madueño Luna[1], José Miguel Madueño Luna[2], Miguel C. López Gordillo[2] y Manuel J. González Ortega[1] y Luis Villanueva Gandul[1]

[1]Universidad de Sevilla, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica. Departamento de Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluidos; amadueno@us.es, luivilgan@alum.us.es, mgortega@us.es
[2]Universidad de Sevilla, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica. Departamento de Expresión Gráfica y Cartográfica; jmadueno@us.es, mlopez@us.es

Palabras clave: redes neuronales, SAM, máquinas DRR, segmentación de imágenes, error de barco, Gordal, Hojiblanca, Matlab, Google Colab.

Resumen

En menos de una década el sector industrial de la aceituna de mesa (*Olea europaea*, L.) persigue alcanzar la eficiencia plena que venía sacrificando desde su industrialización en los 70 para superar fallos como el 'error de barco' y controlar por completo el proceso. La apuesta ha sido la *visión artificial*, donde el estado más reciente del arte lo protagonizan las *redes neuronales artificiales* (RNA), eficaces y con soluciones reducidas a poco espacio, aunque éstas resultan difíciles de diseñar y rara vez extrapolables, sin embargo, en 2023 META AI lanzó *Segment Anything Model* (SAM), una red neuronal predefinida de libre acceso en la nube, adaptable y mucho más potente que las RNAs desarrolladas hasta el momento. Este trabajo evalúa en paralelo el proceso de deshuese de dos variedades de aceituna convencionales, Gordal negra oxidada (*O. europaea regalis*) y Hojiblanca 'estilo sevillano' (*O. europaea arolensis*), instalando sistemas de visión artificial sobre las máquinas deshuesadoras que las procesan para obtener una tirada de imágenes que se van a analizar morfológica y estadísticamente en diferido a través de un flujo de trabajo desarrollado entre los entornos de Google Colab (Python) y Matlab, incorporando SAM para la segmentación. Las imágenes de Gordal son a color de tamaño 320x240 píxeles en formato .png, mientras que las de Hojiblanca en B/N con una profundidad de 1 byte (256 niveles), tamaño 144x176 y formato .bmp. Gracias a esta metodología se ha podido realizar un diagnóstico de la 'carga de fruto' de ambas máquinas y del porcentaje de 'error de barco', demostrando que bien conducido, SAM puede participar perfectamente en procesos industriales. Adicionalmente se ha demostrado por primera vez que calibres diferentes al nominal, aquel para el que se ha ajustado finamente la máquina, no favorecen necesariamente el error de barco.

INTRODUCCION

La aceituna de mesa (*Olea europaea* L.) es un producto cuya demanda ha trascendido el contexto geográfico mediterráneo y espera seguir internacionalizándose en un futuro inmediato, todo un reto para una industria tradicional basada fundamentalmente en la optimización mecánica de las máquinas deshuesadoras, rodajadoras y rellenadoras (DRR), surgidas hace medio siglo (Santos Siles, 1999) y convertidas en el estándar de las 3 operaciones básicas post-aderezo. Para conseguir este reto se ha apostado por la visión artificial (VA) que en el contexto de la industria agroalimentaria se han convertido en otro estándar, demostrado eficiencia plena para la inspección

visual a altos niveles productivos (Abdullah, 2016; Danush et al., 2023), inaugurando un campo efervescente de experimentación que ofrece diferentes alternativas y aplicaciones, donde la tecnología más novedosa y prometedora son las redes neuronales artificiales (RNA), con algunos ejemplos de aplicación en DRR ya reducidos a poco espacio como un microchip (Lázaro et al., 2020). No obstante, las RNAs son complejas y lentas de diseñar, requiriendo acumular imágenes, desarrollar un esquema previo de diseño, y entrenamiento sucesivo con prueba-error sin siempre llegar a una solución concreta. Sin embargo, en 2023 fue lanzado Segment Anything Model (SAM) por META AI, una superpotente red neuronal predefinida, elaborada con el propósito de identificar cualquier elemento de cualquier tipo de imagen y segmentarlo, entrenado con multitud de imágenes recogidas por todo internet, lo cual le permite una gran capacidad y versatilidad, habiendo demostrado eficiencia en muchos casos (REFCIA), sin necesidad de desarrollo ni entrenamiento, y disponible en la nube. El propósito de este trabajo es desarrollar un método de diagnóstico general de la carga de frutos en DRRs y del 'error de barco' integrando SAM para realizar la segmentación de las imágenes tomadas por un sistema de visión artificial. Este colaborará dentro de un flujo de trabajo desarrollado en una aplicación por medio de los entornos de programación de GoogleColab (lenguaje Python) y Matlab. Adicionalmente se va a comprobar si la alteración del calibre nominal, es decir, introducir a la DRR aceitunas alejadas de aquel calibre para el que se ha ajustado la máquina, favorece el error de barco.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para el estudio se realizó en paralelo el montaje de dos sistemas de visión artificial (Cheng et al, 2016, Díaz, 2016) adaptados a las cadenas de alimentación de la maquinaria deshuesadora de la planta industrial de 'Aceitunas Guadalquivir', finca 'La Harina', a 2km de Morón de la Fra. (Sevilla). Una de las DRR se trataba de una Sadrym modelo 130 ajustada para un calibre de 80 aceitunas/kg procesando Gordal negra oxidada (*O. europaea regalis*); mientras que la otra DRR era una OFM modelo PSL51 ajustada para calibre 300 procesando Hojiblanca al 'estilo sevillano' (*O. europaea arolensis*), cocida en verde. El sistema VA estaba compuesto por una cámara para cada caso, sincronizada junto a un sistema LED de iluminación con el paso de la aceituna por un sensor magnético que detectaba cada cangilón de la cadena de transporte. Toda la información recogida en forma de imagen se destinaba a un portátil con un software elaborado en Qt-Creator sobre funciones de la librería OpenCV que permitía la supervisión en tiempo real del proceso y el almacenamiento de las fotografías para la operación posterior de análisis a modo de muestra o 'cata digital'. La cámara instalada para gordal era una DFK 33GV024 de Imagine Source que tomaba imágenes a color en formato .png con un tamaño de 320x240 píxeles, mientras que Hojiblanca se capturó con una SmartCamera SPS02 de TOSHIBA Teli Corporation con imágenes en escala de grises (B/N), profundidad de 256 niveles (1 byte) en formato .bmp y tamaño 144x176 píxeles. Se han descargado dos series en continuo de cada variedada en el momento justo antes de la perforación (catas digitales), ambas lo suficientemente representativas como para una población infinita con errores inferiores incluso al 5%. La primera consta de 1638 imágenes de gordal negra a color, la segunda de 10.500 de hojiblanca B/N, aunque estas se han reducido a 1628 y 9.150 respectivamente, eliminando casos que no contengan una sola aceituna en buen estado, para estudiarlas exclusivamente por sus características geométricas y orientación. Finalmente, se ha elaborado una aplicación compuesta por 6 scripts desarrollados entre los entornos de programación de GoogleColab con lenguaje Python y Matlab R2022b: *p15.txt*, *selector_BN.m*, *blob_y_relleno.m*, *elipse_3.ipynb*, *histograma.m* y *matriz_correlacion.py*. Los tres primeros se ocupan de la segmentación, integrando SAM *p15.txt*, que genera una serie de máscaras con la posible aceituna, para luego seleccionarse la correcta y corregirse ruidos o defectos con los dos scripts siguientes. El cuarto script se encarga del análisis morfológico contabilizando píxeles, que

están en relación directa con el tamaño de la aceituna, y superponiendo una elipse desde la que medir el tamaño de los ejes y la orientación. Los dos scripts finales se encargan del análisis estadístico desde los datos generados previamente, *histograma.m* genera los histogramas de tamaño y orientaciones del conjunto de aceitunas procesadas para cada variedad, mientras *matriz_correlacion.py* calcula las correlaciones entre parámetros que responderán la hipótesis planteada (error de barco – descalibrado) en formato tabla.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Han sido necesarias hasta 6 horas de trabajo en el caso de Hojiblanca para procesar la muestra de 9150 imágenes con alquiler de GPU, dada la alta cantidad de recursos que consumía SAM para la generación de máscaras, lo cual ha descartado la versión gratuita. También la existencia de scripts como *selector_BN.m* o *blob_y_relleno.m* se justifican en la necesidad de adaptar o corregir a SAM durante el proceso de segmentación. Sin embargo, los resultados han sido satisfactorios en el 100% de los casos con esta metodología, validando el uso de SAM como red neuronal participante en procesos de utilidad industrial si es bien conducido.

En cuanto a la evaluación, la distribución total de calibres procesada por las máquinas puede valorarse en el histograma de áreas. Gordal (Figura 1, izquierda) presenta un calibrado irregular, con posible contaminación y un rango demasiado amplio, como refleja su dilatada curva normal y la elevada varianza, 6 – 7 veces superior al calibre nominal. Además, la media está desplazada respecto a dicho valor ideal (24.154< 25.500 píxeles). Esto refleja una situación común en las entamadoras, donde a pesar de ser exhaustivas con los ajustes mecánicos de los sistemas, no cuidan el calibrado del fruto ingresado ni disponen de medios de control riguroso durante el proceso. Hojiblanca (Figura 2, izq.) sí presenta por el contrario un calibrado cuidado, con una media en torno al valor del calibre nominal, y una distribución que bien ajustada a la distribución normal posee poca varianza aun cuando su tamaño muestral es 7 veces superior al de gordal.

El error de barco en cambio se refleja en los segmentos [80, 100] del histograma de ángulos, se trata de las aceitunas orientadas perpendicularmente al punzón en el momento justo antes de deshuesado, situación que acarrea pérdida de producto y riesgos a la salud del consumidor en aquellos casos no detectados en una fase posterior. Gordal recoge un 1,1% del total de la muestra (Figura 1, derecha), Hojiblanca 1,6% (Figura 2, derecha). Ambos por debajo del 2% de tolerancia de pérdida asumida por las entamadoras, indicando que ambas máquinas han sido bien ajustadas mecánicamente. Algunos trabajos reflejan que no seleccionar un buen plato rotatorio de la tolva o ajustar bien el enlace de ésta a la cadena de alimentación aumenta los errores hasta un 30% (Lucas Pascual, 2020).

Finalmente, las matrices de correlación generadas por la aplicación (Tabla 1) reflejan que no existe correlación entre el ángulo de las aceitunas (a) y el resto de parámetros geométricos medidos (A, E, e y E/e), todos con valores en torno a '0'. Ante la hipótesis propuesta originada en trabajos previos, donde se estimaba una posible relación entre una falta de control de los calibres ingresados a las DRR y el aumento del error de barco, queda manifiesto que no es así. Esta conclusión, por las características de las variedades elegidas, de forma simétrica y comprendiendo prácticamente todo el rango de calibres procesados por la industria, puede generarlizarse a cualquier proceso de deshuesado de aceitunas en las DRR actuales.

Referencias

Abdullah, M.Z. (2016). Image Acquisition Systems. D.W. Sun (ed.), Computer Vision Technology for Food Quality Evaluation, 2nd Edition, cap.1, pp. 3 - 39. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802232-0.00001-3

Cheng, J.H.; Sun, D.W.; Nagata, M. y Tallada, J.G. (2016). Quality Evaluation of Strawberry. D.W. Sun (ed.), Computer Vision Technology for Food Quality Evaluation, 2nd Edition, cap. 13, pp. 327 - 349. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802232-0.00013-X

Dhanush, G.; Khatri, N.; Kumar, S. y Shukla, P.K. (2023). A comprehensive review of machine vision systems and artificial intelligence algorithms for the detection and harvesting of agricultural produce. *Scientific African*, (21), e01798, https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2023.e01798.

De Jódar Lázaro, M.; Madueño Luna, A.; et al. (2020) Deep learning in olive pitting machines by computer vision. Computers and Electronics in Agriculture (171) 105304. https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105304

Díaz, R. (2016). Classification and Quality Evaluation of Table Olives. Computer Vision Technology for Food Quality Evaluation, 2nd Edition. cap. 14, p. 351 - 365. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802232-0.00014-1

Lucas Pascual, A. (2020) *Mejoras en el control de máquinas deshuesadoras-rodajadoras y de relleno de aceituna de mesa*. [Tesis Doctoral] Universidad Politécnica de Cartagena.

Santos Siles, F.J. (1999) Las nuevas tecnologías aplicadas al sector de la aceituna manzanilla fina. *Grasas y Aceites*. 2 (50), pp 131-140. https://doi.org/10.3989/gya.1999.v50.i2.648

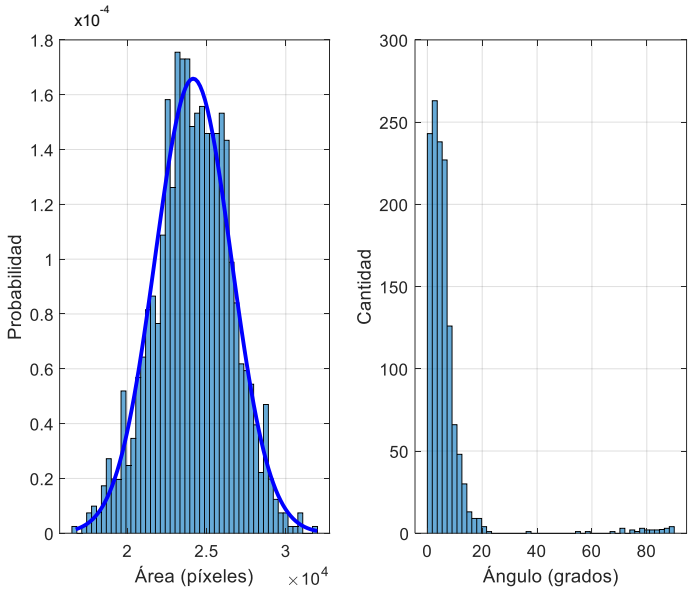


Figura 1. Distribución por tamaños (izquierda) y ángulos (derecha) para gordal (*O. europaea regalis*) del conjunto de las 1628 imágenes. Media: 24.154 píxeles, Varianza: 5.783.793 píxeles^2.

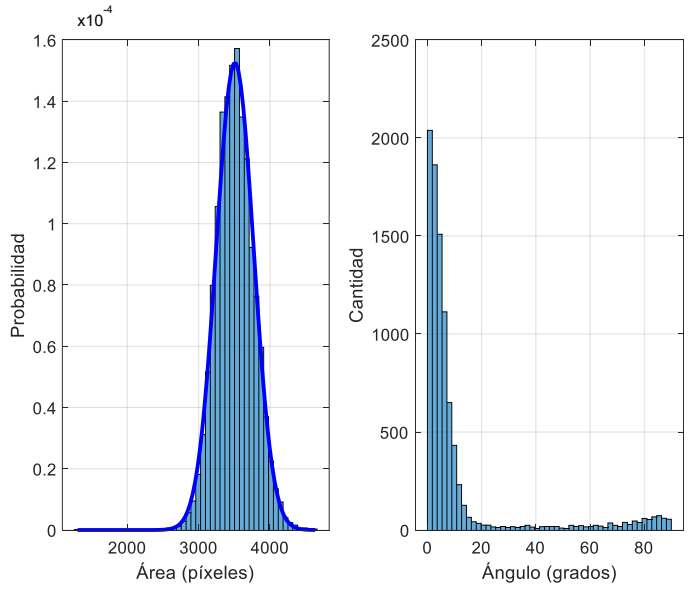


Figura 2. Distribución por tamaños (izquierda) y ángulos (derecha) para hojiblanca (*O. europaea arolensis*) del conjunto de 9150 imágenes. Media: 3.509 píxeles, Varianza: 68.350 píxeles^2.

Tabla 1. Matriz de correlación entre parámetros morfológicos de gordal (sobre la diagonal) y hojiblanca (bajo la diagonal, gris).

Var†	A	a	E	e	E/e
A	-	**-0,042**	0,924	0,688	0,597
a	**-0,113**	-	**-0,021**	**-0,089**	**0,029**
E	0,893	**-0,162**	-	0,380	0,852
e	0,746	**0,054**	0,377	-	-0,159
E/e	0,398	**-0,201**	0,764	-0,307	-

† (A) área de la aceituna, (a) ángulo respecto a la horizontal, (E) longitud del eje mayor, (e) longitud del eje menor y (E/e) ratio entre ambos ejes.

Creación de un dataset de sombras sintéticas para el estudio de la radiación en explotaciones agrovoltaicas con actividad humana

M. Huang[1*], R. Fernandez-Beltran[1], G. García-Mateos[1], J.M. Molina-Martínez[2] y S. Sabzi[3]

[1] Departamento de Informática y Sistemas, Facultad de Informática, 30100 Murcia
[2] Grupo de Ingeniería Agromótica y del Mar, ETS de Ingeniería Agronómica, 30203 Cartagena
[3] Department of Computer Engineering, Sharif University of Technology, 14588-89694 Tehran, Iran

*** Autor para correspondencia**: mengchen.huang@um.es

Palabras clave: visión artificial, segmentación de sombras, sistemas agrovoltaicos, deep learning, detección de actividad.

Resumen

La sombra es fenómeno natural que resulta de la ausencia total o parcial de luz. Las sombras y la radiación solar desempeñan un papel fundamental en la agricultura, en procesos como la fotosíntesis y la evapotranspiración de las plantas. Su influencia es especialmente importante en los sistemas agrovoltaicos, que combinan la producción agrícola y fotovoltaica sobre los mismos terrenos. Medir la cantidad de radiación solar que llega a las plantas y la que reciben las placas fotovoltaicas es necesario para determinar la proporción óptima entre producción agrícola y eléctrica. El problema de segmentar las sombras que aparecen en una imagen en escenas complejas sigue siendo un reto abierto de investigación, para el que se aplica *deep learning*. Estas técnicas se apoyan en grandes conjuntos de datos etiquetados. Sin embargo, muchos de los conjuntos existentes adolecen de errores de anotación y de ejemplos de sombras agrícolas. Presentamos la evaluación de un conjunto de datos de segmentación de sombras de vista cenital generado sintéticamente y caracterizado por un renderizado fotorrealista y máscaras de sombras precisas, denominado AgroSegNet. El conjunto consta de 50.000 pares de imágenes que simulan una explotación hortícola agrovoltaica con posible actividad humana, con las anotaciones de sombras correspondientes. Nuestro objetivo es determinar su eficacia en comparación con otros conjuntos de datos reales existentes y evaluar cómo influyen factores como la calidad de las anotaciones y el dominio de la imagen en la eficacia de la segmentación de sombras. Para establecer una base, se han entrenado varias arquitecturas de referencia de *deep learning*. Además, evaluamos el rendimiento fuera del dominio en comparación con el conjunto de entrenamiento de otros conjuntos de sombras. Nuestros resultados sugieren que AgroSegNet tiene un rendimiento competitivo, es eficaz para el aprendizaje por transferencia, y será útil en la segmentación de sombras en imágenes reales.

INTRODUCCIÓN

La radiación solar es útil tanto en la agricultura, permitiendo el crecimiento uniforme de plantas mediante la fotosíntesis, como en la producción de energía eléctrica a través de paneles fotovoltaicos, donde la detección de sombras ayuda a identificar puntos calientes que dañan las células fotoeléctricas (Moussavou et al., 2018). En visión por computador, la detección o eliminación de sombras es una tarea clave para mejorar la calidad de las imágenes de entrada en sistemas complejos.

La motivación de este trabajo se basa en optimizar el uso de la radiación solar en sistemas agrovoltaicos, balanceando la energía para los cultivos y los paneles fotovoltaicos. Mediante paneles y cámaras RGB ubicadas sobre los cultivos bajo las placas solares, ajustamos la posición de los paneles motorizados para maximizar tanto la producción de electricidad como la fotosíntesis, evitando un exceso de luz perjudicial para las plantas.

Para entrenar los modelos de detección o eliminación de sombras, es esencial contar con conjuntos de datos adecuados. Aunque existen conjuntos de datos genéricos como SBU (Vicente et al., 2016) e ISTD (Wang et al., 2018), con imágenes obtenidas de internet o manualmente, y AISD (Luo et al., 2020), orientado a imágenes aéreas, en agricultura hay una carencia de conjuntos de datos de sombras específicos con imágenes cenitales con la cámara situada debajo de los paneles solares al aire libre, como las que se necesitan en nuestro caso. Crear un conjunto de datos de sombra especializado desde cero supone retos como el acceso a las estructuras montadas y la anotación precisa y eficiente de máscaras de sombra de alta calidad.

MATERIAL Y MÉTODOS

La metodología empleada se basa en un enfoque virtual que permite modelar una escena 3D para obtener imágenes y máscaras de sombra de forma automatizada, aprovechando la información generada por el motor gráfico. La escena se creó desde cero en Blender (https://www.blender.org/), un popular software de modelado 3D gratuito y de código abierto. Se utilizaron modelos y texturas de internet distribuidos proceduralmente para añadir fotorrealismo. Para el renderizado se usó Cycles, un motor de trazado de caminos de Blender más preciso que la rasterización tradicional.

Un aspecto clave fue la posición del sol, que afecta la iluminación. Utilizamos la extensión "Sun Position" de Blender para calcular su rotación y tono, ajustándolos según la geolocalización, la marca de tiempo y otros parámetros de condiciones atmosféricas, como la densidad de aire, polvo y ozono. El modelado del cielo utiliza el algoritmo de Nishita (Nishita et al., 1993) para generar un cielo realista.

La parte más importante para un buen conjunto de datos de sombras es la anotación de la máscara de sombra. En contraste con el método tradicional de etiquetarlo a mano con ayuda de algunos filtros, hemos optado por aprovechar nuestro enfoque virtual. Para ello, podemos ajustar la configuración de la iluminación para tener información extra de la escena. En concreto, saturamos la iluminación solar y deshabilitamos todas las fuentes de iluminación indirecta. Esto resulta en una imagen sobreexpuesta con la que podemos aplicar un postprocesado para conseguir las máscaras de sombra de las imágenes.

Finalmente, optamos por utilizar Hugging Face (https://huggingface.co/) como repositorio de datos para guardar nuestro conjunto de datos de 50.000 pares de imágenes generado de forma procedural y masiva con una tarjeta gráfica NVIDIA RTX4090 en 124 horas. Para evaluar su rendimiento hacemos un estudio junto con otros conjuntos de datos de sombras, entrenando diferentes modelos con ellos. La métrica utilizada es IoU (Intersección sobre Unión) y BER (Tasa de Error Balanceada), una métrica comúnmente utilizada para detección de sombras por balancear los errores de clasificación binaria. El dataset generado de imágenes de sombras se llama AgroSegNet (Huang et al., 2024) y está disponible públicamente en: https://huggingface.co/datasets/Menchen/AgroSegNet

RESULTADOS

Arquitectura base para AgroSegNet

Se evaluaron diversos modelos y *backbones* (Unet, Unet++, PSPNet y Linknet, entre otros) con distintas cabezas de segmentación (ResNet50, mit_b2 y EfficientNet-b5) para obtener un modelo base, con el objetivo de seleccionar la arquitectura óptima para la segmentación sol/sombra de las imágenes. Los modelos se entrenaron durante 30 épocas con un *batch size* de 8, con una tasa de aprendizaje inicial de 10^{-4} y un ajuste a 10^{-5} en la época 25. La Tabla 1 muestra los mejores modelos, donde podemos observar que la mejor arquitectura es Unet++/EfficientNet-b5 y que EfficientNet-b5 supera a ResNet50 independientemente del *backbone* escogido.

Evaluación cruzada del conjuntos de datos

Una vez establecida la arquitectura base, comparamos diferentes conjuntos de datos de sombras entrenando un modelo para cada uno y realizando una evaluación cruzada entre todos ellos. Como se observa en la Tabla 2, los modelos entrenados con AgroSegNet presentan un rendimiento promedio moderado, ocupando el segundo lugar. Y si comparamos la dificultad de los conjuntos de datos, destaca como el conjunto de datos más complejo, sugiriendo un dominio diferente y más desafiante que los demás.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Algunos ejemplos de los resultados obtenidos con diferentes modelos se pueden ver en la Fig. 1. Casi ningún modelo logra inferir la máscara de AgroSegNet, mientras que el modelo entrenado en este conjunto puede aproximar las máscaras de otros conjuntos. Los modelos entrenados con SBU o ISTD no captan detalles de AISD, pero sí el modelo de AgroSegNet, probablemente debido a la similitud en la vista cenital entre AgroSegNet y AISD. Curiosamente, el modelo entrenado con AISD no puede inferir sobre AgroSegNet, lo que sugiere la superioridad de AgroSegNet como conjunto de datos en este contexto.

En conclusión, hemos podido generar AgroSegNet como un conjunto de datos masivo para segmentación de sombras completamente sintético a gran escala, diseñado específicamente para entornos agrícolas con máscaras de sombra físicamente precisas generadas a través de escenas virtuales y renderizado 3D. Esto le otorga una ventaja competitiva en comparación con otros conjuntos de datos de sombras del mundo real. En el futuro, el uso de este conjunto de datos permitirá desarrollar y validar nuevas técnicas para la detección y segmentación de las sombras en las imágenes.

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por los proyectos TED2021-129300B-I00 y PID2021-122466OB-I00, por MCIN/AEI/10.13039/501100011033, NextGenerationEU/PRTR, UE y por la Fundación Séneca, Agencia Regional de Ciencia y Tecnología de Murcia (Fundación Séneca, Plan de Actuación 2022) con el proyecto 22130/PI/22.

Referencias

Huang, M., García-Mateos, G., & Fernandez-Beltran, R. 2024. A synthetic shadow dataset of agricultural settings. Data in Brief, 54: 110364.

Luo, S., Li, H., & Shen, H. 2020. Deeply supervised convolutional neural network for shadow detection based on a novel aerial shadow imagery dataset. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 167: 443-457.

Moussavou, A.A., Raji, A.K., & Adonis, M. 2018. Impact study of partial shading phenomenon on

solar PV module performance. In 2018 Intl. Conf. on the Industrial and Commercial Use of Energy (ICUE). Cape Town, 13-15 ago. p. 1-7.
Nishita, T., Sirai, T., Tadamura, K., & Nakamae, E. 1993. Display of the earth taking into account atmospheric scattering. In Proc. of 20th Annual Conf. on Computer Graphics and Interactive Techniques. Anaheim, 2-6 ago. p. 175-182.
Vicente, T.F.Y., Hou, L., Yu, C.P., Hoai, M., & Samaras, D. 2016. Large-scale training of shadow detectors with noisily-annotated shadow examples. In Proc. Computer Vision–ECCV 2016. Amsterdam, 11-14 oct. 2016. p. 816-832.
Wang, J., Li, X., & Yang, J. 2018. Stacked conditional generative adversarial networks for jointly learning shadow detection and shadow removal. In Proc. of the IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition. Salt Lake City, 18-23 jun. 1788-1797.

Tabla 1. Comparación de rendimiento de diferentes arquitecturas de segmentación sol/sombra después de 30 épocas de entrenamiento, utilizando el conjunto de datos AgroSegNet.

Encoder	**Models**	**Dice Loss**	**IoU**	**F_1**	**BER**
ResNet50	Unet	0.051757	0.907921	0.948176	4.97906
EfficientNet-b5		0.04599	0.917021	0.95394	4.408404
ResNet50	**Unet++**	0.049745	0.911195	0.950185	4.764656
EfficientNet-b5		**0.045523**	**0.917817**	**0.954407**	**4.379995**
ResNet50	PSPNet	0.460912	0.887085	0.935562	5.545524
EfficientNet-b5		0.46015	0.893096	0.940081	5.181897

Tabla 2. BER e IoU medios para cada conjunto de datos y modelo. Se resalta en cursiva el modelo con mejor rendimiento, mientras que el conjunto de datos más desafiante se denota en negrita.

Tipo	Conjunto de datos	BER promedio	IoU promedio
Modelo	AISD	*22.565771*	*0.480851*
	AgroSegNet	18.380684	0.52147
	ISTD	18.408633	0.579932
	SBU	**16.299331**	**0.659962**
Conjunto de datos	AISD	19.929658	0.524968
	AgroSegNet	**22.304499**	**0.459299**
	ISTD	*12.655474*	*0.672963*
	SBU	15.314512	0.584985

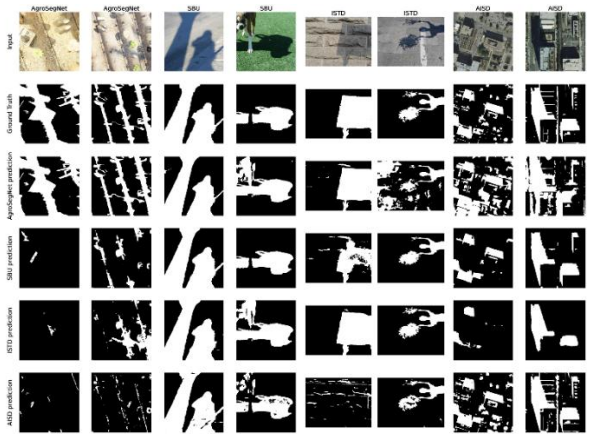


Fig. 1. Comparación de predicciones 0-*shot* realizadas por diferentes modelos en varios conjuntos de datos.

Aprendizaje máquina aplicado a imágenes hiperespectrales para la detección precoz de yesca en vid

S. Arazuri[1*], P. Viela[1], S. León-Ecay[1], C. Jarén[1], A. López-Maestresalas[1].
[1] ISFOOD, Universidad Pública de Navarra, Campus Arrosadía, 31006, Pamplona.
[2]
***Autor para correspondencia:** silvia.arazuri@unavarra.es

Palabras Clave: machine learning, Tempranillo, enfermedades de madera, Specim IQ, PLS-DA, Random Forest.

Resumen
La yesca es una de las enfermedades de madera que mayores daños producen en el sector vitícola. Su control se basa en medidas culturales de manejo del cultivo por lo que la detección temprana es de gran interés para los viticultores. En este caso, se ha seleccionado la tecnología de imagen hiperespectral (HSI) como herramienta con potencial para realizar esa detección precoz de la enfermedad. La tecnología HSI combina la espectroscopía de reflectancia en los rangos visible e infrarrojo cercano (VIS-NIR) y la visión artificial. Entre las principales ventajas está la posibilidad de realizar muestreos no destructivos para la monitorización en campo, ya que además de la información espectral se dispone de información espacial del desarrollo y evolución de la enfermedad. Sin embargo, presenta como desventaja la gran cantidad de información que se adquiere con cada imagen y la necesidad de un procesamiento complejo. En este sentido, es necesario aplicar técnicas basadas en el aprendizaje máquina (*machine learning*), para un procesado eficiente de los datos. En este trabajo se han comparado dos técnicas con el objetivo de identificar síntomas previsuales de yesca. El ensayo se realizó en un viñedo de la variedad Tempranillo situado en la Finca de prácticas de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y Biociencias de la Universidad Pública de Navarra. Se tomaron imágenes con una cámara IQ de Specim durante la campaña de 2024. La cámara, de escaneo lineal, cubre el rango espectral desde los 400 hasta los 1000 nm. La resolución de las imágenes hiperespectrales es de 512 x 512 píxeles y adquiere un total de 204 bandas en el rango indicado. Los resultados son esperanzadores ya que se alcanzaron porcentajes de clasificación superiores al 85% al comparar las mismas zonas de hojas que desarrollaron síntomas, en un breve periodo de tiempo.

INTRODUCCIÓN

La yesca es una enfermedad destructiva que se da en el tronco de la vid y es considerada como una de las más destructivas en viña a nivel mundial (Ouadi et al., 2019). Esto se debe a que los patógenos responsables acaban dañando órganos vitales de la planta, generando la muerte de la vid en un periodo cuya duración es variable (Fontaine et al., 2016). En lo que respecta a los efectos causados por la enfermedad, indicar que se puede diferenciar entre 2 síndromes. A nivel hoja, el primero de éstos corresponde al síndrome crónico, el cual se expresa por la formación de tejido clorótico en hojas que toma coloraciones marronáceas y cuya expansión forma el patrón conocido como raya de tigre. El segundo, se conoce como síndrome agudo o apoplejía y se caracteriza por una rápida marchitez y muerte de la viña.

El control químico de la enfermedad como tal no es posible (Fontaine et al., 2016), por lo

que las formas de control se basan en métodos preventivos como el uso de fungicidas en heridas de la planta, adquisición de material vegetal sano en viveros, etc. (Fontaine et al., 2016; Mesguida et al., 2023).

En las últimas décadas, las tecnologías de sensores ópticos han demostrado ser una herramienta de análisis efectiva, entre ellas, la tecnología de imágenes hiperespectrales (HSI) destaca como una de las técnicas más prometedoras para la detección de enfermedades en plantas ya que no solo es capaz de detectar y cuantificar las enfermedades, sino que permite conocer las interacciones planta-patógeno (Mahlein et al., 2018). Las imágenes hiperespectrales se caracterizan por su alta dimensionalidad, por lo que es necesario aplicar técnicas características del análisis de imagen, de espectroscopia, y técnicas desarrolladas específicamente para tratar los datos de HSI (Lu et al., 2020).

Por todo ello, el objetivo de este trabajo es comparar las técnicas quimiométricas de análisis discriminante por mínimos cuadrados (PLS-DA) y clasificación por árboles aleatorios (Random Forest), e identificar la técnica más adecuada de cara a predecir de forma precoz la aparición de síntomas de yesca a nivel de la hoja.

MATERIALES Y MÉTODOS

Material vegetal

El material vegetal empleado corresponde a cepas de la variedad Tempranillo cultivadas en la Finca de prácticas de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y Biociencias de la Universidad Pública de Navarra (4738902.17N 612020.79E, ETRS89). Para este trabajo se han seleccionado 12 cepas que mostraron síntomas de yesca lo que permite hacer un seguimiento previsual de estos síntomas.

Cámara hiperespectral

Las imágenes hiperespectrales se tomaron en campo con la cámara IQ de Specim (Oulu, Finlandia). La cámara es de escaneo lineal y cubre el rango espectral de 400-1000 nm. La resolución de las imágenes hiperespectrales es de 512 x 512 píxeles y adquiere un total de 204 bandas en el rango indicado. La calibración de las imágenes se realiza con ayuda de una referencia blanca de Spectralon (Labsphere, Inc., Sutton, NH, EE.UU.).

Análisis de datos

El análisis quimiométrico de los datos se realizó con la Classification toolbox v.7 (Ballabio y Consoni, 2013) que trabaja en el entorno MATLAB R2021b (The MathWorks, Natick, MA, USA). El análisis quimiométrico consiste en la aplicación de dos técnicas de aprendizaje máquina: PLS-DA y Random Forest.

En el trabajo se incluyen datos del día en el que los síntomas son visibles (día 4) y datos de tres fechas anteriores (día 1 a día 3). Las fechas seleccionadas no tienen por qué coincidir, al igual que ocurre con la aparición de la yesca, que generalmente es escalonada y no se manifiesta en la misma fecha en toda la parcela.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 1 muestra cómo los espectros medios de las hojas se diferencian en zonas del espectro relacionadas con la clorofila, los picos en torno a los 550 nm y a partir de 700 nm están relacionados con la baja capacidad de absorción de la clorofila (Lowe et al., 2017). Podemos ver cómo conforme avanza el tiempo, esa capacidad de absorción disminuye en las hojas, lo que puede ser un síntoma precoz de la aparición de la yesca que podemos identificar a partir de las imágenes hiperespectrales.

El objetivo del trabajo además de la detección precoz de la aparición de la yesca es la de evaluar dos técnicas de clasificación. En este caso, y según los resultados, vemos cómo la

aplicación de Random Forest permite una mejor clasificación de todas las clases (días), con valores entre 0,94 y 0,99 de sensibilidad (capacidad para clasificar una muestra en su clase de pertenencia) y 0,97-0,99 de especificidad (capacidad para no incluir una muestra en una clase a la que no pertenece). La validación externa permite asegurar que el modelo funciona bien, aunque hay una confusión entre los días 2 y 4, que nos lleva a pensar que puede haber un efecto del estado de desarrollo de las hojas, que habrá que analizar en futuros trabajos. De cualquier forma, los porcentajes de bien clasificados son del 96% para calibración cruzada y del 89% para validación externa en el modelo de Random Forest, lo que está en línea con lo obtenido por Pérez-Roncal (2022).

A modo de conclusión podemos indicar que la tecnología HSI permite la identificación precoz de síntomas de yesca en condiciones de campo, y que es importante aplicar distintas técnicas de análisis para obtener mejores resultados a partir de las imágenes hiperespectrales.

Agradecimientos
Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades y por los fondos Next Generation (proyecto TED2021-130364B-I00).

Referencias

Ballabio, D., and Consoni, V. 2013. Classification tools in chemistry. Part 1: Linear models. PLS-DA. Anal. methods, 5, 3790-3798.

Fontaine, F., Gramaje, D., Armengol, J., Smart, R., Nagy, Z. A., Borgo, M., Rego, C., and Corio-Costet, M.-F. 2016. Grapevine trunk diseases. A review. OIV Publications.

Lowe, A., Harrison, N., & French, A. P. (2017). Hyperspectral image analysis techniques for the detection and classification of the early onset of plant disease and stress. Plant Methods, 13(1), 80.

Lu, Y., Saeys, W., Kim, M., Peng, Y., & Lu, R. 2020. Hyperspectral imaging technology for quality and safety evaluation of horticultural products: A review and celebration of the past 20-year progress. Postharvest Biology and Technology, 170, 111318.

Mahlein, A.-K., Kuska, M. T., Behmann, J., Polder, G., & Walter, A. 2018. Hyperspectral sensors and imaging technologies in phytopathology: state of the art. Annual Review of Phytopathology, 56(1), 535–558.

Mesguida, O., Haidar, R., Yacoub, A., Dreux-Zigha, A., Berthon, J.-Y., Guyoneaud, R., Attard, E., and Rey, P. 2023. Microbial Biological Control of Fungi Associated with Grapevine Trunk Diseases: A Review of Strain Diversity, Modes of Action, and Advantages and Limits of Current Strategies. Journal of Fungi, 9(6), Art. 6.

Ouadi, L., Bruez, E., Bastien, S., Vallance, J., Lecomte, P., Domec, J.-C., and Rey, P. 2019. Ecophysiological impacts of Esca, a devastating grapevine trunk disease, on *Vitis vinifera* L. PLOS ONE, 14(9), e0222586.

Pérez-Roncal, C., Arazuri, S., Lopez-Molina, C., Jarén, C., Santesteban, G., López-Maestresalas, A. 2022. Exploring the potential of hyperspectral imaging to detect Esca disease complex in asymptomatic grapevine leaves. COMPAG, 196, 106863.

Tabla

Tabla 1. Resultados de clasificación de los análisis PLS-DA y Random Forest para cada una de las

clases (días) analizadas.

	PLS-DA		Random Forest	
	Sens. CV/Pred[1]	Espec. CV/Pred[2]	Sens. CV/Pred	Espec. CV/Pred
día 1	1,00/1,00	0,98/0,91	0,94/0,98	0,99/0,97
día 2	0,89/0,82	0,96/0,62	0,94/0,95	0,97/0,91
día 3	0,87/0,00	0,96/0,95	0,96/0,91	0,99/0,99
día 4	0,92/0,53	0,98/0,97	0,99/0,80	0,99/0,99

[1]Sensibilidad (Sens.) para la validación cruzada y la predicción. [2]Especificidad (Espec.) para la validación cruzada (CV) y la validación externa (Pred)

Figura

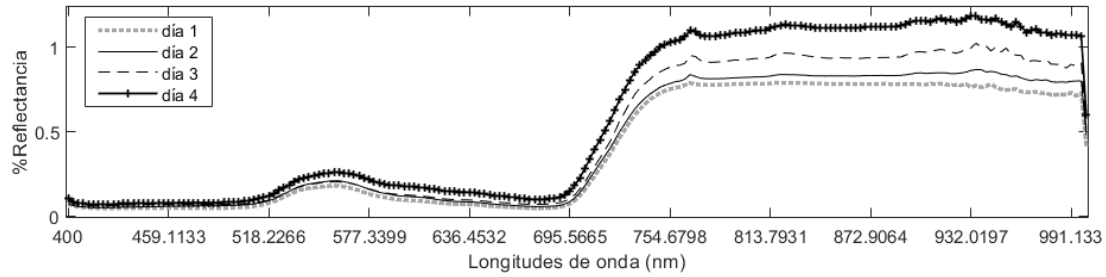


Fig. 1. Espectro de reflectancia medio por clase analizada (día).

Análisis de desempeño de los modelos YOLOv5 en la identificación de malezas en el cultivo de maíz (Zea mays L.) en condiciones de campo.

Oscar Leonardo García-Navarrete[1,2], Jesús Hernán Camacho Tamayo[2], Luis Manuel Navas-Gracia[1]

[1]Universidad de Valladolid, Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias, Departamento de Ingeniería Agrícola y Forestal, Palencia, España; oscarleonardo.garcia@uva.es, luismanuel.navas@uva.es
[2]Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Bogotá, Colombia; olgarcian@unal.edu.co, jhcamachot@unal.edu.co

Palabras clave: deep-learning; Precision agriculture; convolutional neural network (CNN); Computer vision; precision weeding.

Resumen:
Las malezas son plantas no deseadas e invasivas que crecen de manera rápida, estas compiten por recursos como espacio, agua, nutrientes y luz solar, llegando a afectar la calidad y productividad de los cultivos. Una de las alternativas para disminuir la influencia de las malezas es el uso de la escarda de precisión, la cual, utiliza sensores de imágenes y algoritmos computacionales para identificar las plantas y clasificar las malezas mediante imágenes digitales. Estas imágenes son analizadas a través de algoritmos de Deep Learning, específicamente con Convolutional Neural Networks (CNN), por lo que en este estudio se analiza la arquitectura CNN YOLOv5 con todos sus modelo (n, s, m, l and x), en el cultivo de maíz (Zea mayz L.) con cuatro tipos de malezas, obteniendo que el poder de clasificación por matriz de confusión estuvo entre 96% y 97% para la clase maíz, el mAP@0.5 general de los modelos estuvo entre 0.744 y 0.758, las diferencias entre modelos fueron menores al 2%, los valores de F1 score estuvieron entre 0.72 y 0.74 y los umbrales de confianza entre 0.312 y 0.433, indicaron que el modelo que más se ajusta a nuestra aplicación son los modelos YOLOv5l y YOLOv5x.

INTRODUCCION

El maíz (Zea mays L.) es el principal cereal sembrado en el mundo, con una producción de 1.12 mil millones de toneladas en 2021, según la FAO (FAO, 2021). Su manejo integrado, especialmente respecto a las malezas, es esencial para mantener la productividad y minimizar el impacto ambiental (Rajcan & Swanton, 2001). Además de herbicidas y deshierbe manual, herramientas tecnológicas como sistemas basados en visión artificial han surgido para reducir costos y realizar escarda de precisión, diferenciando cultivos de malezas mediante algoritmos avanzados. Entre estas herramientas, YOLO (You Only Look Once), desarrollado en 2016 (Redmon, Divvala, Girshick, & Farhadi, 2023), ha mostrado gran versatilidad en detección de objetos en tiempo real, incluyendo aplicaciones agrícolas. Investigadores han empleado versiones como YOLOv4 y YOLOv5 para identificar malezas en diversos cultivos, logrando altos valores de precisión promedio (mAP), como 96.16% en sésamo (Chen et al., 2022) o 88.46% en zanahorias (Ying, Xu, Zhang, Shi, & Liu, 2021). Asimismo, se han utilizado en robots de deshierbe (Fatima et al., 2023) y vehículos aéreos no tripulados (UAV) para capturar y procesar imágenes en tiempo real, alcanzando resultados como un mAP del 62.1% para malezas en remolacha azucarera (Gallo

et al., 2023). En el cultivo de maíz, se han probado algoritmos como YOLOv4 y YOLOv5 para detección de malezas, logrando un mAP de hasta 89.4% con aplicaciones como robots de aspersión de precisión (Wang, Yan, Lan, Wang, & Bian, 2023). Estos avances confirman que, con ajustes adecuados, YOLO tiene el potencial de revolucionar el control de malezas a nivel global. Esta investigación evalúa el desempeño del modelo YOLOv5 (n, s, m, l and x), para detectar cuatro tipos de malezas en cultivos de maíz en condiciones de campo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Este estudio se realizó en las parcelas del Centro Integrado de Formación Profesional "Viñalta", ubicado a 2km de la ciudad de Palencia, Castilla y León. Las parcelas se sembraron con maíz dulce (Zea mays L.), separadas a 30 cm entre platas y 50 cm entre surcos. Se encontraron en las parcelas cuatro tipos de malezas (Lolium perenne, Sonchus oleraceus, Saolanun nigrum, Poa annua). Sistema de adquisición de imágenes: se construyó una estructura en aluminio tipo carro, el cual soporta el sistema de visión y el sistema de iluminación. El sistema de visión se compone de una cámara réflex Canon 850D con sensor CMOS de 22,3 x 14,9 mm ubicada a un metro de altura del suelo, con un objetivo EF-S 15-55mm f/4-536 IS STM y filtro polarizador circular PL-C 58mm. El sistema de iluminación se construyó con cuatro lámparas de luz blanca tipo LED de 6000 K configurada en matriz de 6 x 6 leds, a cada lámpara se le incorporó un filtro polarizador ROSCO de transmisión: 38 % (1,5 f/stop). El carro fue dotado de un sistema de baterías e inversor para la alimentación de la iluminación y de la cámara réflex. Se tomaron imágenes en RGB con resolución de 6000x4000 píxeles por 45 días, distribuidos desde el momento de la emergencia de la planta (día 16) hasta el final de la etapa fenológica del desarrollo vegetativo (día 60) obteniendo un total de 5600 imágenes. **Selección y etiquetado de las imágenes:** Se seleccionaron las imágenes aptas para el entrenamiento, eliminando las que tuvieran desenfoque demasiado alto, Para el etiquetado de las imágenes se utilizó la herramienta de código abierto LabelImg, realizado por personal capacitado. Se usaron 5 Clases de etiquetas: maíz, para las plantas de maíz, mh1: *Lolium perenne*, mh2: *Sonchus oleraceus*, mh3: *Saolanun nigrum*, mh4: *Poa annua.* **Configuración del equipo:** Procesador: Core (TM) i7-12650H 12th Gen Intel(R) 2.70 GHz, GPU: NVIDIA GeForce RTX 3050 4096MiB, Memoria RAM: 16 GB, Entorno acelerado: CUDA 11.7, Entorno de desarrollo: Jupyter Notebook Versión 6.5.4, Python 3.8.16, PyTorch 2.0.0, Torchvision 0.15.0, Torchaudio 2.0.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El resultado del entrenamiento generó los pesos de cada modelo de CNN (s-n-m-l-x), almacenados en el archivo best.pt. La validación se realizó con la instanciación de 1680 imágenes, evaluando el rendimiento mediante la matriz de confusión y el mAP@0.5 (mean Average Precision at IoU=0.5). La matriz de confusión, presentada en las Figuras 1, 2, 3, 4 y 5, muestra la relación entre predicciones y etiquetas verdaderas, evidenciando un desempeño excepcional en la clasificación de maíz y malezas para todos los modelos. En la clase maíz, YOLOv5x obtuvo el mayor mAP con 0.97 (97%), seguido por los modelos s-n-m-l con 0.96 (96%), indicando que todos los modelos son robustos y cumplen con el objetivo de discriminar maíz de malezas para aplicaciones de escarda selectiva. Entre las malezas, mh2 (*Sonchus oleraceus*) y mh3 (*Solanum nigrum*) presentan confusiones en todos los modelos debido a la similitud de sus hojas en etapas iniciales de desarrollo, aunque esta disminuye a medida que crecen. Según la Tabla 1, que resume los valores de la matriz de confusión, para mh1 (*Lolium perenne*), YOLOv5l alcanzó el mejor desempeño con 0.89 (89%). En mh2 (*Sonchus oleraceus*), YOLOv5s obtuvo la predicción más alta con 0.90 (90%). Los campos destacados en la tabla 1, señalan los valores más altos por etiqueta (*). Para la clase mh3 (*Solanum nigrum*), YOLOv5x obtuvo la mayor predicción con un mAP de

0.46 (46%), siendo este valor bajo en comparación con las demás etiquetas, debido a confusiones con el background entre 0.51 y 0.62 (51%-62%). El background, corresponde a objetos fuera de las clases objetivo, refleja la insuficiencia de datos de entrenamiento para esta maleza, sugiriendo la necesidad de más imágenes para mejorar la detección. En mh4 (*Poa annua*), YOLOv5s alcanzó el mejor desempeño con un mAP de 0.78 (78%), pero también se observaron confusiones con el background de 0.16 a 0.22 (16%-22%). Esto indica, como en mh3, la necesidad de incrementar los datos de entrenamiento.

CONCLUSIONES

La Tabla 2 resume los valores de mAP@0.5 para cada clase; los valores más altos están señalados con un asterisco (*). Para la clase maíz, YOLOv5n obtuvo el mayor mAP con 0.979 (97.9%), mostrando una precisión sobresaliente y consistente entre modelos, lo que confirma que cualquiera de ellos es adecuado para la aplicación, garantizando excelente rendimiento en la detección de esta clase.

Para la clase mh1, los valores de mAP varían entre 0.81 y 0.839, con el mejor desempeño 0.839, (83.9%) en YOLOv5x, mostrando buen rendimiento con ligera variabilidad. En mh2, el mAP oscila entre 0.856 y 0.883, destacando nuevamente YOLOv5x con el máximo de 0.883 (88.3%), lo que refleja una detección robusta. Por el contrario, mh3 presenta los valores más bajos 0.33 a 0.387, con el mejor resultado en YOLOv5m 0.387 (38.7%), indicando un rendimiento deficiente y la necesidad de más datos, aumento de datos o ajustes arquitecturales. Para mh4, el mAP está entre 0.664 y 0.766, alcanzando el mayor valor 0.766 (76.6%) con YOLOv5l, lo que sugiere un rendimiento aceptable pero no óptimo. En promedio, los modelos YOLOv5 lograron un mAP global entre 0.744 y 0.758, siendo el máximo 0.758, (75.8%) de YOLOv5l. Aunque este valor promedio es inferior al de la clase maíz 0.979, (97.9%), los modelos son adecuados para aplicaciones en campo, como sistemas de escarda selectiva que discriminen maíz de malezas, independientemente de la especie.

Referencias

Chen, J., et al., "Weed detection in sesame fields using a YOLO model with an enhanced attention mechanism and feature fusion," *Comput Electron Agric*, vol. 202, Nov. 2022, doi: 10.1016/J.COMPAG.2022.107412.

FAO, "Perspectivas de cosechas y situación alimentaria #4, diciembre 2021," *Crop Prospects and Food Situation #4*, Dec. 2021, doi: 10.4060/CB7877EN.

Fatima, H. S., I. ul Hassan, S. Hasan, M. Khurram, D. Stricker, and M. Z. Afzal, "Formation of a Lightweight, Deep Learning-Based Weed Detection System for a Commercial Autonomous Laser Weeding Robot," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 13, no. 6, 2023, doi: 10.3390/app13063997.

Gallo, I., A. U. Rehman, R. H. Dehkordi, N. Landro, R. La Grassa, and M. Boschetti, "Deep Object Detection of Crop Weeds: Performance of YOLOv7 on a Real Case Dataset from UAV Images," *Remote Sens (Basel)*, vol. 15, no. 2, 2023, doi: 10.3390/rs15020539.

Rajcan, I., and C. J. Swanton, "Understanding maize–weed competition: resource competition, light quality and the whole plant," *Field Crops Res*, vol. 71, no. 2, pp. 139–150, Jun. 2001, doi: 10.1016/S0378-4290(01)00159-9.

Redmon, J., S. Divvala, R. Girshick, and A. Farhadi, "You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection," Accessed: May 29, 2023. [Online]. Available: http://pjreddie.com/yolo/.

Wang, B., Y. Yan, Y. Lan, M. Wang, and Z. Bian, "Accurate Detection and Precision Spraying of Corn and Weeds Using the Improved YOLOv5 Model," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 29868–

29882, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3258439.
Ying, B., Y. Xu, S. Zhang, Y. Shi, and L. Liu, “Weed detection in images of carrot fields based on improved YOLO v4,” *Traitement du Signal*, vol. 38, no. 2, pp. 341–348, Apr. 2021, doi: 10.18280/TS.380211.

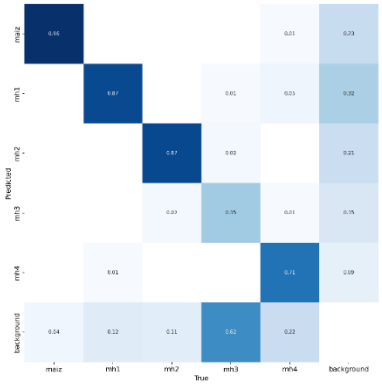


Figura 1. Matriz de confusión YOLOv5n.

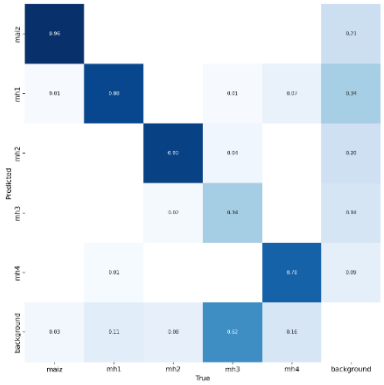


Figura 2. Matriz de confusión YOLOv5s.

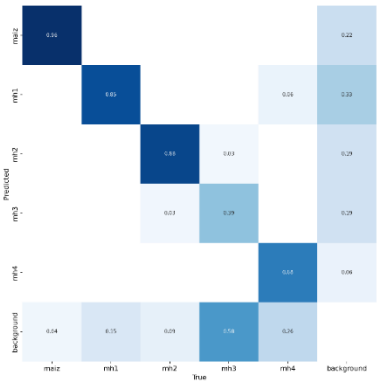


Figura 3. Matriz de confusión YOLOv5m.

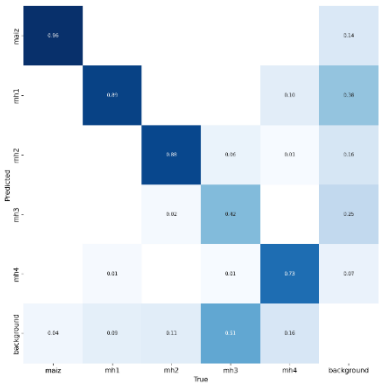


Figura 4. Matriz de confusión YOLOv5l.

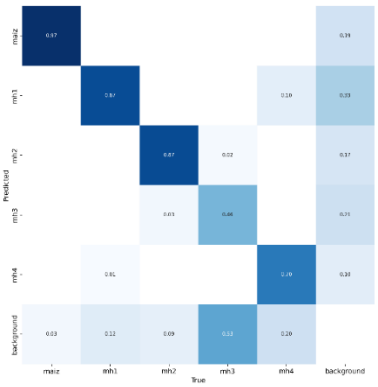


Figura 5. Matriz de confusión YOLOv5x.

Tabla 1. Principales valores de las matrices de confusión de los modelos YOLOv5.

	Maiz	***mh1***	***mh2***	***mh3***	***mh4***
YOLOv5n	0,96	0,87	0,87	0,35	0,71
YOLOv5s	0,96	0,88	0,90*	0,34	0,78*
YOLOv5m	0,96	0,88	0,88	0,39	0,68
YOLOv5l	0,96	0,89*	0,88	0,42	0,73
YOLOv5x	0,97*	0,87	0,87	0,46*	0,70

Tabla 2. Valores de mAP@0.5 para cada clase de los modelos YOLOv5 (n, s, m, l, x).

	YOLOv5n	*YOLOv5s*	*YOLOv5m*	*YOLOv5l*	*YOLOv5x*
maiz	0,979*	0,973	0,969	0,977	0,972
mh1	0,838	0,836	0,810	0,829	0,839*
mh2	0,856	0,871	0,878	0,864	0,883*

mh3	0,355	0,330	0,387*	0,353	0,375
mh4	0,732	0,710	0,696	0,766*	0,664
All classes	0,752	0,744	0,748	0,758*	0,747

Determinación de la concentración de nitrógeno en arroz (*Oryza sativa*) mediante análisis de reflectancia espectral en Colombia.

D. C. Polanía-Montiel[1,3], O. L. Garcia-Navarrete[2,3] y L. M. Navas Gracia[3]

[1] Universidad Surcolombiana, Facultad de Ingeniería, Neiva, Colombia; carolina.polania@usco.edu.co
[2] Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Bogotá, Colombia; olgarcian@unal.edu.co
[3] Universidad de Valladolid, Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias, Departamento de Ingeniería Agrícola y Forestal, Palencia, España; dianacarolina.polania23@estudiantes.uva.es, oscarleonardo.garcia@uva.es, luismanuel.navas@uva.es

Palabras clave: Etapa fenológica, firma espectral, índices de vegetación, clorofila.

Resumen

La evaluación del estado nutricional en el cultivo de arroz por medio de respuestas espectrales es de importancia para la toma de decisiones referentes a la aplicación de insumos agrícolas, ya que el uso de sensores puede substituir al muestreo destructivo usual en la evaluación de variables fisiológicas y minimiza los costos técnicos de medición. La actual investigación evaluó las respuestas espectrales del arroz (*Oryza sativa*), variedad Fedearroz–67 según estado nutricional asociado al Nitrógeno según fenología. Se estableció un diseño en factorial simple en arreglo en bloques completos y generalizados. Los tratamientos asociados a la dosis de N (T1=0, T2=160, T3=200 y T4=240 kg ha^{-1}) se aleatorizaron en cuatro parcelas de 5m×5m. Las etapas fenológicas macollamiento, desarrollo de panícula y floración se evaluaron en muestreos independientes por lo que se usó un análisis de varianza por etapa. La mayoría de los índices presentaron diferencias significativas por tratamientos, con diferenciación clara del testigo respecto de las dosis T2, T3 y T4, pero con poca o ninguna diferenciación entre T2 y T3 y entre T3 y T4 en las etapas fenológicas finales. Además, se utilizó el análisis de regresión no lineal para ajustar los índices asociados a la respuesta espectral y el contenido de clorofila. En macollamiento el índice con más ajuste estadístico fue el de la diferencia doble; en el desarrollo de la panícula fue el de simetría del borde rojo normalizado específico y en floración el NDVI2. Con estos resultados se propone utilizar una fertilización específica según fenología, a saber, una dosis de T2 en macollamiento y desarrollo de panícula y de T3 en floración. Estos resultados evidencian la utilidad de los índices espectrales en la estimación del contenido de N y clorofila y en el manejo de la fertilización según fenología.

INTRODUCCIÓN

En Colombia el arroz ocupa uno de los primeros lugares en la seguridad alimentaria con un considerable valor económico y gran generador de empleo, pero en los últimos años las cosechas han presentado una disminución en la producción debido a factores asociados al cambio climático, calidad de las semillas, degradación de los suelos, y los altos costos de producción (Chica, Tirado, & Barreto, 2016)

El nutriente con mayor importancia para el cultivo de arroz es el Nitrógeno (N), ya que influye directamente en el crecimiento, formación de macollas, llenado del grano, forma parte de la estructura molecular de proteínas, clorofila, ácidos nucleicos (ADN y ARN), citocromos y coenzimas (Rodríguez, 1999). El diagnóstico de los contenidos de N en los cultivos es muy

importante, ya que las deficiencias generan plantas atrofiadas con un limitado macollamiento, clorosis de hojas viejas, hojas pequeñas, angostas y erectas, disminuye el número de panojas, macollas y grano, de igual forma, el exceso de N incide directamente sobre el volcamiento y la enfermedad conocida como Pyricularia (Rodríguez, 1999). La teledetección puede convertirse en una solución eficiente para la estimación de los contenidos de N en cultivos, como una técnica alternativa de las metodologías de laboratorio tradicionales, ya que logra ser rápida y confiable. En la vegetación la reflectancia depende de factores como los tipos de pigmentos, estructura de las hojas y el contenido de humedad. El primero afecta en las longitudes de onda del espectro visible (0,4-0,7 m) donde el 65% es absorbido por la clorofila, el 29% por la xantófila y el 6% por carotenos. La estructura de las hojas (capa esponjosa del mesófilo) a su vez aumenta la reflectividad en la zona del infrarrojo cercano (0,8-1,1 m). Finalmente, entre los rangos 1,4 m-1,8 m (infrarrojo medio) la reflectividad depende del contenido de agua entre y dentro de las células, en condiciones de hidratación normales ambos valles son profundos y marcados y en condiciones de estrés hídrico estos son menos marcados aumentando su reflectividad (Hernández, 2007). El objetivo de la actual investigación fue determinar la relación entre las respuestas espectrales a la fertilización con nitrógenos en el cultivo del arroz (*Oryza sativa* L.), variedad Fedearroz – 67 en diferentes estados fenológicos.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó al sur de Colombia, en el municipio de Saldaña, departamento del Tolima, en el Centro Experimental Las Lagunas de la Federación Nacional de Arroceros (FEDEARROZ). Este estudio se llevó a cabo para diagnosticar el estado del N en el cultivo del arroz en tres estados fenológicos (macollamiento – 19 ddg, desarrollo de panícula – 58 ddg y floración – 70 ddg). El diseño factorial simple en arreglo en bloques completos y generalizados al azar, donde el factor entre-sujetos fue las distintas dosis de N y el factor intra-sujetos se asoció con las etapas fenológicos desigualmente espaciadas. FEDEARROZ estableció 16 parcelas con una variedad de arroz denominada Fedearroz – 67, en la cuales se aplicaron 4 tratamientos de N donde la fuente utilizada fue urea (0 kg ha^{-1}, 160 kg ha^{-1}, 200 kg ha^{-1} y 240 kg ha^{-1}), con cuatro repeticiones distribuidos aleatoriamente. El tamaño de cada parcela dividida fue de 5 x 5 m, con una densidad de siembra en surcos de 120 kg ha^{-1}. El muestreo se realizó en cada parcela de forma aleatoria en las cuales se seleccionaron entre 6 a 12 plantas de arroz (dependiendo el estado fenológico) en cada parcela, donde fue recolectada la segunda o tercera hoja superior del macollo central por planta. Se midió la respuesta espectral con el espectroradiómetro FieldSpec 4 Hi – Res Spectroradiometer (ASD inc.) con un rango de longitud de onda de 350 a 2.500 nm, posteriormente se determinó el contenido de clorofila utilizando el método de espectrofotometría.

Con los datos obtenidos de las respuestas espectrales se procedió a aplicar un suavizado de las curvas de reflectancia con el algoritmo de Savitzky-Golay para obtener la primera derivada manejando un polinomio de tercer orden y una ventana móvil de 7 puntos, utilizando el software R. Como la absorción de clorofila se produce principalmente en la región del visible, se utilizó la región entre 400 – 1000 nm para el análisis. Posteriormente se utilizó un análisis de varianza (con corrección de Bonferroni) para el diseño factorial simple en arreglo en bloques completos generalizados para evaluar las diferencias desde el punto de vista estadístico entre los tratamientos y los valores de los índices obtenidos, con un análisis para cada una de las tres etapas fenológicas. Finalmente se utilizó un análisis de regresión simple no lineal para evaluar la relación del contenido de clorofila (a, b y total) y los índices evaluados discriminando por etapa fenológica. Todos los análisis estadísticos se realizaron utilizando el software RStudio. En la evaluación de los diferentes modelos de regresión lineal y no lineal se seleccionó aquellos con mayor coeficiente de determinación (R^2).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las hojas de arroz respondieron de una manera muy similar a los diferentes tratamientos con N, con respecto a las respuestas espectrales de las firmas puras y su respectiva derivada en cada una de las etapas fenológicas. Las hojas con menor contenido de clorofila tuvieron la más alta reflectancia en la longitud de onda del espectro visible (Xue & Yang, 2009). En la Figura 7 se muestra el comportamiento de las respuestas espectrales con respecto a la fertilización nitrogenada. A medida que aumentó la dosificación de N fue menor la reflectancia debido a la cantidad de clorofila presente en la hoja. Esto se atribuyó a que hojas con menor contenido de N producen trastornos en el follaje indicando menos formación de clorofila, por lo tanto, tienen mayor reflectancia en la longitud de onda del espectro visible. En general, los pigmentos foliares tienen un gran impacto en la reflectancia visible, la absorción se debe a pigmentos como clorofilas a + b, carotenoides y pigmentos marrones que aparecen durante la senescencia, además la estructura celular de las hojas se expresa en el rango del infrarrojo cercano y el vapor de agua, las proteínas, la química foliar afecta la reflectancia desde el infrarrojo cercano al espectro del infrarrojo medio (Liang, 2003).

La absorbancia de la luz por las hojas en el espectro visible depende principalmente de la concentración de clorofila y carotenoides. Las hojas verdes absorben entre el 75 y 90 % de la luz en la parte azul (cerca de 450 nm) o roja (cerca de 675 nm) del espectro electromagnético. La absorbancia es menor en la región de longitud de onda alrededor de 550 nm, además las medidas de reflectancia pueden usarse como indicador del cambio en la concentración de clorofila (De La Cruz, 2008). En la Tabla 1 se presentan los valores de significación evaluada posterior al análisis de varianza discriminadas por etapa fenológica. Para determinar si hubo diferencias significativas entre los tratamientos por cada variable de repuesta se utilizó la corrección de Bonferroni (α=0.017; 1.7% y no al 5%), indicando que los índices que obtuvieron diferencias significativas entre tratamientos tienen un valor-P menor que 0,017 una vez hecha la corrección para las tres etapas consideradas.

Se estableció la relación entre contenido de clorofila y los índices espectrales a partir de los cálculos de ANOVAS, prueba de LSD, correlación de Pearson y regresiones lineal y no lineal, permitiendo identificar los índices que pueden ser los mejores estimadores de clorofila en cada etapa fenológica a partir del R^2 más alto del modelo. De acuerdo con lo anterior los más apropiados son el DDI para el macollamiento, GNDVI para el desarrollo de la panícula y NDVI2 para la floración. Por lo anterior para hacer las estimaciones de clorofila, se debe tener en cuenta el estado fenológico del cultivo, además estos índices manejan la reflectancia en la franja de transición entre el rango visible (rojo) y el rango del infrarrojo cercano (NIR) conocida con el nombre de la región del red edge.

Referencias

Chica L., J., Tirado O., Y. C., & Barreto O., J. M. (2016). Indicadores de competitividad del cultivo del arroz en Colombia y Estados Unidos. *Revista de Ciencias Agrícolas*, *33*(2), 16–31. https://doi.org/10.22267/rcia.163302.49

De La Cruz, J. A. (2008). Reflectancia e Índices Espectrales en Pigmentos para Diagnóstico Nutrimemtal de Nitrógeno. Colegio de Postgraduado.

Hernández, J. (2007). Procesamiento digital de imágenes. Chile. Retrieved from http://www.gep.uchile.cl/Publicaciones/Tratamiento Digital de Imágenes - Jaime Hernández 2011.pdf

Liang, S. (2003). Quantitative Remote Sensing of Land Surfaces. Wiley Praxis series in Remote Sensing. https://doi.org/10.1002/047172372X

Rodríguez, J. (1999). Fertilización del Cultivo de Arroz (Oryza sativa). In XI Congreso Agronómico /III Congreso Nacional de Suelos 1999 (pp. 123–136). Retrieved from http://www.mag.go.cr/congreso_agronomico_xi/a50-6907-III_123.pdf

Xue, L., & Yang, L. (2009). Deriving leaf chlorophyll content of green-leafy vegetables from hyperspectral reflectance. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 64(1), 97–106. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2008.06.002

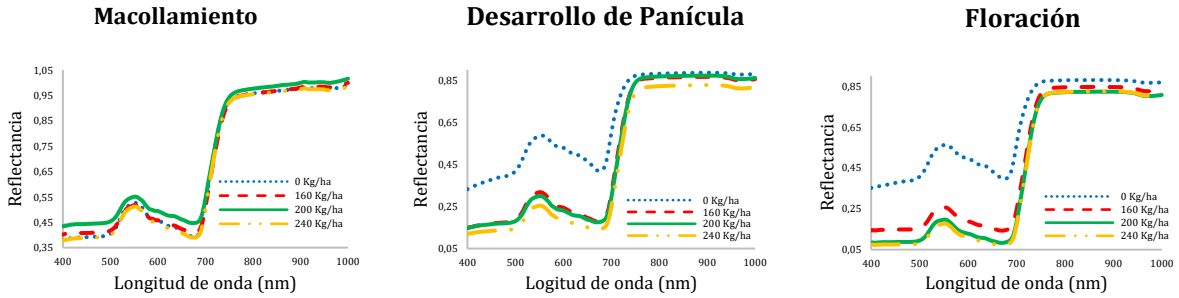


Figura 7. Reflectancia del arroz en tres estados fenológicos bajo diferentes tratamientos de N.

Tabla 1. Análisis de varianza (ANOVA)

Variable	Etapas fenológicas		
	Macollamiento	Desarrollo de Panícula	Floración
RES	**0,0000**	**0,0000**	**0,0000**
NDVI2	0,6179	**0,0000**	**0,0000**
GNDVI	0,5610	**0,0000**	**0,0000**
DDI	**0,0007**	**0,0000**	**0,0000**
R_{740}/R_{720}	0,4888	**0,0000**	**0,0000**
R_{750}/R_{705}	0,6611	**0,0000**	**0,0000**
$\frac{R_{850}-R_{710}}{R_{850}-R_{680}}$	**0,0000**	**0,0000**	**0,0000**
NDRE1	0,3210	**0,0000**	**0,0000**
NDRE2	0,6074	**0,0000**	**0,0000**
mSR	**0,0012**	**0,0000**	**0,0000**
D_{725}/D_{702}	**0,0001**	**0,0000**	**0,0000**
BND	**0,0001**	**0,0000**	**0,0000**

Trabajo experimental para la detección de fallos en máquinas deshuesadoras de aceituna (*Olea europaea,* L.)

Luis Villanueva Gandul[1], Antonio Madueño Luna[1], José Miguel Madueño Luna[2], Miguel C. López Gordillo[2] y Manuel J. González Ortega[1]

[1]Universidad de Sevilla, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica. Departamento de Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluidos; luivilgan@alum.us.es, amadueno@us.es, mgortega@us.es
[2]Universidad de Sevilla, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica. Departamento de Expresión Gráfica y Cartográfica; jmadueno@us.es, mlopez@us.es

Palabras clave: máquinas deshuesadoras de aceitunas, DRR, error de barco, OpenCV, sistemas de visión artificial, Matlab.

Resumen

Las máquinas deshuesadoras, rebanadoras y rellenadoras de aceitunas han incrementado a lo largo de su historia su eficiencia y velocidad de procesamiento con mejoras mecánicas puntuales, pero esta metodología las incapacita para conseguir la eficiencia plena de deshuesado y pasa por alto otros aspectos del proceso como las características del producto procesado. La alternativa es la visión artificial, que ha inaugurado todo un campo de experimentación y desarrollo con múltiples soluciones y aplicaciones. Este trabajo propone una metodología alternativa de evaluación del proceso industrial de deshuesado para aceitunas gordal negras californianas (*O. europaea regalis*) por medio de un sistema de captura de imagen basado en una cámara DFK33GV024 de Imagine Source coordinada con un software desarrollado en OpenCV que toma imágenes a color y las almacena en formato .png con un tamaño de 320x240 píxeles. Desde aquí puede descargarse una 'cata digital' para segmentar y analizar estadísticamente en diferido por medio de una aplicación desarrollada ex profeso en el entorno de programación de Matlab. El resultado refleja que el ajuste mecánico ha sido bueno, con un error de barco por debajo del 2%, pero que se ha descuidado el calibrado previo de las aceitunas.

INTRODUCCION

La aceituna de mesa (*Olea europaea* L.) es el principal encurtido mundial (Gómez et al., 2006) con una producción superior a los 20 millones de toneladas (FAO, 2022) y una demanda que sigue creciendo al abrirse nuevos mercados. Esta tendencia de crecimiento vigente el siglo pasado impulsó en la década de los 70 la mecanización del sector con la aparición de las máquinas deshuesadoras, rebanadoras y rellenadoras (DRR) que se convirtieron rápidamente en el estándar de producción (Santos Siles, 1999). A día de hoy estos sistemas precisan de actualizaciones más avanzadas que las mejoras mecánicas puntuales para alcanzar una eficiencia plena, que, por ejemplo, controle el 'error de barco' (De Jódar Lázaro et al., 2020; Lucas Pascual et al., 2020) además de prescindir de la subjetividad del factor humano. Durante las tres últimas décadas los sistemas de visión artificial han demostrado eficiencia plena en la inspección visual, operando a altos niveles de producción y de forma constante (Abdullah, 2016; Danush et al., 2023) convirtiéndose en otro estándar dentro de la industria agroalimentaria e introduciendo nuevas vías de evaluación del proceso. El presente trabajo pretende aportar una metodología de precisión

alternativa para la evaluación de la calidad del deshuesado en máquinas DRR, que supere las limitaciones de la cata de expertos en la detección del error de barco durante la fase de flotación; y al mismo tiempo caracterice morfológicamente la 'carga de fruto' transportado por medio de una aplicación experimental desarrollada en el entorno de programación de Matlab y un sistema de visión artificial de captura de imagen justo antes del deshuesado.

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo se desarrolló en una entamadora de la localidad sevillana de Morón de la Frontera, instalando un sistema de visión artificial sobre una máquina deshuesadora Sadrym modelo 130 de cola corta con ¾'' de ancho de cadena de alimentación. La máquina se ajustó para un calibre nominal de 80 aceitunas/kg y se cargó con una partida de aceitunas de la variedad Gordal (*O. europaea regalis*) previamente oxidadas, un tratamiento que encurte a la vez que ennegrece la pulpa conocido como 'estilo californiano'. El sistema de visión artificial (Cheng et al, 2016, Díaz, 2016) consistía en la instalación de una cámara DFK 33GV024 del fabricante Imagine Source con adaptador a la cadena de transporte, sincronizada en el disparo con una corona LED de iluminación por medio de un sensor magnético que detecta el paso del cangilón durante el transporte de la aceituna. Las imágenes tomadas se supervisaron en tiempo real y se almacenaron en el disco duro del portátil de monitoreo a través de un software desarrollado con funciones de la librería OpenCV en Qt-Creator. Se ha seleccionado una tirada continua de imágenes lo suficientemente representativa, concretamente 1638 imágenes a color en formato .png y tamaño 320x240 píxeles, las cuales se han reducido a 1628 para constituir una 'cata digital' con aceitunas que aparecen enteras e individuales para valorarlas exclusivamente por su tamaño y orientación. Por otro lado, se ha desarrollado una aplicación en el entorno de programación de Matlab R2022b basada en dos scripts: binariza2d.m y procesa_aceitunas_3.m. El primero un interfaz gráfico que realiza un binarizado en el espacio de color HSV para detectar la aceituna y corregir imperfecciones originando una segmentación completa, seguida de un análisis morfológico consistente en el conteo de píxeles (medición de área) y medición del ángulo de orientación del eje mayor respecto a la horizontal. Mientras que el segundo script realiza un análisis estadístico sobre estos datos devolviendo en forma de resultados un histograma de áreas, un histograma de orientaciones y un histograma con la distribución proporcional de áreas a la que se superpone la curva de distribución normal con datos de media y varianza. Información que también se genera en formato de tabla resumen.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se ha optado por un tamaño muestral lo suficientemente grande como para extender los resultados a una población infinita con un error estadístico por debajo incluso del 5%.

El error de barco puede valorarse desde el histograma de ángulos (Figura 1a), donde aparecen en la zona central aquellas aceitunas mal orientadas respecto al eje de referencia fijado, rango [80, 100]. Estas aceitunas acceden a la zona de deshuesado de la máquina rotadas 90º respecto al eje del punzón, lo cual impide la extracción limpia del hueso favoreciendo incrustaciones difíciles de detectar o daños en la pulpa. El número de casos totales es de 18 aceitunas sobre el total muestral de 1628, que no supera el 2% que las entamadoras se fijan como margen de pérdida. El aumento de este error por encima de dicho margen está vinculado directamente con el acople entre la tolva y la cadena de alimentación, así como el plato rotativo elegido. Por tanto, puede validarse el ajuste mecánico.

Los histogramas de áreas grafican el conjunto de tamaños de las aceitunas procesadas por la DRR (carga de frutos). Ambos se agrupan por segmentos según los píxeles de la imagen, cuya

correspondencia directa con los calibres se ha establecido previamente testeando una aceituna modelo (de calibre nominal) desde la distancia fijada entre la cámara y la pista de la cadena de alimentación. Tanto la Figura 1b como 1c evidencian que el mayor lote queda incluido dentro del rango del calibre nominal (249 aceitunas quedan comprendidas en el rango [25.000, 26.000], calibre 80 = 25.000 píxeles). Al mismo tiempo, se detecta una contaminación de aceitunas de menor calibre en el rango [10.000, 14.000], con un total de 27 aceitunas que suponen un 1,66% de la muestra total. El conjunto de aceitunas procesadas posee una distribución heterogénea, con una varianza elevada (10.610.215 píxeles^2), que supera entre 6 – 7 veces el valor esperado de tamaño. La Figura 1c lo corrobora a través de la curva de distribución normal, con una leve desviación de la media (25.222 píxeles < 25.500) y una curva dilatada debido a la varianza. Esta circunstancia suele ser habitual en muchas entamadoras y se debe al método de calibrado empleado antes de introducir las aceitunas en la DRR basado en un sistema de cables paralelos de divergente a convergente que no es siempre efectivo, ocasionando lotes de aceitunas que perjudican al consumidor por defecto de tamaño o al productor por exceso.

Referencias

Abdullah, M.Z. (2016). Image Acquisition Systems. D.W. Sun (ed.), Computer Vision Technology for Food Quality Evaluation, 2nd Edition, cap.1, pp. 3 - 39. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802232-0.00001-3

Cheng, J.H.; Sun, D.W.; Nagata, M. y Tallada, J.G. (2016). Quality Evaluation of Strawberry. D.W. Sun (ed.), Computer Vision Technology for Food Quality Evaluation, 2nd Edition, cap. 13, pp. 327 - 349. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802232-0.00013-X

Dhanush, G.; Khatri, N.; Kumar, S. y Shukla, P.K. (2023). A comprehensive review of machine vision systems and artificial intelligence algorithms for the detection and harvesting of agricultural produce. *Scientific African*, (21), e01798, https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2023.e01798.

De Jódar Lázaro, M.; Madueño Luna, A.; et al. (2020) Deep learning in olive pitting machines by computer vision. Computers and Electronics in Agriculture (171) 105304. https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105304

Díaz, R. (2016). Classification and Quality Evaluation of Table Olives. Computer Vision Technology for Food Quality Evaluation, 2nd Edition. cap. 14, p. 351 - 365. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802232-0.00014-1

FAO (2022). *Producción mundial de aceitunas en millones de toneladas según Faostat.* Consulta realizada el 11 de diciembre de 2024. https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL/visualize

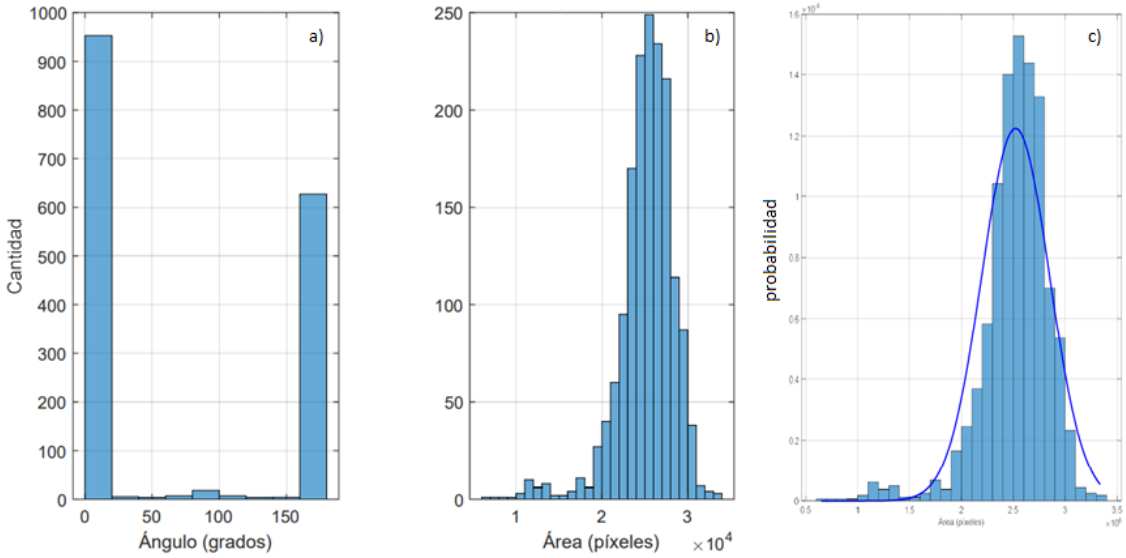
Gómez, A.H.; García, P. y Navarro, L. (2006). Elaboration of table olives. *Grasas y Aceites*, 57 (1), enero - marzo, pp 86-94. https://doi.org/10.3989/gya.2006.v57.i1.24

Lucas Pascual, A.; Madueño Luna, A. et al. (2020a) Analysis of the Functionality of the Feed Chain in Olive Pitting, Slicing and Stuffing Machines by IoT, Computer Vision and Neural Network Diagnosis. Sensors 5(20) 1541. https://doi.org/10.3390/s20051541

Santos Siles, F.J. (1999) Las nuevas tecnologías aplicadas al sector de la aceituna manzanilla fina.

Grasas y Aceites. 2 (50), pp 131-140. https://doi.org/10.3989/gya.1999.v50.i2.648

Figura 1. Distribución por segmentos de las orientaciones (a) y tamaños (b y c) del conjunto de las 1628 aceitunas fotografiadas durante el proceso de deshuesado.



Algoritmos y sistemas de gestión de la fertirrigación mediante bombas y protocolo modbus RTU

M. Soler Méndez[1], J. Fernández Esquiva[1] D. Parras Burgos[2] y J.M. Molina Martínez[1]

[1] Grupo de Investigación de Ingeniería Agromótica y del Mar, Universidad Politécnica de Cartagena, 30202 Cartagena, España; manuel.ia@agrosolmen.es

[3] Departamento de Estructuras, Construcción y Expresión Gráfica, Universidad Politécnica de Cartagena, 30202 Cartagena, España

Palabras clave: Eficiencia energética, fertirrigación, riego de precisión, agricultura 4.0, necesidades nutricionales del cultivo

Resumen

En regiones áridas, la escasez de agua marca la gestión de las explotaciones agrícolas, siendo el riego localizado, tanto la instalación como su manejo, una herramienta muy útil para la gestión eficiente del agua de riego. Asociada al riego localizado está la fertilización, que combinados se llama fertirrigación, y permite el aporte de los nutrientes que requiere el cultivo a través del riego localizado. Fundamentalmente existen dos tipos de sistemas de inyección de fertilizantes empleados masivamente: uno es el sistema Venturi, y el otro es el aporte del fertilizante mediante bomba inyectora. En ocasiones, un Venturi aprovecha la energía disponible de la red de riego, para promover la inyección de fertilizante, pero en muchas otras ocasiones, la energía la obtienen a través de un bombeo auxiliar. Una de las diferencias más importantes entre ambos sistemas de inyección es que, mientras que una bomba inyectora necesita una determinada energía para mover un volumen de fertilizante, un Venturi, con su bomba auxiliar, necesita mover mucho mayor volumen de agua para conseguir inyectar el mismo volumen de fertilizante, dependiendo de su caudal motriz. Por tanto, sin duda es más eficiente energéticamente una bomba inyectora. Pero existen otras ventajas técnicas por las que se refuerza la hipótesis de que la inyección de fertilizantes mediante bombas es la técnica más interesante. Pero para conseguir una fertirrigación pensando en la nutrición de las plantas, el operario encargado de la fertirrigación debe combinar las necesidades del cultivo con la solución nutritiva preparada y las características del sistema de inyección. Englobado en una línea de trabajo mayor encaminada a mejorar la experiencia del operario en la fertirrigación, se desarrollan en este trabajo sistemas de gestión de la fertirrigación y algoritmos de control de las bombas inyectoras mediante protocolo modbus RTU.

INTRODUCCIÓN

La población creciente supone que la agricultura debe incrementar su producción, cobrando los fertilizantes un papel importante para conseguir tal objetivo (Pagán et al, 2015; Soler et al, 2022). La aplicación de fertilizantes en el agua se conoce como fertirrigación o quimigación (Soler et al, 2022; Manzano et al, 2015).

Existen distintos sistemas de inyección de fertilizantes (García-Serrano, 2010), aunque se consideran el Venturi y la bomba inyectora por su funcionamiento y características (Soler et al, 2024). Un Venturi requiere una corriente de agua para poder arrastrar el líquido fertilizante, requiriendo una diferencia de presión entre la entrada y salida al menos del 30%, pudiendo mejorar

el funcionamiento si se instala en la aspiración de una bomba auxiliar (Manzano et al, 2015). Esto supone un costo energético importante, ya que hay que movilizar un volumen de agua adicional al volumen de solución nutritiva que se pretende inyectar. La instalación de un Venturi puede variar el caudal de inyección de la solución nutritiva porque depende de muchos factores hidráulicos, mientras que la instalación de una bomba inyectora permite un control muy estricto del volumen de solución nutritiva inyectado (Ferreyra et al, 2005). La bomba inyectora puede variar su inyección bien a través de la regulación del recorrido del eje, bien a través de la regulación de la velocidad de desplazamiento del eje (Ferreyra et al, 2005). Los avances tecnológicos han permitido que las bombas inyectoras avanzadas dispongan de mecanismos electrónicos capaces de regular ambos factores y que, por tanto, sean susceptibles de variar su caudal de inyección a través de otros controladores.

El Grupo de Investigación de Ingeniería Agromótica y del Mar de la Universidad Politécnica de Cartagena ha desarrollado una herramienta para poder calcular las consignas del sistema de dosificación de fertilizantes en base a las necesidades nutricionales del cultivo y las soluciones nutritivas preparadas (Soler et al, 2024), y el objetivo de este trabajo es poder ordenar esas consignas a los sistemas de inyección a través de Modbus RTU.

MATERIAL Y MÉTODOS

Se analizan distintas tipologías de sistemas de inyección de fertilizantes.

Sistemas de fertirriego con inyección de fertilizante por tiempo: podemos conocer, en base al caudal nominal del inyector, el tiempo que tiene que estar activo para poder aplicar el volumen de solución nutritiva que hay que inyectar en un determinado turno de riego. Si se trata de un Venturi, entonces el caudal nominal de inyección puede variar, ya que depende de las condiciones hidráulicas tanto del caudal de agua motriz como de la solución nutritiva a inyectar; por tanto, una inyección por tiempo puede que no sea todo lo precisa que debiese. A través de una bomba inyectora tradicional se puede fijar el caudal nominal de inyección, a través de un potenciómetro mecánico acoplado en la misma bomba; partiendo de que la regulación se ajuste con el valor de caudal nominal empleado para el cálculo, la inyección por tiempo aportará el volumen de solución nutritiva con precisión. Un avance importante en cuanto a las bombas inyectoras es la existencia de modelos avanzados, cuya regulación no es mecánica, sino electrónica, y se puede conocer el caudal de regulación a través de comunicación Modbus RTU; facilitará el cálculo en cada mo-mento del tiempo exacto de inyección para aportar la cantidad justa de solución nutritiva.

Sistemas de fertirriego con inyección de fertilizante por volumen: todos los problemas de posibles fallos en la inyección del volumen necesario de solución nutritiva quedan resueltos, puesto que el sistema es capaz de inyectar la cantidad precisa de solución nutritiva. Queda como incertidumbre el tiempo que va a necesitar para conseguir inyectar el volumen deseado, y el post-riego que pueda afectar a un lavado de fertilizantes en el suelo. Disponiendo de una bomba inyectora avanzada, se puede leer el caudal de inyección para prever el momento más adecuado de inicio del turno de inyección.

Sistemas de fertirriego con inyección de fertilizante proporcional por volumen: con un inyector tipo Venturi, y un controlador con algoritmos preparados para la aportación de fertilizantes proporcional al volumen, se podría conseguir una inyección más precisa de la fertilización que en un sistema por tiempo; pero supone la incorporación de una válvula de apertura instantánea, que abre por pulsos, y el caudalímetro tendría intervalos de caudal cero y de alto caudal, con lo que la lectura que ofrezca puede no ser precisa. Una bomba inyectora tradicional se

podría controlar de manera similar a un Venturi, a través de un controlador; si el controlador no tiene capacidad de transmitir una señal analógica a un variador de frecuencia, entonces se debería colocar una válvula de apertura instantánea en la aspiración de la bomba, en paralelo a una segunda válvula con agua limpia con funcionamiento opuesto a la de fertilizante. Sin embargo, una bomba inyectora avanzada dispone de algoritmos propios para realizar una fertilización proporcional al volumen.

Con todo lo expuesto, se establece una línea de trabajo encaminada a aprovechar las virtudes y capacidades de una bomba inyectora avanzada, con el fin de establecer los algoritmos oportunos para conseguir una fertilización proporcional al volumen.

Cálculos de la dosis de consigna: se parte de los desarrollos previos (Soler et al, 2024): **definición de la instalación:** caudal nominal del sistema de inyección, ajuste de la inyección y volumen del tanque; **distribución del riego:** superficie de la explotación y pluviometría del sistema de riego; **densidad de plantación**; **solución nutritiva:** cantidad de abono aplicada, volumen hasta el que se ha llenado el tanque, para cuántos días es la solución nutritiva y tiempo disponible para abonar en cada riego; **dosis a aplicar:** consigna de abonado y superficie de la agrupación de riego.

Establecimiento del programa de riego: en GENHIDRO se puede programar el riego, donde se establecen la hora de inicio de cada turno de riego, la duración, los tiempos de pre-riego y post-riego, el tiempo de abonado, y la consigna de abono proporcional.

Desarrollo de instrucciones para la comunicación con la bomba inyectora: Se establece un calendario en base a la programación de riego, con la consigna que hay que enviar a la bomba de riego cada vez que tiene que hacer un ciclo de inyección. Durante el pre-riego de cada turno de riego se realizarán las siguientes operaciones: 1. Se leerá a través de Modbus RTU la información de consigna en el registro 4750. 2. Se comparará la información contenida en la bomba con la información contenida en el servidor. 3. En caso de que no coincidan, se escribirá a través de Modbus RTU la consigna correcta en el registro 4752.

Adicionalmente, se leen parámetros básicos de la bomba inyectora, que permitirán conocer información sobre el trabajo realizado, así como llevar un mantenimiento preventivo. Para ello, se leerán a través de Modbus RTU los siguientes parámetros: a. Modo de funcionamiento (registro 4510); b. Alarmas de la bomba (registro 4514); c. Contador de caudal de agua de riego (registro 4540); d. Contador de ciclos (registro 4584).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con este desarrollo se completa la metodología necesaria para poder transformar un sistema de fertirrigación tradicional en un sistema inteligente, capaz de albergar los conocimientos necesarios para traducir una dosificación de fertilizante por planta o por unidad de superficie en una consigna concreta de programación del sistema de inyección de fertilizante. Así, el usuario de un cabezal de riego podrá aportar una fertilización exacta y precisa, apoyándose en sistemas avanzados como los expuestos en este trabajo, sin necesidad de tener conocimientos técnicos ni realizar cálculos; el agricultor podrá dosificar las recomendaciones de fertilización del servicio de asesoramiento técnico, y el equipo de inyección de fertilizantes se ajustará para lograr realizar la inyección necesaria.

Agradecimientos

Se agradece a AGROSOLMEN, S.L., a GENHIDRO, y al Programa AGROALNEXT que ha sido financiado por MICIN con fondos NextGenerationEU (PRTR-C17.I1) y por la Comunidad

Autónoma de la Región de Murcia a través de la Fundación Séneca - Agencia de Ciencia y Tecnología de la Región de Murcia.

Referencia

Ferreyra E., R., Sellés V., G., Ahumada B., R., Maldonado B., P., Gil M., P., Barrera M., C. 2005. Manejo del riego localizado y fertirrigación. Instituto de Investigaciones Agropecuarias de Chile.

Pagan F.J., Fernández Villena, M., Fernández Pacheco, D.G. Rosillo, J.J., Molina Martínez, J.M. 2015. Optifer: An application to optimize fertiliser cost in fertigation. Agricultural Water Management 151: 19-29.

Manzano, J., Palau, C.V., Moreira de Azevedo, B., Vieira do Bomfim, G. Vieira Vasconcelos, D. 2015. Design and installation alternatives of Venturi injectors in drip irrigation. Ciencia Agronómica 46: 287-298.

Soler Méndez, M., Parras Burgos, D., Intrigliolo, D.S, Molina Martínez, J.M. 2022. Development of a fertilization dosing tool for irrigation heads. 14th Frutic international symposium.

Soler Méndez, M., Hernández Martínez, B., Parras Burgos, D., Molina Martínez, J.M. 2024. Estructura para el Desarrollo de herramienta de cálculo de las consignas de los inyectores de fertilizante en un cabezal de riego con sistema de inyección por tiempo o por volumen, en base a las soluciones nutritivas preparadas en cada tanque. Jornadas de Ciencias Hortícolas 2024.

Identificación basada en datos de modelo dinámico de la nitrificación en suelos arenosos para la predicción de concentraciones de especies nitrogenadas

F. Reales[1*] y L. Orihuela[1,2].

[1]Centro de Investigación en Tecnología, Energía y Sostenibilidad, Universidad de Huelva, Ctra. Huelva-Palos de la Frontera, Campus La Rábida, 21819, Huelva, España.
[2]Dept. Ingeniería Electrónica, Sistemas Informáticos y Automática, Universidad de Huelva, Avda. de las Fuerzas Armadas, s/n, 21007, Huelva, España.

[*]Autor para correspondencia: francisca.viejo@diesia.uhu.es

Palabras clave:
Cinética de nitrificación, Suelo sin planta, Electrodo de Ion Selectivo, Identificación de modelo dinámico lineal, Predicción basado en modelo.

Resumen
En este trabajo se propone identificar un modelo que capture el comportamiento dinámico del proceso de nitrificación y permita hacer predicciones del valor de las concentraciones de las especies nitrogenadas (NH_4^+, NO_2^- y NO_3^-) en la solución del suelo. La identificación de dicho modelo está basada en técnicas de identificación de sistemas lineales, y emplea datos experimentales para el entrenamiento y validación. El ensayo experimental se desarrolló en suelo sin planta. Se realizaron 4 repeticiones a dos temperaturas diferentes. La extracción de la solución del suelo se realizó usando *Rhizom Soil Moisture Samplers*, que permiten extracción casi instantánea. La solución de suelo se analizó empleando dos sondas basadas en la tecnología ISEs (*Ion-Selective Electrode*): IMACIMUS para NH_4^+; y LAQUAtwin para NO_3^-, cuyos errores tuvieron que ser previamente caracterizados. El modelo obtenido permite hacer predicciones a 10 días de las concentraciones de las tres especies, con un ajuste superior al 70% en NH_4^+ y NO_3^- con respecto a los datos de validación de estas dos especies.

INTRODUCCION

La nitrificación es la oxidación biológica del amonio, resultando en nitrito y posteriormente en nitrato (Sahrawat, 2008). En este trabajo se propone emplear técnicas de identificación de sistemas lineales (Ljung 1995) para estimar los parámetros de un modelo dinámico de nitrificación (McLaren, 1969; Šimůnek et al. 2022). Una vez identificado el modelo, éste podrá ser usado para realizar predicciones de las concentraciones de las concentraciones en un horizonte amplio. Este modelo, junto con el conocimiento de la dinámica espacio-temporal de los nutrientes, y la evapotranspiración de la planta, permitirán diseñar, en una etapa posterior, una fertilización optimizada.

MATERIAL Y MÉTODOS

Material

El ensayo experimental se realizó en laboratorio, en suelo sin planta. Se trata de un suelo con un alto porcentaje de arena y sin apenas contenido orgánico. El suelo se dispuso en bandejas de aluminio de 1 L, que se situaron en cámaras climáticas, manteniendo una temperatura constante durante todo el experimento. En concreto, se realizaron 4 repeticiones a 22 ºC y otras 4 repeticiones a 30 ºC.

Sobre dichas muestras de suelo se aportó agua destilada hasta establecer un contenido

volumétrico o VWC (*Volumetric Water Content*) igual al 30%. En esa agua se disolvió 17,64 mg de NH_4^+ para dar comienzo a la reacción. Finalmente, se colocaron cubiertas de polietileno sobre las bandejas, las cuales fueron perforadas para permitir una adecuada aireación y mantener el nivel de humedad constante (Sabey et al. 1959).

Durante los días en los que la reacción estuvo activa, se tomaron muestras diarias de solución de suelo. Para la extracción se utilizaron *Rhizom Soil Moisture Samplers*. El uso de los extractores Rhizom y jeringas de 60 ml, para realizar el vacío, permitía extraer aproximadamente 15 mL de solución del suelo en 30 minutos. En esas muestras de solución del suelo extraída se realizaron mediciones de concentración de las especies nitrogenadas.

Las mediciones de NH_4^+ se realizaron con el equipo IMACIMUS, de NT-Sensors (España). Las concentraciones de NO_3^- se determinaron con la sonda LAQUAtwin NO3 de Horiba (Japón). Ambas sondas están basadas en tecnología ISE. Dichos equipos fueron periódicamente calibrados empleando las soluciones estándar de calibración de la marca.

Métodos

1. Caracterización del ruido de medida. El objetivo es conocer el ruido de medida que introduce cada una de las sondas, considerándose éste como una señal de error añadida sobre el valor de concentración real. Para caracterizar dicho ruido, se llevó a cabo una evaluación de ambos equipos, estando éstos previamente calibrados.

El ruido que añadía la sonda IMACIMUS se caracterizó en cinco puntos de concentración: 4 $mg.L^{-1}$, 10 $mg.L^{-1}$, 20 $mg.L^{-1}$, 30 $mg.L^{-1}$ y 40 $mg.L^{-1}$ de NH_4^+. El ruido del LAQUAtwin NO3 se caracterizó en diez soluciones, con concentraciones de NO_3^- de 200 $mg.L^{-1}$ a 1100 $mg.L^{-1}$, en incrementos de 100 $mg.L^{-1}$. Se realizaron 15 mediciones en cada punto de concentración y el ruido se describió por su media y desviación estándar.

2. Modelado dinámico del proceso de nitrificación. Algunos autores han descrito el proceso de nitrificación a través de una conexión de tres sistemas dinámicos lineales de primer orden (McLaren, 1969; Šimůnek et al. 2022). Estas ecuaciones modelan la dinámica de la reacción en ausencia de absorción por las plantas:

$$[\dot{NH_4^+}] = -\frac{1}{\tau_{NH_4^+}}[NH_4^+] + \frac{K_1}{\tau_{NH_4^+}} M_{NH_4^+} \quad (1)$$

$$[\dot{NO_2^-}] = \frac{B_{12}}{\tau_{NH_4^+}}[NH_4^+] - \frac{1}{\tau_{NO_2^-}}[NO_2^-] \quad (2)$$

$$[\dot{NO_3^-}] = \frac{B_{23}}{\tau_{NO_2^-}}[NO_2^-] \quad (3)$$

donde […] indica concentración en $mg.L^{-1}$, $M_{NH_4^+}$ indica la cantidad de NH_4^+ agregada en $mg.día^{-1}$, $\tau_{[...]}$ es una constante de tiempo relacionada con la oxidación biológica de cada elemento en días, K_1 es una constante relacionada con la ganancia estática de la primera reacción, y B_{12}, B_{23} son constantes relacionadas con las razones de cambio de masa de amonio a nitrito y de nitrito a nitrato, respectivamente. La primera ecuación modela la nitritación; la segunda modela la nitratación; la última modela la acumulación de nitratos, ya que no hay absorción por parte de las plantas.

Las ecuaciones (1)-(3) representan un sistema dinámico que tiene una entrada conocida ($M_{NH_4^+}$), dos salidas medidas sujetas a ruido ($[NH_4^+]$ y $[NO_2^-]$), y varios parámetros a identificar ($\tau_{NH_4^+}, \tau_{NO_2^-}, K_1, B_{12}, B_{23}$).

3. Identificación del modelo dinámico. El diseño experimental permite recolectar cuaternas de datos de la forma $(t_k, M_{NH_4^+}(t_k), [NH_4^+](t_k), [NO_2^-](t_k))$ que incluyen la señal de entrada y las salidas medidas del sistema dinámico, siendo t_k el instante en que se realiza la medición k. Se

cumple que $t_{k+1} - t_k = 1$ día.

Para cada valor de temperatura, los datos de las cuatro repeticiones se dividen en dos conjuntos. Tres repeticiones se emplean para la identificación del modelo y la cuarta repetición se usa para validación. Se eliminan, de ambos conjuntos, aquellos datos pertenecientes al periodo de incubación (Schuster et al. 1992).

Con los datos del conjunto de entrenamiento se procede a la identificación del modelo de caja gris (1)-(3). Se emplea la metodología de identificación de sistemas lineales descrita en (Ljung 1995) e implementada en Matlab a través de las funciones idgrey, para la definición del modelo de caja gris, y greyest, para la estimación de los parámetros del modelo. Esta última función estima los parámetros minimizando el error entre la respuesta del modelo identificado y la salida medida. La métrica para medir la bondad de la identificación es la raíz cuadrada del error cuadrático medio normalizado o NRMSE:

$$NRMSE = 100\left(1 - \frac{\|y_{medida} - y_{modelo}\|}{\|y_{medida} - \overline{y_{medida}}\|}\right),$$

donde $y_{medida} = \left[[NH_4^+](t_k), [NO_2^-](t_k)\right]$, $\overline{y_{medida}}$ representa el vector de medias de cada variable, e y_{modelo} es el vector de concentraciones estimado por el modelo. Esta métrica varía desde 0% (el ajuste que se conseguiría usando la media como valor predicho) hasta un 100%, que representa un ajuste perfecto (Ljung 1995). Puede encontrarse más información del proceso de identificación en la referencia anterior.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El proceso de caracterización ha otorgado los siguientes valores: el ruido de medida del IMACIMUS puede describirse como gaussiano $\mathcal{N}$(-0.25,1.21) mg.L^{-1}, mientras que el ruido del LAQUAtwin se caracteriza por $\mathcal{N}$(13.05,34.06) mg.L^{-1}.

Esta información, junto con las cuaternas de datos del conjunto de entrenamiento se emplean para identificar los parámetros del modelo. La Figura 1 representa la respuesta del modelo frente a los datos del conjunto de validación, para cada uno de los valores de temperatura. La respuesta del modelo se obtiene en bucle abierto, es decir, empleando las ecuaciones diferenciales a partir de las condiciones iniciales de concentración y asumiendo conocido el aporte de amonio. Por tanto, se realiza una predicción en un horizonte de 14 días (22 ºC) y 10 días (30 ºC).

Con respecto al ajuste del modelo, se obtiene un NRMSE para el amonio de 45.08% (22 ºC) y de 71.94% (30 ºC). Para el nitrato, se obtiene un NRMSE de 82.58% (22 ºC) y de 78.37% (30 ºC).

Del proceso de identificación se pueden extraer diferentes conclusiones. Por una parte, se observa que el ajuste del nitrato es mejor que el del amonio en ambos experimentos. Esto puede deberse a que el modelo lineal es más fiel a la realidad en el caso del nitrato, o a que los datos de nitrato son más fiables.

También se puede concluir que la identificación a 30 ºC ha obtenido mejores resultados en general, aunque se desconoce la razón para ello. En este caso, resulta interesante mostrar el valor que se estima para las constantes de tiempo: $\tau_{NH_4^+} = 5.74$ y $\tau_{NO_2^-} = 0.61$ días. Esto concuerda con lo esperado, pues la reacción de nitratación es más lenta que la de nitritación, según lo descrito en la literatura.

Los valores de las concentraciones de nitrato suben más allá de lo esperado, pues la ratio entre los pesos moleculares de amonio y nitrato no concuerda con los valores observados. Una posible explicación puede deberse a una pérdida de VWC a lo largo del experimento que hace aumentar la concentración de las especies.

Finalmente, con el modelo identificado pueden hacerse también predicciones de la concentración de nitrito, aunque en este caso no pueden validarse con datos experimentales.

Agradecimientos

Este trabajo está parcialmente financiado por la Agencia Estatal de Investigación a través de la ayuda RYC2021-032919-I.

Referencias

Ljung, L. 1995. System identification toolbox: User's guide. Natick, MA, USA: MathWorks Incorporated.

McLaren, A. D. 1969. Steady state studies of nitrification in soil: theoretical considerations. Soil Sci. Soc. of America J., *33*(2):273-276.

Sabey, B. R., Frederick, L. R., and Bartholomew, W. V. 1959. The formation of nitrate from ammonium nitrogen in soils: III Influence of temperature and initial population of nitrifying organisms on the maximum rate and delay period. Soil Sci. Soc. of America J., *23*(6):462-465.

Sahrawat, K. L. (2008). Factors affecting nitrification in soils. *Communications in Soil Sci. and Plant Analysis*, *39*(9-10):1436-1446.

Schuster, M., and Conrad, R. 1992. Metabolism of nitric oxide and nitrous oxide during nitrification and denitrification in soil at different incubation conditions. *FEMS Microbiology Ecology*, *10*(2):133-143.

Šimůnek, J., Šejna, M., Brunetti, G., & van Genuchten, M. T. 2022. The HYDRUS Software Package for Simulating the One-, Two-, and Three-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Porous Media. Technical Manual I. Hydrus D, 1.

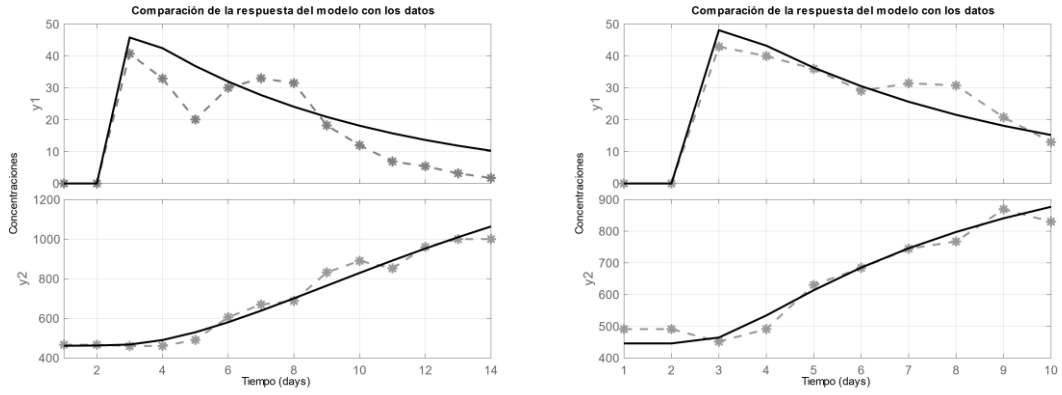


Figura 1. Comparación de la respuesta del modelo (línea continua) con los datos del conjunto de validación (asteriscos sobre línea discontinua) para las concentraciones de amonio (y1) y nitrato (y2)

Sensorización y automatización de jardines verticales mediante tecnologías de bajo coste

F. Lago-Pena[1], A. Paz Feijóo[2], N. López-López[3] y A. López-Fabal[1]

[1]Universidad de Santiago de Compostela. Escuela Politécnica Superior de Ingeniería. Campus universitario. 27002–Lugo, adolfo.lopez@usc.es
[2]Perfect Numbers. Avda. Terra Chá, 83. 27800–Villalba (Lugo)
[3]Estación Agrícola Experimental do Baixo Miño. 36471–Salceda de Caselas (Pontevedra)

Palabras clave: Arduino, App, hidroponía

Resumen

En los jardines verticales el reducido volumen de medio de cultivo los hace muy sensibles a los fallos de funcionamiento y requieren atención continuada, que se facilita con sistemas de telemetría. Se instalaron paneles de jardines verticales de 1.5 m de ancho y 2 m de altura con sistema hidropónico recirculante y dos soportes de cultivo: lana de roca y tela con bolsillos. Se diseñó un sistema de sensorización de parámetros clave para la monitorización, la automatización de algunas funciones y la generación de alarmas a través de una app móvil, ensayando diferentes sensores de bajo coste y localizaciones en el sistema: nivel de solución nutritiva en el depósito, con tres tipos de sensores (distanciómetros por ultrasonidos HC-SR04 y RCWL-1670 y sensor capacitivo XKC-Y25-V); calidad de la solución nutritiva, mediante dos modelos de sensores de total de sólidos disueltos; aplicación del riego, con un caudalímetro YF-S201; humedad del soporte de cultivo a 3 alturas, con tres tipos de sensores (resistivos FC-28 y HD-38 y capacitivo SEN0193 V.2) e iluminación a 3 alturas (SEN0562). Todos ellos se conectaron a un sistema de automatización basado en una placa Mega 2560 de Arduino con toma de datos en continuo y envío vía modem cada 5 minutos; y se programó una app móvil para la visualización y la configuración de parámetros. En 5 meses de seguimiento algunos sensores sufrieron corrosión por la instalación en ambiente húmedo, que acortó su vida útil. El sistema de sensorización resultó útil para la monitorización y visualización de los parámetros y la generación de alarmas de mantenimiento. Sin embargo la imprecisión y/o inestabilidad en las lecturas de los sensores no permite recomendar la automatización de funciones importantes en base a su lectura, salvo el encendido de la luz de apoyo en jardines de interior.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de jardinería vertical se basan en la fijación de plantas a paredes interiores o exteriores de edificios. Aumentan la superficie vegetada en zonas edificadas al permitir la implantación de una alta densidad y diversidad vegetativa en áreas verticales (Francis y Rayner, 2014) y con mínima ocupación de espacio (Virtudes y Manso, 2011). Constituyen una vía efectiva para mejorar las condiciones ambientales de las áreas urbanas (Perini, 2013) y contribuyendo a la biodiversidad urbana (Francis y Lorimer, 2011).

Los jardines verticales requieren riego y fertilización regulares para estar sanos y tener una larga vida útil (Susorova, 2015). El pequeño volumen de medio de cultivo y los gradientes verticales de humedad que se generan los hace muy sensibles a la falta de riego, que en poco tiempo puede resultar fatal para amplias zonas del panel vegetado. Los sistemas hidropónicos recirculantes son más eficientes en el uso del agua y los nutrientes, pero también son sensibles a

la degradación de la composición de la solución nutritiva.

Por esto resulta muy conveniente el uso de sensores para el monitoreo regular de los jardines verticales (Manso y Castro-Gomes, 2015), aunque el coste puede resultar limitante en jardines pequeños, mientras que en los más grandes situados en espacios públicos el robo y el vandalismo. Los sensores de bajo coste pueden ser útiles en esta situación, aunque suelen adolecer de falta de precisión y reproductividad de las medidas y de una corta vida útil, por lo que se requiere una cuidada selección y evaluación.

El objetivo de este trabajo fue diseñar y testar un sistema de sensorización de bajo coste para monitorizar el funcionamiento de jardines verticales, generando alarmas de fallos de funcionamiento y necesidad de operaciones de mantenimiento, así como automatizando de algunas funciones. El principal campo de aplicación sería el mercado de jardines modulares domésticos, aunque debería servir para aplicaciones profesionales.

MATERIAL Y MÉTODOS

Se montaron paneles para jardines verticales de 1.5 m de ancho y 2 m de altura de dos sistemas hidropónicos diferentes con tres repeticiones de cada uno. Un sistema consistió en dos capas de fieltro (Paisajismo Urbano®) formando bolsillos "in situ" por grapado. El segundo constó de una lámina de lana de roca (Urbanscape®) de 4 cm de espesor, fijada con soportes y reforzada con malla plástica. Se instalaron en un invernadero de vidrio tipo capilla en el campus universitario de Lugo, con orientación E. En ellos se establecieron diez especies/cultivares a partir de plántulas enraizadas a un marco de 15 x 15 cm, lo que resultó en 13 filas y 10 columnas por panel. Cada panel tuvo su propio sistema hidropónico recirculante cerrado independiente, consistente en un depósito de 210 L, una bomba sumergible (RS-7803 de 6000 L h^{-1} caudal máximo y 3.5 m de altura máxima) y distribución de agua por tubería de PE de 16 mm de diámetro, de modo que cada panel se regaba sólo en su parte superior mediante emisores de microtubo de PE de 3x1mm pinchados cada 5 cm. El drenaje se recogió mediante una canaleta de PVC situada en la parte inferior del panel. La solución nutritiva se fabricó un abono NPK (Mg-S) 15-5-30 (2-10) con micronutrientes a una concentración de 5 g L^{-1}, que resultó en un incremento de conductividad eléctrica (CE) de 0.7 dS m^{-1} y una CE total de aproximadamente 0.85 dS m^{-1}. Según las condiciones ambientales se aplicaron entre 2 y 5 riegos diarios de 15 min de duración, suficiente para generar drenaje en ambos sistemas. Se hicieron 3 aplicaciones foliares de un abono de Ca.

Se diseñó un sistema de sensorización de parámetros clave para la monitorización, la generación de alarmas y la automatización de algunas funciones a través de una app móvil, ensayando diferentes sensores de bajo coste y localizaciones en el sistema:

Aplicación de riegos programados, detectada con un caudalímetro YF-S201 para dar sólo señal de existencia o no de caudal, que se asoció a una alarma de falta de riego.

Volumen de solución nutritiva en el depósito: controlado con los distanciómetros por ultrasonidos HC-SR04 y RCWL-1670 colocados encima del bidón; y con el sensor capacitivo XKC-Y25-V, colocado lateralmente en el exterior del bidón. La medida se asoció a una alarma de volumen escaso para el relleno de la solución.

Calidad de la solución nutritiva: seguida mediante dos modelos de sensores de TDS (Total de Sólidos Disueltos), el KS0429 de Keyestudio y el Gravity Analog TDS

Humedad del soporte de cultivo, medida a 3 alturas con tres modelos de sensores, los resistivos FC-28 y HD-38 y el capacitivo SEN0193 V.2.

Iluminación: medida a 3 alturas con un sensor SEN0562, de cara a automatizar el encendido de una luz auxiliar cuando la iluminación natural fuese insuficiente.

Los sensores de cada panel se conectaron a una caja de monitorización basado en un microcontrolador Mega 2560 Rev 3 de Arduino con un módulo de comunicación por Wi-Fi. La

gran cantidad de sensores obligó a disponer de una caja auxiliar de conexiones dotada de una placa diseñada al efecto; aumentar el número de entradas analógicas para poder conectar todos los sensores de humedad y TDS; y utilizar un expansor I2C para poder conectar los 3 sensores de luz. Se programó para la medición en continuo y envío de datos vía modem cada 5 minutos durante 5 meses que se hizo el seguimiento. Además, se programó una app móvil para la visualización y la configuración de parámetros.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La falta de riego es el fallo más grave en un jardín vertical, por lo que comprobar que se aplican los riegos programados y generar una alarma en caso de falta fue la función más importante del sistema de sensorización. El caudalímetro YF-S201 cumplió correctamente este cometido durante toda la duración del ensayo, facilitado por no requerir una medida precisa del caudal y porque durante el riego de 15 minutos se enviaron al menos 2 señales. Además, un ocasional mal funcionamiento del sensor daría lugar a una falsa alarma, que resulta menos grave de lo que sería la falta de alarma.

El control de la reserva de solución nutritiva en el depósito y el aviso de necesidad de relleno es otra función importante en los sistemas hidropónicos autónomos. Los distanciómetros de ultrasonidos ofrecieron una precisión suficiente para ese uso. En la calibración se obtuvo una regresión lineal de $r^2>0,99$ y con pendiente según la cual su resolución de 1 cm en la medición correspondió a 5,5 L en el depósito. A pesar de cierta oscilación de sus mediciones describió bien los ciclos de consumo y rellenado de los depósitos. Sin embargo el modelo HC-SR04 sufrió corrosión en los elementos sensibles (emisor y receptor) por la condensación y su vida útil no superó los 3 meses. El modelo RCWL-1670, especialmente protegido contra la humedad, mantuvo su medición todo el ensayo. Por su parte el sensor capacitivo de nivel XKC-Y25-V indica la presencia o no de líquido a través de la pared del depósito, de modo que se colocó a la altura en la que se debería realizar el rellenado. Aunque su sensibilidad es ajustable mediante un potenciómetro que incluye, todas las unidades testadas dieron lugar a una cierta cantidad de señales erróneas, generando falsas alarmas que desaconsejan su uso.

La calidad de la solución nutritiva es un parámetro importante en los sistemas recirculantes cerrados. Los dos modelos de sensores de TDS testados para ello mostraron una respuesta similar, con bastante oscilación en sus medidas. La sucesión de medidas tomadas en periodos cortos, de 2-3 h, mostraron un coeficiente de variación (CV) que típicamente rondó el 4 %, con una oscilación máxima respecto del valor medio de ±15%; pero en algunas unidades el CV llegó a ser superior al 10 % con oscilaciones respecto a la media de ±35%. Adicionalmente no se compensó el efecto de la temperatura, ya que ni los propios sensores incorporaron esa función ni se hizo aparte, por lo que se observó una oscilación día/noche, según la amplitud térmica y es de esperar una cierta deriva estacional. Por esto el control de este parámetro no fue suficientemente satisfactorio.

La humedad del soporte de cultivo puede ser utilizada para detectar un secado excesivo de alguna zona del panel falta de riego, bien por un fallo del sistema, ya monitorizado previamente, o por una incorrecta programación. Se consideró un parámetro más secundario en el sistema de sensorización. Los sensores de humedad, dos modelos resistivos y uno capacitivo, fueron calibrados en los 2 soportes de cultivo humedecidos con la solución nutritiva, pues las características del medio pueden afectar a su medición (Santo et al. 2023). Se obtuvieron ajustes razonables ($r^2>0,96$), mejores en la tela que en la lana, con relaciones no lineales como era previsible (Nagahage et al, 2019). Tras su instalación todos describieron bien los ciclos de humectación/secado debidos a los riegos. Sin embargo, todos ellos adolecieron de una corta vida útil. Las 18 unidades instaladas del FC-28 habían dejado de medir a los 3 meses y sus elementos sensibles prácticamente habían desaparecido. Este modelo es sensible a la corrosión, sobre todo si

se mantiene continuamente alimentado y en condiciones húmedas y (Simioni et al. 2024) que fueron las condiciones del ensayo. Sin embargo también los otros modelos, especialmente indicados para resistir la corrosión, sufrieron fallos por corrosión y/o degradación del aislamiento, de modo que al final del ensayo de las 18 unidades instaladas de cada uno sólo 8 de los resistivos HD-38 y 5 de los capacitivos seguían midiendo correctamente.

Los luxómetros ofrecieron mediciones reproducibles a lo largo del todo el ensayo que permitieron el correcto seguimiento de la iluminación en los diferentes niveles del panel. El crecimiento de la vegetación sombreó los situados más abajo, por lo que el realmente útil para controla la necesidad de luz artificial es el situado en la parte alta.

Agradecimientos

Este estudio ha sido financiado por A Man de Prado S.L.U. y la Xunta de Galicia a través del proyecto "Jardín vertical con planta viva, montable y monitorizado mediante APP móvil" (FEADER 2022/010A).

Referencias

Francis, R. and, Lorimer, J. 2011. Urban reconciliation ecology: The potential of living roofs and walls. J Environ Manag 92:1429–37.

Francis, J. and Rayner, J. 2014. Growing Green Guide: A guide to green roofs, walls and facades in Melbourne and Victoria, Australia. Department of Environment and Primary Industries, State of Victoria (Australia). 131 pp

Manso, M. and Castro-Gomes, J. 2015. Green wall systems: A review of their characteristics. Renew. Sust. Energ. Rev. 41: 863–871.

Nagahage, E. A. A. D., Nagahage, I. S. P., & Fujino, T. (2019). Calibration and validation of a low-cost capacitive moisture sensor to integrate the automated soil moisture monitoring system. Agriculture 9(7): 141.

Perini, K.; Rosasco, P. 2013. Cost–benefit analysis for green façades and living wall systems. Build. Environ. 70: 110–121.

Santos, F. F. L. dos; Tavares, L. C. M.; Araújo, G. de M.; Santos, L. de L. C. dos; Nogueira, C. P. R. A.; Bachini, M. S. and Teixeira, M. A. 2023. Confidence analysis and calibration of a FC-28 soil moisture sensor mounted on a microcontroller platform. Nativa, 9(1): 123–128.

Simioni, G. H.; Garcia, A. F. C.; da Fonseca, Z. P.; Falate, R. 2024. Avaliação de sensores de umidade de solo para sistemas de irrigação. Contribuciones a las Ciencias Sociales, 17(1), 961–974

Susorova, I. 2015. Green facades and living walls: Vertical vegetation as a construction material to reduce building cooling loads. In: Pacheco-Torgal, F., Labrincha, J.A., Cabeza, L.F., Granqvist, C.G. (eds) Eco-Efficient Materials for Mitigating Building Cooling Needs, 1st ed. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, pp. 127–153.

Virtudes A, Manso M. 2011 Green façades: as a feature in urban design. ICEUBI 2011. In: International Conference on Engineering. University of Beira Interior, Portugal.

Cubiertas hortícolas para la protección del suelo

Laura Garcia-España1, Josep Llinares2, Maria Desamparados Soriano3*

1Departamento de Biología Vegetal, Universitat de Valencia, Andrés Estellés s/n, 46100, Burjasot, València
2 Departamento de Química, Universitat Politècnica de València. Parininfo, 46730, Gandia, Valencia
3 Departamento de Producción Vegetal, Universitat Politècnica de València. Cami de Vera s/n 46023, Valencia

***Autor para correspondencia:** asoriano@prv.upv.es

Palabras Clave: Suelo, cubiertas vegetales, escorrentía, concentración de sedimentos.

Resumen.
Se estudia el efecto protector sobre la erosión del suelo y la formación de agregados de ciertas cubiertas vegetales dedicados a agricultura intensiva.
Durante tiempos similares de permanencia de dichas cubiertas se estudia los efectos sobre el suelo de la lluvia simulada bajo cubiertas vegetales de leguminosas (*Pisum sativum, Vicia faba*), plantas crucíferas y arvenses, utilizando un simulador portátil de campo que trabaja en unas condiciones determinadas de intensidad de la lluvia y valorando variables como infiltración, escorrentía, concentración de sedimentos.
Los valores de la infiltración constante determinada mediante simulación de lluvia en campo, varía entre 24,33 mm/h y 27,24 mm/h, muy superior al suelo desnudo. La concentración de sedimentos en los suelos de las parcelas, bajo las diferentes cubiertas, varía con valores de concentración de sedimento determinados mediante simulación de lluvia en campo, oscilando entre los 0,16 a 1,67 kg m^2h^{-1} valores en suelos bajo leguminosas y aquellos con *Trifolium.*
Ciertos parámetros valorados en los suelos como el contenido en materia orgánica y las tasas de respiración, influyen de forma importante en la respuesta a la erosión del suelo.

INTRODUCCIÓN

La mayoría de las propiedades físicas, biológicas y químicas pueden ser alteradas por los cambios en el uso del suelo. La erosión puede ser definida como un proceso de desprendimiento y arrastre acelerado de las partículas de suelo causado por el agua y el viento (Suárez, 2021).

La acción humana suele incrementar este efecto al llevar una mala práctica del laboreo o al mantener el suelo desnudo sin cubierta vegetal.

El papel de las cubiertas vegetales es decisivo en el suelo, factores como el tipo de cobertura y el porcentaje de la misma influyen de forma importante en el deterioro de la estructura. Favoreciendo o disminuyendo la pérdida de suelo por erosión.

Las cubiertas vegetales son un modo de gestión de suelos cultivados. Las cubiertas vegetales sembradas con especies de floración en inverno y primavera como *Lobularia marítima, Calendula officinalis y Onobrychis viciifolia*, etc aportan complejidad a los agroecosistemas y su gestión

adecuada genera numerosos servicios.

Los objetivos de este trabajo consisten en comparar el efecto de distintas cubiertas vegetales principalmente de leguminosas sobre la pérdida de suelos por erosión en parcelas de cultivo utilizando un simulador de lluvia de campo (Calvo et al., 1984).

MATERIAL Y MÉTODOS

Se caracteriza el suelo de la zona de estudio determinando la clase textural de los horizontes del suelo (método de la pipeta de Robinson), materia orgánica, pH y CE, carbonatos, CIC (MAPA, 1988).

El simulador de lluvia de campo utilizado (Figura 1), consta de una estructura de acero inoxidable con patas extensibles y en su parte superior un equipo hidráulico de aspersión situados 2 m de altura, con un caudal de 55 l/h y una superficie de la parcela de 0,24 m² y posee una boquilla para recogida del agua y sedimentos. La simulación de lluvia tiene una duración de 45 minutos. Se toman muestras cada 10 minutos con un tiempo de recogida de 60 segundos.

Parcelas utilizadas. La parcela 1 es la parcela control, las parcelas 2 y 6, se sembraron de plantas arvenses, la parcela 3 se sembró de semillas de *Trifolium Repens,* las parcelas 4 y 5 se siembran con habas (*Vicia faba*) y guisantes (*Pisum sativum)*..

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El suelo de las parcelas presenta una textura franco arcillosa con un 34% de arena, 27% de limo y 39% de arcilla. El pH presenta valores ligeramente alcalinos de 7,9, y valores de conductividad eléctrica de 0,187 dS/m.

Las cubiertas vegetales protegen el suelo y pueden aportar elementos beneficiosos para el cultivo como el nitrógeno aportado por varias leguminosas y gramíneas asociadas. Las especies de leguminosas difieren en su capacidad para fijar Nitrógeno y C en la biomasa a nivel de tallos y raíces (Campillo et al., 2003), a partir de la descomposición de sus residuos (Danso et al., 1993).

Los valores de respiración del suelo oscilan de 14 a 3 mg O_2/gss dependiendo de la cubierta vegetal utilizada, encontrando los valores mas elevados en los suelos con cubiertas de *Trifolium,* junto con *Vicia faba* y plantas arvenses y los más bajos en los suelos desprovistos de vegetación.

La materia orgánica varia de 0,5 % en el suelo desnudo a 2,2% en el suelo con cubiertas de plantas de habas y arvenses (Figura 2. A), indicando diferencias importantes respecto al aporte orgánico de estas plantas sobre el suelo.

Los valores de infiltración y escorrentía obtenidos en los suelos de las parcelas difieren enormemente en función del tipo de vegetación superficial. En todos los casos los suelos que presentan valores más elevados de escorrentía e inferiores de infiltración corresponden a los suelos desnudos sin cubiertas vegetales (Figura 2. B).

En el resto de parcelas los valores de escorrentía e infiltración se muestran bastante similares entre sí, con valores ligeramente más elevados en los suelos donde se desarrollan las plantas arvenses y la *Vicia faba.* Los valores obtenidos de la concentración de sedimentos muestran las mismas diferencias mencionadas respecto a los otros dos parámetros, con valores elevados para los suelos desprovistos de vegetación frente a los que presentan cubiertas vegetales. Los valores oscilan de 1,6 a 0,2 Kg/m^2h, correspondiendo en este caso los valores más bajos a suelos cubiertos por especies de *Trifolium,* mostrando una mejora en la estabilidad de la estructura bajo esta especie.

Los resultados del estudio estadístico realizado con el paquete SPSS muestran correlaciones interesantes en la matriz de correlación entre los contenidos de materia orgánica y los valores de infiltración de los suelos. Por otra parte, el análisis del cluster agrupa a las muestras con cubiertas de guisantes, habas y suelo desnudo separándolas del resto de cubiertas, indicando un grupo diferente más sensible a la pérdida de suelos que el de las cubiertas de plantas arvenses y *Trifolium*, indicando un papel inferior de protección de dichas cubiertas con respecto al resto.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos de las variables analizadas en el suelo de las parcelas estudiadas sobre distintas cubiertas vegetales, indican que el suelo bajo las cubiertas de *Trifolium* mejoran mayor número de parámetros del suelo, como son los valores de la respiración del suelo, contenidos de materia orgánica y concentración de sedimentos, no existiendo diferencias notables respecto a parámetros como los valores de infiltración y escorrentía en las distintas cubiertas a excepción de los suelos desnudos. No obstante, se observa, que cualquier tipo de cubierta mejora notablemente la totalidad de las propiedades estudiadas del suelo.

Referencias

Calvo, A., Gisbert, B., Palau, E., y Romero, M. 1988. Un simulador de lluvia portátil de fácil construcción. En M. SALA y F. GALLART (eds.) Métodos y técnicas para la medición de procesos geomorfológicos, S. E. G. Monografía 1, pp. 6-15.

Campillo, R., S. Urquiaga, I. Pino, y A. Montenegro. 2003. Estimación de la fijación biológica de nitrógeno en leguminosas forrajeras mediante la metodología del 15N. Agric. Téc. (Chile) 63:169-179.

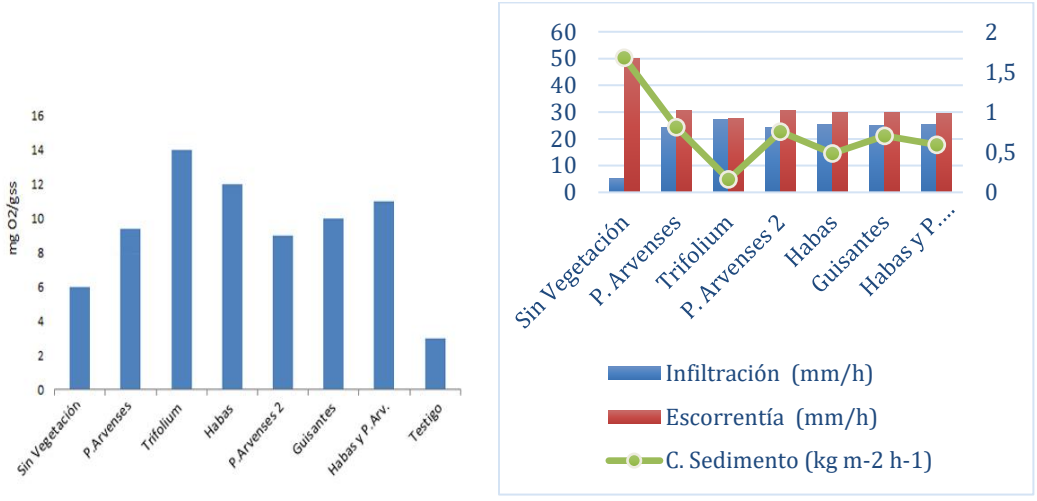
Danso, S., F. Palmason, y G. Hardarson. 1993. Is nitrogen transferred between field crops? Examining the question through a sweet-blue lupin (Lupinus anngustifolius L.)-oats (Avena sativa) intercrop. Soil Biol. Biochem. 25:1135-1137.

MAPA. 1988. Métodos Oficiales de Análisis. Vol. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid. 132 p.

Súarez, J. 2021. Control de erosión en zonas tropicales. Universidad Industrial de Santander. Editorial IUS. 219 p.

Control	Arvenses	*Trifolium repens*	*Vicia faba*	Simulador de lluvia
				

Figura 1. Parcelas y simulador de lluvia



A B

Figura 2. A. Valores de mg O_2/gss de las parcelas de campo utilizadas para la experiencia. B. Valores de infiltración, escorrentía y concentración de sedimentos obtenidos en la prueba de simulación de lluvia en las distintas parcelas.

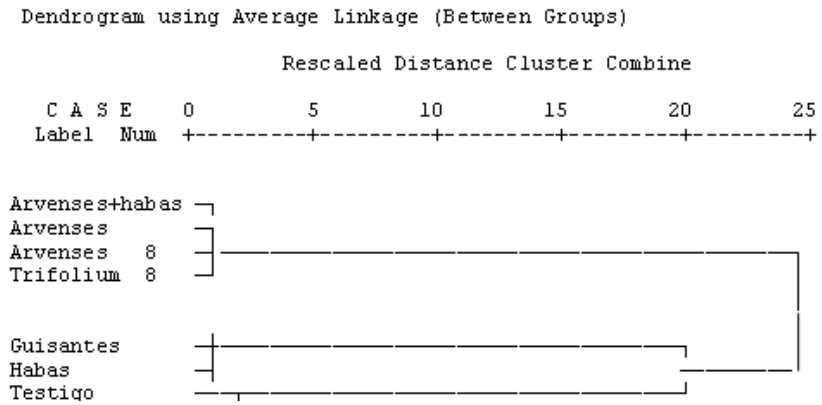


Figura 3. Dendograma de las parcelas de estudio

Optimizando la Extracción de Aceite de Residuos de Café Usados: Una Evaluación del Ciclo de Vida de la Toxicidad Humana y los Beneficios de la Economía Circular

Malek Miladi[1*], Rania Remmani[1], Antonio Ruiz-Canales[1], Teresa M. Mata[2*], António A. Martins[3*]

[1] Departamento de Ingeniería, Universidad Miguel Hernández de Elche
[2] LAETA - Associated Laboratory for Energy and Aeronautics, INEGI - Institute of Science and Innovation in Mechanical and Industrial Engineering, R. Dr. Roberto Frias 400, 4200-465 Porto, Portugal
[3] LEPABE - Laboratory for Process Engineering, Environment, Biotechnology and Energy / ALICE - Associate Laboratory in Chemical Engineering, University of Porto - Faculty of Engineering (FEUP), Porto, Portugal

***Corresponding authors:** malek.miladi@goumh.umh.es, tmata@inegi.up.pt, aamartins@fe.up.pt

Palabras clave: Residuos de Café Usados, Extracción Asistida por Ultrasonido, Evaluación del Ciclo de Vida, Toxicidad Humana, Economía Circular..

Resumen: El café es una de las bebidas más populares en todo el mundo, lo que genera grandes cantidades de posos de café usados (SCG), que a menudo se descartan como desechos, lo que contribuye a la contaminación ambiental. Sin embargo, los SCG son ricos en aceites, antioxidantes y otros compuestos valiosos que se pueden aprovechar para aplicaciones industriales, incluidos biocombustibles, cosméticos y aditivos alimentarios. Este estudio explora un enfoque novedoso para valorizar los SCG a través de la extracción optimizada de aceite, abordando preocupaciones tanto ambientales como de salud. Utilizando un diseño rotatorio compuesto central (CCRD), se optimiza la extracción asistida por ultrasonido, integrando consideraciones ambientales. Esta metodología integra el Diseño de Experimentos (DOE) con la evaluación del ciclo de vida (LCA) para evaluar los impactos ambientales del proceso, centrándose específicamente en la toxicidad carcinogénica humana (HCT) y la toxicidad no carcinogénica (HNT), que se encontró que oscilaban entre 513 y 14.025 kg de 1,4-DCB eq y 28.019 a 158.000 kg de 1,4-DCB eq, respectivamente. Se empleó la metodología ReCiPe 2016 Midpoint (E) V1.02 para evaluar los posibles impactos ambientales, utilizando el software SimaPro V8.5.2 LCA. ANOVA reveló que la relación líquido-sólido influye significativamente en los niveles de toxicidad, con parámetros de extracción específicos identificados para minimizar los impactos ambientales y de salud mientras se maximiza el rendimiento del aceite. La investigación contribuye al creciente campo de las prácticas de economía circular al destacar el potencial de los SCG como un recurso valioso. Demuestra cómo la optimización de los procesos industriales puede conducir a estrategias de gestión de residuos más sostenibles y conscientes de la salud, transformando los residuos en recursos útiles. La integración de las metodologías DOE y LCA proporciona un marco sólido para futuros estudios que apuntan a equilibrar la eficiencia con la sostenibilidad ambiental en varias aplicaciones industriales. En resumen, este estudio presenta un enfoque innovador y holístico para la valorización de SCG, que ofrece implicaciones significativas para las industrias y la gestión ambiental. El proceso de extracción optimizado no solo mejora la eficiencia de los recursos, sino que también respalda objetivos de sostenibilidad más amplios, promoviendo prácticas de economía circular.

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, se consumen aproximadamente dos mil millones de tazas de café al día, lo que destaca su importante impacto socioeconómico y cultural (Zhao et al., 2024). Como el segundo producto más valioso después del petróleo, el café desempeña un papel crucial en el comercio internacional. Su popularidad no solo se debe a sus efectos fisiológicos, como el aumento de la

alerta provocado por la cafeína, sino también a su rica experiencia sensorial (Cappelletti et al., 2015). Además, el café tiene una importancia cultural significativa, funcionando como un conector social y un símbolo de consumo ético y refinado, especialmente con el auge de la cultura del café de especialidad.

Sin embargo, este enorme consumo genera un volumen considerable de residuos, en particular los residuos de la preparación del café, conocidos como residuos de café usados (SCGs, por sus siglas en inglés) y otros subproductos de producción. Los SCGs suelen eliminarse mediante incineración o disposición en vertederos, lo que conduce a un desperdicio de recursos y contaminación ambiental (Al-Wabel et al., 2022). Estos métodos de eliminación convencionales liberan metano, un gas de efecto invernadero altamente potente, debido a la descomposición anaeróbica de materia orgánica en vertederos (IPCC, 2013). A escala global, se desechan aproximadamente 42,000 toneladas de SCGs diariamente, lo que equivale a 15.33 millones de toneladas al año (Kamil et al., 2019), agravando aún más las preocupaciones ambientales.

Para mitigar los impactos ambientales adversos de las prácticas tradicionales de gestión de residuos, muchos países han adoptado y promovido alternativas como el reciclaje, la minimización de residuos y la reutilización. Estas iniciativas cuentan con el apoyo de extensas investigaciones académicas, políticas gubernamentales y esfuerzos internacionales dirigidos a avanzar hacia sistemas sostenibles de gestión de residuos. Un enfoque clave es la utilización innovadora y eficiente de los subproductos del café, en particular los SCGs. Para un futuro verdaderamente sostenible, es esencial el desarrollo rápido de sistemas de biorrefinería a gran escala que transformen los SCGs en recursos valiosos como biocombustibles, antioxidantes y bioplásticos, maximizando así su potencial (Mata et al., 2018). Estos enfoques integrados no solo reducen los daños ambientales, sino que también valorizan los compuestos orgánicos de los SCGs, como proteínas y fibras, contribuyendo a una industria cafetera más sostenible y ecológica.

La transformación eficiente de los SCGs dentro de un sistema de biorrefinería depende de la optimización de procesos operativos clave, lo que requiere un análisis exhaustivo de sus impactos técnicos, económicos y ambientales (Pérez-Almada et al., 2023). La optimización de procesos en este contexto generalmente utiliza metodologías de Diseño de Experimentos (DOE, por sus siglas en inglés), centrándose en parámetros como la eficiencia, el rendimiento y la rentabilidad. Sin embargo, estos enfoques a menudo descuidan la integración de consideraciones ambientales (Miladi et al., 2024). Para garantizar un éxito sostenible, es necesario un enfoque más holístico que equilibre la eficiencia del proceso con objetivos más amplios, como la minimización del impacto ambiental y la maximización de la recuperación de recursos. Este trabajo aborda estos desafíos evaluando las preocupaciones ambientales relacionadas con la salud humana en la extracción optimizada de un componente clave de los residuos de café: el aceite. La metodología integra de manera única el DOE con la Evaluación del Ciclo de Vida (LCA, por sus siglas en inglés), centrándose en los impactos toxicológicos humanos bajo diversas condiciones optimizadas. Este enfoque integral es crucial para avanzar en los resultados económicos y ecológicos en la valorización de los SCGs dentro de los sistemas de biorrefinería.

MATERIALES Y MÉTODOS

1. Definición de objetivos y alcance del estudio de ACV:

Objetivo del estudio: Este estudio emplea una evaluación del ciclo de vida (ECV) para evaluar los impactos ambientales de la extracción de aceite de los posos de café usados (SCG) mediante

la extracción con baño ultrasónico en distintas condiciones de funcionamiento. El enfoque se centra en la toxicidad carcinogénica humana (HCT) y la toxicidad no carcinogénica (HNT), siguiendo las normas ISO (ISO 14040, 2006; ISO 14044, 2006).

Unidad Funcional: La unidad funcional (UF) elegida para este estudio es 1 g de aceite de posos de café usados. La UF es consistente con las que se utilizan habitualmente en estudios de ACV similares y garantiza la comparabilidad. El estudio sigue un enfoque de ACV atributivo, vinculando directamente los impactos ambientales con la unidad funcional definida.

Alcance y supuestos: Se realizó un análisis "de la cuna a la puerta", que abarcó las etapas del ciclo de vida de la producción de material (disolvente), el consumo de energía durante el proceso y la fase de extracción. El DOE realizado en este estudio se centró específicamente en la fase de extracción de petróleo (Tabla 1), asegurando procedimientos consistentes antes y después de la extracción en todos los experimentos (Miladi et al., 2021). Este enfoque permite atribuir directamente cualquier variación observada en los impactos ambientales relacionados con HCT y HNT a cambios en los parámetros operativos del proceso de extracción de petróleo. Otras etapas del proceso contribuyen de manera uniforme al impacto ambiental general del sistema, permaneciendo constante independientemente de los parámetros de extracción.

2. Análisis del inventario del ciclo de vida: fuentes de datos y supuestos principales:

El inventario del ciclo de vida se desarrolló utilizando datos primarios de experimentos de laboratorio, incluidos el consumo de solvente y agua, así como el uso de energía del equipo, como se detalla en Miladi et al. (2021). Cuando fue necesario, estos datos experimentales se complementaron con información de la base de datos ecoinvent v3.5, en particular para procesos de fondo, producción de materias primas y generación de energía.

El DOE varió sistemáticamente tres factores: tiempo de extracción (ET), temperatura (T) y relación líquido/sólido (LS) para identificar las condiciones óptimas de extracción. Se empleó un diseño giratorio compuesto central (CCRD), lo que dio como resultado 17 experimentos.

3. Evaluación del impacto en la salud: métodos y categorías de impacto:

Se empleó la metodología ReCiPe 2016 Midpoint (E) v1.02 para evaluar los posibles impactos ambientales, específicamente HCT y HNT, utilizando el software de análisis de ciclo de vida SimaPro V8.5.2. Este enfoque permite una evaluación cuantitativa de los posibles impactos en la salud humana relacionados con el proceso de extracción, lo que respalda la identificación de parámetros operativos óptimos que minimicen los riesgos para la salud y mantengan la eficiencia del proceso.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este estudio, se evaluaron los valores de HCT y HNT, que revelaron valores de HCT que oscilaban entre 513 y 14 025 kg de equivalentes de 1,4-diclorobenceno (1,4-DCB eq) y valores de HNT que oscilaban entre 28 019 y 158 000 kg de 1,4-DCB eq. Estos valores reflejan los posibles riesgos para la salud humana asociados con la exposición a sustancias nocivas durante todo el proceso de extracción de petróleo. La amplia gama de resultados destaca una variabilidad sustancial en los impactos ambientales en diferentes parámetros operativos, lo que enfatiza la necesidad de optimizar el proceso de extracción para reducir los riesgos toxicológicos de manera efectiva.

La aplicación del Criterio de Información de Akaike (AIC) confirmó que un modelo polinomial

simple que incorpora interacciones lineales y un término cuadrático de la relación líquido-sólido es un ajuste confiable para los datos experimentales, capturando de manera efectiva la complejidad del sistema y evitando el sobreajuste. Mediante un análisis de varianza (ANOVA), se reveló que la relación líquido-sólido es un parámetro clave que influye en los niveles de toxicidad, lo que ofrece información sobre cómo los entornos de extracción específicos afectan tanto a los resultados ambientales como a los relacionados con la salud. Este análisis estadístico permitió la identificación de parámetros de extracción que equilibran la seguridad ambiental con la maximización del rendimiento de aceite, una consideración importante en la optimización de procesos sostenibles.

Este estudio hace una contribución significativa a las prácticas de economía circular al destacar el potencial de los posos de café usados (SCG) como un recurso renovable viable. Al centrarse en la valorización de los SCG, demuestra cómo los procesos de extracción de refinación no solo pueden reducir los desechos, sino también generar subproductos valiosos, ofreciendo incentivos económicos junto con beneficios ambientales. La metodología establecida aquí sirve como un marco práctico para las industrias que buscan convertir los desechos orgánicos, como los SCG, en recursos utilizables al mismo tiempo que mantienen estrictos estándares ambientales y de salud.

Además, este enfoque es fundamental para promover prácticas industriales sostenibles al proporcionar un modelo escalable para la valorización de los desechos. Al mostrar cómo un residuo común puede transformarse en un producto valioso, esta investigación proporciona un modelo para iniciativas similares en varios sectores, reduciendo potencialmente la dependencia de las materias primas y disminuyendo la huella ambiental general de los procesos de producción. Esta metodología integrada refuerza la creciente importancia de la gestión sostenible de los residuos para apoyar la transición a una economía circular, donde se minimizan los residuos y se maximiza la eficiencia de los recursos en todos los panoramas industriales.

BIBLIOGRAFÍA

Zhao, S., Chan, K. L., Sheng, N., Song, Q., & Li, J. (2024). Reducing carbon footprint of typical coffee consumption from the whole lifecycle viewpoint. Environmental Impact Assessment Review, 106. https://doi.org/10.1016/j.eiar.2024.107476.

Cappelletti, S., Daria, P., Sani, G., & Aromatario, M. (2014). Caffeine: Cognitive and Physical Performance Enhancer or Psychoactive Drug? Current Neuropharmacology, 13(1), 71–88.

Al-Wabel, M. I., Ahmad, M., Rasheed, H., Rafique, M. I., Ahmad, J., & Usman, A. R. A. (2022). Environmental Issues Due to Open Dumping and Landfilling (pp. 65–93). https://doi.org/10.1007/978-3-031-07785-2_4.

IPCC Working Group 1, I., Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S. K., … Midgley, P. M. (2013). IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, AR5, 1535.

Kamil, M.; Ramadan, K.M.; Olabi, A.G.; Shanableh, A.; Ghenai, C.; Al Naqbi, A.K.; Awad, O.I.; Ma, X. Comprehensive evaluation of the life cycle of liquid and solid fuels derived from recycled coffee waste. Resources, Conservation and Recycling 2019, 150, 104446. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104446

Mata, T. M., Martins, A. A., & Caetano, N. S. (2018, January 1). Bio-refinery approach for spent coffee grounds valorization. Bioresource Technology. Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.106.

Pérez-Almada, D., Galán-Martín, Á., Contreras, M. del M., & Castro, E. (2023, June 12). Integrated techno-economic and environmental assessment of biorefineries: review and future

research directions. Sustainable Energy and Fuels. Royal Society of Chemistry. https://doi.org/10.1039/d3se00405h.
Miladi, M., Mata, T.M., Selva, S., Ruiz-Canales, A., Martins, A.A. (2024). Carbon Footprint of Oil Extraction from Spent Coffee Grounds Using Ultrasound-Assisted Extraction. In: Caetano, N.S. (eds) Sustainable Development with Renewable Energy. ICEER 2023. Environmental Science and Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-54394-4_34.
International Organization for Standardization. (2006). ISO 14040:2006 Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework.
International Organization for Standardization. (2006). ISO 14044:2006 Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines.
Miladi, M., Remmani, R., Ruiz-Ruiz, F., & Ruiz-Canales, A. (2021). Optimization of ultrasound-assisted extraction of spent coffee grounds using response surface methodology. Processes, 9(8), 1376.

Tablas y Figuras:

Tabla 1. Condiciones experimentales onsideradas en CCRD

Nº ensayo	**T (°C)**	**ET (min)**	**LS (mL g^{-1})**
1	42.5	52.2	12.91
2	42.5	52.2	24.82
3	32.67	90	20
4	26	52.2	12.91
5	52.32	15	20
6	52.32	90	5.82
7	42.5	52.2	12.91
8	32.67	15	5.82
9	52.32	15	5.82
10	52.32	90	20
11	42.5	115.7	12.91
12	32.67	15	20
13	32.67	90	5.82
14	59	52.2	12.91
15	42.5	52.2	12.91
16	42.5	52.2	1
17	42.5	10.3	12.91

Influencia de la humedad en el proceso de fabricación de paneles ecológicos de caña común (*Arundo donax* L.)

B.E. Ferrández-García[1], M. Ferrández-Villena[1], T. García-Ortuño[1], M.T. Ferrández-García[1]

[1]Instituto de Investigación e Innovación Agroalimentario y Agroambiental (CIAGRO). Escuela Politécnica Superior de Orihuela (Alicante). Universidad Miguel Hernández de Elche. España. Ctra. Beniel km 3,2. Orihuela (Alicante). m.ferrandez@umh.es

Palabras clave: Valorización, residuos vegetales, tableros de partículas, propiedades mecánicas.

Resumen.
La agricultura, a pesar de sus múltiples beneficios, genera una cantidad significativa de residuos que a menudo no se gestionan de manera óptima. La falta de una gestión adecuada puede llevar a problemas ambientales, como la contaminación del suelo y el agua, así como a problemas económicos por la mala administración de estos residuos., sin embargo, estos residuos ofrecen oportunidades para la sostenibilidad y la mejora del entorno agrícola. En los últimos años se han utilizado distintos residuos vegetales para la obtención de tableros de partículas con la intención de obtener nuevos materiales que ayuden a paliar el impacto ambiental y cuyo objetivo último es aumentar su valor añadido y disminuir los residuos. También se impone disminuir la utilización de adhesivos sintéticos y estudio de nuevos procesos de fabricación de tableros. En este trabajo se utiliza la caña común (*Arundo donax* L.), considerada como una mala hierba que se encuentra en muchas partes del mundo. Se han fabricado tableros de partículas aglomeradas de caña común sin adhesivos con 3 tamaños de partículas (de 0,25 a 1,00 mm, de 0,25 a 2,00 mm y de 1,00 a 2,00 mm) con diferentes proporciones de agua añadida (40, 50 y 60%) y aplicando una presión de 2,6 MPa y una temperatura de 150ºC durante 10 min en la prensa de platos calientes. Se han realizado los ensayos de densidad, de resistencia a flexión (MOR, MOE), de cohesión interna o resistencia a tracción (IB) y de resistencia al arranque de tornillo (SH), según las normas EN de los tableros de madera. Con mayor adición agua y para las partículas de menor tamaño se obtienen las mejores prestaciones mecánicas.

INTRODUCCIÓN

La caña común (*Arundo donax L.*), también conocida como caña gigante, es una planta perenne de rápido crecimiento originaria de Asia, que se ha convertido en una especie invasora en muchos ecosistemas ribereños de diversas partes del mundo, especialmente en zonas de clima templado y subtropical. Esta planta, difícil de erradicar, es capaz de colonizar rápidamente los cauces de ríos y arroyos, debido a su alta capacidad de adaptación y expansión. La invasión de *Arundo donax* en los cauces fluviales tiene consecuencias ambientales significativas. Sus tallos rígidos y altos crean barreras que modifican el flujo del agua y aumentan el riesgo de obstrucción y desbordamiento en períodos de lluvias intensas. Por todo ello, es importante controlarla, y al mismo tiempo, aprovechar y valorizar este residuo vegetal, que no solo contribuye a reducir la presión de esta especie en los ecosistemas, sino que también promueve una economía circular. Aprovechar estos residuos como materia prima sostenible puede reducir las emisiones de carbono y generar beneficios económicos en áreas afectadas por esta invasión vegetal. En este sentido, el presente trabajo estudia la idoneidad del residuo vegetal caña común, como sustituto de madera convencional en la producción de tableros de partículas. Del mismo modo, se investiga como afecta en sus propiedades, la cantidad de agua utilizada en la fabricación de dichos tableros.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los materiales empleados en este trabajo fueron agua y caña común (*Arundo donax* L.) la cual se obtuvo del cauce del río Segura aledaño a la Escuela Politécnica Superior de Orihuela de la Universidad Miguel Hernández (EPSO). La fabricación de tableros de partículas se realizó en el laboratorio de construcción de la EPSO donde los pasos a seguir fueron los siguientes: La caña se deshojó y se dejó secar durante 6 meses al aire libre, posteriormente se trituró en una desfibriladora de cuchillas y, el material resultante, se tamizó mediante una tamizadora vibradora. De las partículas obtenidas, se midió la humedad cuyo valor fue de 8,2% y se seleccionaron tres tamaños: <0,25 mm a 1 mm, de 0,25 a 2 mm y de 1 a 2 mm.

Con este material se fabricaron tableros aglomerados de los tres tamaños de partículas (figura 2). El proceso de fabricación consistió en la formación de la manta de las partículas de caña común en un molde de 600 x 400 mm^2 a la cual se le pulverizó agua en una proporción del 40, 50 y 60% del peso de las partículas dependiendo del tipo de tablero. Seguidamente se introdujo en una prensa de platos calientes con una temperatura de 150ºC, durante 10 minutos y a una presión de 2,6 MPa. Posteriormente, los paneles se dejaron enfriar en posición vertical, obteniéndose paneles rígidos de partículas aglomeradas con unas dimensiones aproximadas de 600 x 400 mm^2 y con un espesor variable entre 6 y 9,2 mm. Se fabricaron 9 tipologías y de cada una de ellas se realizaron 3 probetas, resultando un total de 27 tableros. Las diferentes tipologías de tableros se muestran en la tabla 1.

Las propiedades se determinaron siguiendo las normas Europeas establecidas para los tableros de partículas de madera (EN 309, 2005). Se midieron las propiedades de los tableros siguiendo las normas estándares Europeas: densidad (EN 323, 1993), módulo de ruptura a flexión (MOR), módulo de elasticidad a flexión (MOE) (EN 310, 1993) y cohesión interna o resistencia a tracción (IB) (EN 319, 1993), arranque de tornillo en la cara (SH) (EN 320, 2011). Los tableros se evaluaron según indica la norma europea (EN 312, 2010).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la tabla 2 se muestran las propiedades de los tableros ensayados.

Como se puede observar en la tabla 2, la densidad media de los tableros se puede clasificar como media-alta, obteniéndose valores entre 759,32 kg/m^3 y 968,06 kg/m^3. Se obtienen valores más altos en los tableros fabricados con menor tamaño de partícula. Los tableros con mejores prestaciones mecánicas es el A60 fabricado con un tamaño de partícula (0,25 -1 mm) y mayor cantidad de agua (60%) cuyos valores alcanzan un MOR de 10,77 N/mm^2, un MOE de 2.923,38 N/mm^2, un IB de 0,29 N/mm^2 y un SH de 27,08 N/mm^2. Si comparamos estos resultados con los valores mínimos contemplados en la norma UNE 312, se pueden clasificar en tableros tipo P1 *tableros para utilización general en ambiente seco* (MOR $\leq$ 10,5 N/mm^2 e IB $\leq$ 0,28 N/mm^2).

CONCLUSIONES

Como conclusiones podríamos indicar que en este estudio se han evaluado las propiedades físicas y mecánicas del tablero de partículas elaborado a partir del residuo vegetal caña común, sin utilizar ningún tipo de adhesivo. Los resultados muestran que, mediante un proceso de fabricación con baja temperatura de prensado, es posible producir tableros de partículas a partir de materiales biodegradables.

Se ha conseguido fabricar un tablero ecológico con residuos caña común y sin utilizar ninguna sustancia contaminante, que podría ser utilizado en revestimientos interiores en ambiente

seco, por lo que podrían reemplazar a los fabricados con madera tradicional ayudando así a reducir la deforestación.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Centro de Investigación e Innovación Agroalimentaria y Agroambiental (CIAGRO-UMH); y a la Universidad Miguel Hernández por su apoyo.

Referencias

EN 309. Particleboards. Definitions and classification. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2005.

EN 310. Wood-based panels. Determination of modulus of elasticity in bending and of bending strength. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 1993.

EN 312. Particleboards. Specifications. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium. 2010.

EN 319. Particleboards and fiberboards. Determination of tensile strength perpendicular to the plane of de board. Committee for Standardization, Brussels, Belgium. 1993.

EN 320. Particleboards and fibreboards - Determination of resistance to axial withdrawal of screw. Committee for Standardization, Brussels, Belgium. 2011

EN 323. Wood-based panels. Determination of density. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 1993.

Ferrandez-Garcia, M.T.; Ferrandez-Garcia, C.E.; Garcia-Ortuño, T.; Ferrandez-Garcia, A.; Ferrandez-Villena, M. Experimental Evaluation of a New Giant Reed (*Arundo donax* L.) Composite Using Citric Acid as a Natural Binder. Agronomy. 2019, 9(12), 882.

García Ortuño, T. Caracterización de la caña común (*Arundo donax* L.) para uso como material de construcción. Tesis doctoral por la Universidad Miguel Hernández. 2003.



Figura 1.- Caña común (*Arundo donax* L.).



Figura 2.- Tablero de partículas de caña común sin adhesivo.

Tabla 1. Tipos de tableros fabricados.

Tipo de tablero	Tamaño de partícula (mim)	Proporción de agua añadida (%)	Tiempo (min)	Temperatura (ºC)	Presión (MPa)	Nº de tableros
A40	0,25 - 1	40	10	150	2.6	3
A50	0,25 - 1	50	10	150	2.6	3
A60	0,25 - 1	60	10	150	2.6	3
B40	0,25 - 2	40	10	150	2.6	3
B50	0,25 - 2	50	10	150	2.6	3
B60	0,25 - 2	60	10	150	2.6	3
C40	1 - 2	40	10	150	2.6	3
C50	1 - 2	50	10	150	2.6	3
C60	1 - 2	60	10	150	2.6	3

Tabla 2. Resultados medios de las propiedades de tableros de partículas de caña.

Tipo de Tablero	Espesor (mm)	Densidad (kg/m^3)	MOR (N/mm^2)	MOE (N/mm^2)	IB (N/mm^2)	SH (N/mm)
A40	7,78 (0,15)	968,06 (30,01)	4,37 (0,57)	862,68 (38,71)	0,03 (0,01)	7,32 (1,72)
A50	9,26 (0,18)	931,72 (24,49)	4,66 (0,37)	864,15 (119,37)	0,04 (0,01)	12,31 (1,56)
A60	7,66 (0,41)	918,64 (37,59)	10,77 (0,51)	2.923,38 (337,63)	0,29 (0,04)	27,08 (5,50)
B40	6,07 (0,29)	865,05 (35,10)	3,74 (0,54)	843,19 (107,12)	0,02 (0,01)	11,25 (0,55)
B50	6,35 (0,36)	843,31 (23,54)	5,56 (0,80)	1573,25 (61,62)	0,05 (0,01)	13,05 (3,24)
B60	7,00 (0,80)	905,25 (58,46)	5,07 (0,70)	747,16 (56,80)	0,05 (0,01)	10,81 (0,97)
C40	7,64 (0,35)	850,70 (49,90)	2,61 (0,59)	950,84 (335,68)	0,04 (0,19)	6,72 (2,74)

C50	7,62 (0,42)	759,32 (78,95)	2,39 (0,33)	579,49 (172,53)	0,04 (0,01)	6,26 (1,38)
C60	9,12 (0,36)	910,88 (24,06)	4,96 (0,52)	624,99 (189,09)	0,05 (0,01)	12,53 (2,34)

( ) Desviación standard

Valorización de tableros de partículas del tronco palmera datilera (*Phoenix dactilifera*.)

B.E. Ferrández-García[1], M. Ferrández-Villena[1], T. García-Ortuño[1], M.T. Ferrández-García[1]

[1]Instituto de Investigación e Innovación Agroalimentario y Agroambiental (CIAGRO). Escuela Politécnica Superior de Orihuela (Alicante). Universidad Miguel Hernández de Elche. España. Ctra. Beniel km 3,2. Orihuela (Alicante). m.ferrandez@umh.es

Palabras Clave: residuos vegetales, paneles, ecológicos, propiedades físicas y mecánicas.

Resumen.
Con el fin de reducir el consumo energético y disminuir el impacto ambiental se están desarrollando muchas investigaciones encaminadas a incrementar el uso de residuos como recursos renovables y ecológicos. En el sureste de España, la palmera datilera (*Phoenix dactilifera*) se utiliza ampliamente en el paisaje urbano. Las plantaciones afectadas por la plaga del picudo rojo de las palmeras generan numerosos residuos vegetales que deben ser triturados y transferidos a vertederos autorizados. En esta comunicación se presenta un proceso de fabricación de tableros de partículas ecológicos para valorizar los residuos del tronco de las palmeras datileras, actuación que pretende estar alineada con la Directiva marco sobre residuos encaminada a la mejora de la política mediambiental europea. El uso de materiales a base de fibras vegetales en la construcción puede paliar el problema de escasez de madera y mejorar la sostenibilidad del sector debido a que son fácilmente reciclables y no agresivos con el medio ambiente. El proceso de fabricación consistió en la utilización del tronco de la palmera triturado. Se fabricaron 64 tableros sin adhesivos, con una temperatura en la prensa de 130ºC y una presión de 2.6 MPa, Se utilizaron cuatro tamaños de partículas (< 0,25 mm, de 0,25 a 1,00 mm, de 1,00 a 2,00 mm y de 2,00 a 4,00 mm) y 4 tiempos de fabricación (7, 15, 30 y 60 min), obteniendo 16 tipologías de tableros con un espesor medio de 7 mm. Posteriormente se midieron sus propiedades mecánicas y físicas de acuerdo con las normas EN. Se obtuvieron tableros tipo P2 (tableros para interior en ambiente seco) con partículas menores de 0.25 mm y tiempo de 60 min (11,7 N/mm^2 MOR, 1809.7 N/mm^2 MOE y 0.61 N/mm^2 IB). Los tableros propuestos aportan como ventaja estar libres de emisiones de formaldehido y no consumir recursos fósiles, además de la utilización de un residuo.

INTRODUCCIÓN

La renovación y construcción de edificios, al tiempo que se reduce el potencial de calentamiento global, se puede abordar en parte mediante el uso de materiales de bajo impacto ambiental, como los materiales de base biológica. El aprovechamiento de subproductos de la actividad agrícola y forestal, aparte de otros muchos beneficios ambientales, constituye una fuente alternativa de ingresos o de reducción de gastos y un apoyo a los principios de economía circular. Desde el punto de vista técnico, las plantas no madereras ofrecen una gran variedad de cualidades en sus fibras y explotadas de forma adecuada pueden emplearse en el desarrollo de materiales sustitutos de la madera con propiedades innovadoras.

La palmera fue utilizada en algunas construcciones tradicionales sustituyendo a la madera en aquellos lugares donde la madera era escasa. En el sureste de España, las palmeras se utilizan ampliamente en el paisaje urbano, como en la mayoría de los países que rodean el mar Mediterráneo. Entre las diferentes especies, la *Phoenix dactylifera* (palmera datilera) es de las más abundantes.

Actualmente las investigaciones con biomasa vegetal se dirigen a obtener tableros de partículas sin adhesivos con diferentes tratamientos previos, estando ampliamente demostrada la capacidad de auto-unión que tienen las fibras naturales cuando se produce la temperatura de transición vítrea.

Teniendo en cuenta la necesidad de nuevos materiales a partir de la reutilización de residuos, el presente trabajo tiene como objetivo la fabricación y evaluación de tableros de aglomerado de partículas del tronco de la palmera datilera sin el empleo de adhesivos, con el fin de conseguir un producto ecológico y biodegradable.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los materiales empleados en este trabajo fueron el tronco de la palmera datilera que se dejó secar durante 6 meses al aire libre. Posteriormente se trituraron en una desfibriladora de cuchillas. Las partículas obtenidas se seleccionaron en cuatro tamaños de partículas (< 0,25 mm, de 0,25 a 1,00 mm, de 1,00 a 2,00 mm y de 2,00 a 4,00 mm) mediante una tamizadora vibradora. Las partículas tenían una humedad aproximada del 10,2%. Para la fabricación de los tableros de ha empleado un molde de 600 x 400 mm^2 a los que previamente se les ha aplicado un 10% de agua pulveriza para posteriormente someterlos a una temperatura de 130 º C, una presión de 2.6 MPa y empleando 4 tiempos de fabricación (7, 15, 30 y 60 min) en una prensa de platos calientes para obtener paneles rígidos de partículas aglomeradas. Posteriormente, se dejaron los paneles enfriar en posición vertical. Los tableros eran de una sola capa con un espesor aproximado de 7 mm. Se elaboraron 4 paneles de cada tipo. Las características de los tableros fabricados son las que se indican en la tabla 1.

Se han determinado y evaluado las propiedades de los tableros de partículas de madera aplicando las normas europeas vigentes (EN 309, 2005; EN 312, 2010). Se ha medido la densidad (EN 323, 2010), la absorción de agua y el hinchamiento en espesor tras 2 y 24 horas de inmersión en agua (EN 317, 1993), el módulo de elasticidad a flexión (MOE) y el módulo de ruptura a flexión (MOR) (EN 310, 1993) y la cohesión interna o resistencia a tracción (IB) (EN 319, 1993).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la figura 1 se muestran las propiedades físicas de los tableros ensayados.

Se han fabricado con éxito paneles de palmera datilera con una densidad media de 826.03 kg/m^3, pudiendo ser clasificados como tableros de densidad media. Los valores medios del % de hinchamiento en espesor (TS) y absorción de agua (WA) después de inmersión en agua durante 24 h muestran que a mayor tamaño de partícula sus parámetros empeoran debido al mayor número de huecos de aire existentes. En la figura 2 se describen las propiedades mecánicas de los tableros ensayados.

Las mejores prestaciones mecánicas (figura 2) se consiguen con el menor tamaño de partícula y para un tiempo de prensado de 60 minutos (tablero de tipo 1-60) con un MOR de 11,7 N/mm^2, un MOE de 1.809,7 N/mm^2 y una IB de 0,61 N/mm^2. Estos tableros podrían ser clasificado como P2 según la normativa europea (EN 312, 2010).

Según el análisis realizado por varios investigadores (Ferrández-Villena et al. 2020, Hegazy et al. 2015), uno de los factores más importantes para la elaboración de los tableros es el tamaño de partícula, concluyendo en la misma línea que en este trabajo donde se alcanzan las mejores propiedades mecánicas con un menor tamaño de partícula.

CONCLUSIONES

En este trabajo se han analizado las propiedades mecánicas y físicas del tablero de partículas del tronco de la palmera datilera, llegando a la conclusión de que empleando un proceso de fabricación con temperatura de prensado baja se pueden fabricar tableros de partículas a partir de materiales biodegradables.

Los tableros tipo 1-60 pueden ser clasificados de grado P2 (tableros no estructurales para uso en interior) por lo que cumplen con los requisitos mínimos para poder ser empleados en la fabricación de muebles. En futuras investigaciones se podría emplear algún producto hidrófugo o buscar dosificaciones que consiguieran tableros con las propiedades adecuadas para ser empleados en el exterior.

El uso de tronco de la palmera datilera para producir materiales duraderos como los tableros de partículas podría ser beneficioso para el medio ambiente, ya que ayuda a disminuir la contaminación atmosférica y reduce la cantidad de residuos que terminan en los vertederos.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Centro de Investigación e Innovación Agroalimentaria y Agroambiental (CIAGRO-UMH); y a la Universidad Miguel Hernández por su apoyo.

Referencias

EN 309. Particleboards. Definitions and classification. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2005.

EN 310. Wood-based panels. Determination of modulus of elasticity in bending and of bending strength. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 1993.

EN 312. Particleboards. Specifications. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium. 2010.

EN 317. Particleboards and fiberboards. Determination of swelling in thickness after immersion in water. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium. 1993

EN 319. Particleboards and fiberboards. Determination of tensile strength perpendicular to the plane of de board. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium. 1993

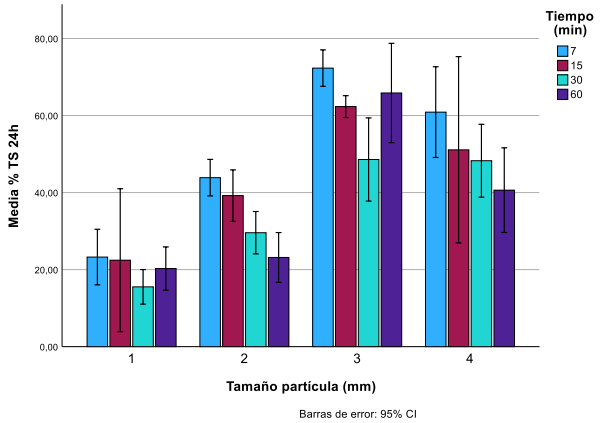
EN 323. Wood-based panels. Determination of density. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 1993.

Ferrández-Villena, M.; Ferrandez-Garcia, C. E.; Garcia-Ortuño, T.; Ferrandez-Garcia, A.; Ferrandez-Garcia, M. T. The Influence of Processing and Particle Size on Binderless Particleboards Made from Arundo donax L. Rhizome. Polymers. 2020, 12(3), 696.

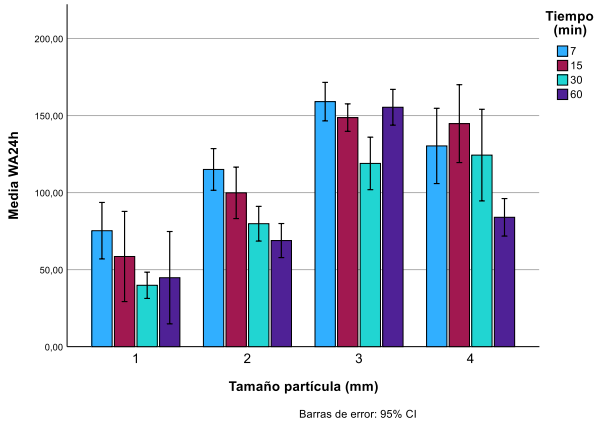
Hegazy, S.; Ahmed, K. Effect of date palm cultivar, particle size, panel density and hot water extraction on particleboards manufactured from date palm fronds. Agriculture 2015, 5, 267–285.

Tabla 1. Tipos de tableros fabricados.

Tipo de tablero	Nº de tableros	Tamaño de partícula de palmera (mm)	Tiempo (min)	Tipo de tablero	Nº de tableros	Tamaño de partícula de palmera (mm)	Tiempo (min)
1-07	4	< 0,25	7	3-07	4	1,00 a 2,00	7
1-15	4	< 0,25	15	3-15	4	1,00 a 2,00	15
1-30	4	< 0,25	30	3-30	4	1,00 a 2,00	30
1-60	4	< 0,25	60	3-60	4	1,00 a 2,00	60
2-07	4	0,25 a 1,00	7	4-07	4	2,00 a 4,00	7
2-15	4	0,25 a 1,00	15	4-15	4	2,00 a 4,00	15
2-30	4	0,25 a 1,00	30	4-30	4	2,00 a 4,00	30
2-60	4	0,25 a 1,00	60	4-60	4	2,00 a 4,00	60

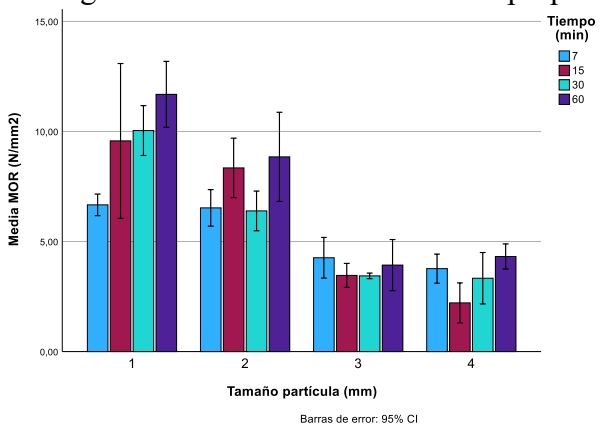


Hinchamiento en espesor (TS)

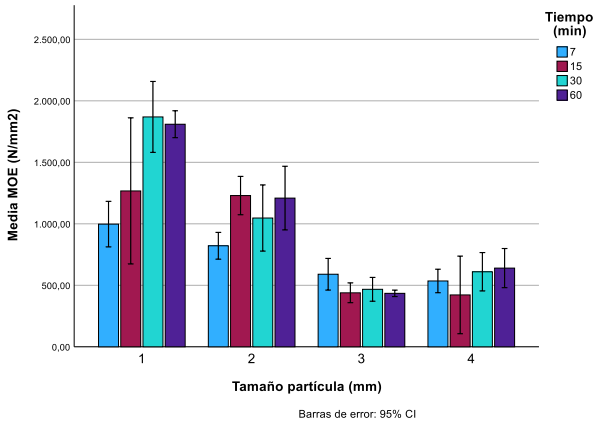


Absorción de agua (WA)

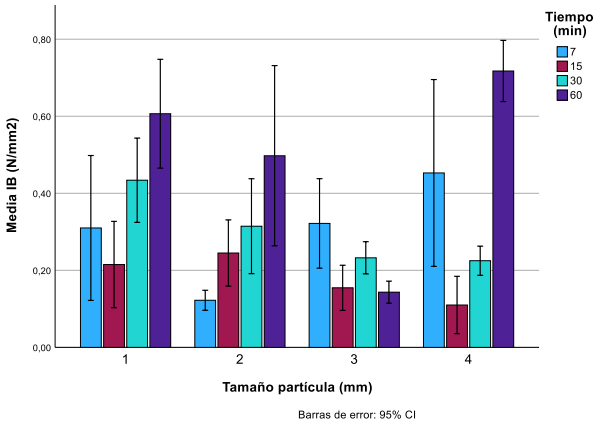
Figura 1. Resultados medios de las propiedades físicas de los tableros.



Módulo de ruptura (MOR)



Módulo de elasticidad (MOE)



Cohesión interna o resistencia a tracción (IB)

Figura 2. Resultados medios de las propiedades mecánicas de los tableros.

Influencia del cambio climático en el rendimiento de tomate para industria del Bajo Guadalquivir

Miguel Calixto López-Gordillo[1], Emilio Ramírez-Juidias[1*], José Miguel Madueño-Luna[1], Antonio Madueño-Luna[1]

[1] Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica, Universidad de Sevilla, Sevilla, España.

***Autor para correspondencia:** erjuidias@us.es

Palabras clave: Cambio Climático, Algoritmos Evolutivos, Agricultura de Precisión por Satélite, Sector B XII del Bajo Guadalquivir.

Resumen.

El tomate es uno de los cultivos de hortalizas más importantes cultivados en diferentes climas. A consecuencia del calentamiento global, el estrés por calor puede afectar gravemente tanto a la calidad del fruto como al rendimiento total. Actualmente, es posible obtener información confiable del estado del cultivo a través de herramientas teledetectadas, las cuales permiten, junto con el uso de modelos matemáticos predictivos, inferir el rendimiento. En el presente trabajo, se llevó a cabo un estudio sobre rendimiento de la variedad Juncal, en la parcela de ensayo 41-053-18-33 de Lebrija, situada en el Bajo Guadalquivir. Para ello, fue tenido en cuenta el modelo climático local en base al último informe de expertos en cambio climático. Igualmente, se adquirieron un total de 857 imágenes de los satélites Landsat LC8 y Sentinel-2 L2A, cuyos píxeles se complementaron con información climática histórica, además de con los datos obtenidos durante el periodo de ensayo (2018-2021). Toda esta información alimentó a un algoritmo evolutivo, a través del cual se llegó a una ecuación predictora de rendimiento ($r = 0.903$, $R^2 = 0.79$, $p \leq 0.001$), basada en el NDVI medio del periodo de recolección. De los tres escenarios considerados, el correspondiente al estado de 15 días antes de periodo de recolección arrojó los mejores resultados (100.71 tn/ha). También se llevó a cabo una predicción futura del rendimiento, infiriéndose un valor medio, a consecuencia del cambio climático, de 76.77 tn/ha para el periodo 2071-2100. En conclusión, para lograr un mejor uso del agua de riego, es evidente que las técnicas basadas en riego deficitario pueden ser una alternativa con la que paliar, en parte, los efectos del aumento de temperatura y disminución de precipitaciones.

INTRODUCCIÓN

Las olas de calor y las variaciones en los patrones de lluvia inducidas por el cambio climático contribuyen a diversos factores de estrés abiótico, lo que resulta en pérdidas de cultivos de aproximadamente el 50% (Chen et al., 2023; Rivero et al., 2022). Por esta razón, es imperativo priorizar la evaluación y selección de cultivos que presenten alta tolerancia al estrés (Dutta et al., 2022; Khar et al., 2022; Shaffique et al., 2022). El crecimiento y desarrollo de los cultivos están predominantemente influenciados por la interacción entre los genotipos, el ambiente y las prácticas de manejo, lo que genera variaciones considerables en el rendimiento de los cultivos (Alexopoulos et al., 2023). Para satisfacer la creciente demanda de alimentos, es esencial mejorar la productividad mediante la identificación de variedades, y prácticas agrícolas, mejoradas. El estrés térmico impacta negativamente en el desarrollo de los cultivos, particularmente en condiciones de campo abierto, lo que requiere la implementación de estrategias adecuadas para evitar la reducción del rendimiento (Liu et al., 2023; Shaffique et al., 2022). Como es bien sabido, Mesa et al. (2022)

destacó que el enfoque más efectivo para mejorar la tolerancia de las plantas a altas temperaturas implica la aplicación de técnicas agrícolas adecuadas, así como la selección de variedades resistentes.

El tomate se destaca como un cultivo de importancia global, con una producción total de 256,770,679.9 toneladas en 2021 (FAOSTAT, 2023). En España, y según FAOSTAT (2023), su producción estimada alcanzó las 4,754,380 toneladas en este mismo año. El estrés térmico se reconoce como un factor crítico para el tomate, ya que incluso un ligero aumento por encima de la temperatura diaria típica de 25 °C provoca una disminución significative, o el fracaso total, en el cuajado de frutos (Li et al., 2022; Liu et al., 2023; Raza et al., 2023).

Investigaciones previas han evaluado la tolerancia al calor de los cultivos utilizando criterios diversos (Li et al., 2022; Shaffique et al., 2022). Por ejemplo, Mesa et al. (2022) examinó varios parámetros fisiológicos, como la intensidad fotosintética, la intensidad de transpiración, la conductancia estomática y el contenido de clorofila. Por otro lado, Pineda et al. (2020) indicó que las alteraciones en la temperatura del dosel actúan como un indicador de la conductancia estomática, estrechamente relacionada con diversas respuestas al estrés. Además, Liu et al. (2023) identificó una serie de características morfológicas (como altura de planta, peso fresco y seco vegetativo, y área foliar) y fisiológicas (incluyendo tasas de fotosíntesis y transpiración, eficiencia en el uso del agua y contenido de clorofila) para explorar las variaciones en la tolerancia al calor entre diferentes genotipos.

El monitoreo continuo del estado de crecimiento de las plantas es posible mediante técnicas de detección no destructiva, lo que ofrece el potencial de aumentar los rendimientos de los cultivos y gestionar los recursos de manera más efectiva. En las últimas décadas, se han logrado avances significativos en teledetección. Los sensores hiperespectrales, conocidos por sus resoluciones espaciales y espectrales (Terentev et al., 2022), pueden producir imágenes de alta calidad, proporcionando información, detallada en tiempo real, crucial para estrategias de manejo de cultivos bien fundamentadas. La variación en las hojas de las plantas, tanto en forma como en composición química, da lugar a diversas reflexiones, permitiendo explorar la interacción entre el microclima y la salud de las plantas (Virnodkar et al., 2020). Los espectroradiómetros desempeñan un papel fundamental en la recopilación de datos electromagnéticos, facilitando la extracción de información adicional sobre las características de las plantas mediante la generación de nuevos índices espectrales de vegetación (SVI, por sus siglas en inglés), que mejoran la efectividad de los estudios de vegetación (Aldubai et al., 2022). Estos SVI se derivan de datos de teledetección geoespacial (Drăguleasa et al., 2023). Cabe destacar que el NDVI, un índice ampliamente utilizado en estudios agrícolas, ejemplifica este enfoque (Kayad et al., 2022; Vélez et al., 2023).

Los SVI derivados de datos multiespectrales resultan valiosos para evaluar tanto aspectos cuantitativos, como cualitativos, de la salud o de la dinámica de crecimiento de la vegetación (de Oliveira Maia et al., 2023; Ren et al., 2024). En este sentido, Tayade et al. (2022) observó que, típicamente, las plantas sanas exhiben valores altos de estos índices debido a un mayor reflexión del rojo, mientras que las plantas enfermas, estresadas o muertas muestran valores más bajos de los mismos.

Por otro lado, y como es bien sabido, el proceso continuo del calentamiento global afecta considerablemente los rendimientos de los cultivos (Lesk et al., 2022). En este contexto, en el sur de la Península Ibérica, los tomates procesados en España se cultivan típicamente en campos abiertos durante marzo, cuando las temperaturas son óptimas. Sin embargo, el aumento progresivo de las temperaturas, en relación con la disminución de la precipitación, puede dar lugar, según Lesk et al. (2022), a una posible reducción de la producción.

Por esta razón, la adaptación de las proyecciones de cambio climático al área de estudio, según el VI informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC)

(Shahid et al., 2021), representa una herramienta básica importante para el desarrollo de escenarios locales de impacto, necesarios para estimar el rendimiento futuro del tomate procesado, así como para proponer estrategias que permitan enfrentar el proceso de cambio climático en el área de estudio. En este sentido, aunque varios autores utilizan los modelos previos del IPCC (Arunrat et al., 2022; Shahid et al., 2021; Viveros Santos et al., 2023), ninguno de ellos lleva a cabo una proyección futura para inferir el rendimiento de cultivos en algunas de las variedades de tomate procesado más importantes utilizadas en el valle del Guadalquivir. Por esta razón, el presente trabajo es novedoso.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de Estudio y Variedad Utilizada:

El presente trabajo se llevó a cabo en el Sector BXII de las marismas del Bajo Guadalquivir, pertenecientes a las localidades de Las Cabezas de San Juan y Lebrija. Estas marismas, con una extension de 14,643 ha, es considerada una de las mayores zonas productivas de la comarca del mismo nombre. Todas las parcelas de la marisma poseen una superficie de 12 ha, y de todas ellas, el tomate para industria ocupa un 11.5 % del total de la superficie de dicho Sector. La parcela de ensayo 41-053-18-33, se encuentra en el término municipal de Lebrija.

La variedad de tomate Juncal se caracteriza por ser una planta vigorosa de crecimiento indeterminado. Es adecuada tanto para cultivos en invernadero como al aire libre, debido tanto a su buen estado de conformación, como a su buena cobertura foliar, lo que protege eficazmente a los frutos de la incidencia directa del Sol. Los frutos, de tamaño mediano a grande y forma redondeada, presentan una piel lisa y firme, con un atractivo color rojo intenso al alcanzar la madurez, además de un perfil organoléptico equilibrado entre dulzura y acidez. Esta variedad medio-precoz, con buena concentración de maduración, destaca por su excelente balance entre sólidos solubles (Brix) y viscosidad, lo que le permite adaptarse a una amplia gama de condiciones de cultivo. En términos térmicos, la variedad se desarrolla óptimamente en rangos de temperatura de 20 a 30 °C durante el día y de 12 a 18 °C por la noche, garantizando un crecimiento uniforme, así como una elevada calidad de los frutos. En Andalucía, bajo condiciones controladas, su rendimiento promedio es de entre 100 y 120 toneladas por hectárea, dependiendo de las prácticas agronómicas empleadas. Además, la variedad Juncal presenta resistencia a las principales enfermedades que afectan al tomate, incluyendo Verticillium (V), Fusarium raza 2 (F2), nematodos (N) y al virus del bronceado del tomate (Sp), lo que la convierte en una opción altamente productiva y versátil para el mercado fresco y la agroindustria.

Ensayos de Campo, Descarga y Tratamiento de Imágenes Satélites:

Se llevaron a cabo ensayos basados en un diseño estadístico de bloques al azar con tres repeticiones. En la parcela, de textura arcillosa, se efectuó trasplante el 24 de marzo y recolección el 7 de agosto de cada año de ensayo (2018-2021), siendo la densidad de plantas igual a 35,000 plantas por hectárea. La duración del ciclo de cultivo fue de 136 días. En cuanto al diseño de la parcel elemental, es preciso resaltar que constaba de mesillas de 235 metros de longitude, con distancia entre surcos de 1.55 metros.

Imágenes Satélites: A partir de la aplicación Landviewer (EOS Data Analytics Inc.) bajo licencia de uso, se descargaron un total de 857 imágenes satélites (52 de Landsat 8 OLI y 805 de Sentinel-2 L2A) entre las fechas 24 de marzo de 2018 y 7 de agosto de 2021.

Modelos Matemáticos: Respecto a la evolución climática de la zona de estudio, así como su impacto en el rendimiento de tomate Juncal, se consideraron las variables precipitación y temperatura desde el año 1961 al 2100. Como punto de partida, se consideraron los valores medios de estas variables bajo el Escenario SSP3-7.0 y el modelo matemático MCG CMCC-ESM2 de los Escenarios Locales de Cambio Climático de la Junta de Andalucía, basados en el VI informe del

Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). Con el proósito de obtener una predicción de rendimiento coherente, se tuvieron en cuenta los modelos correspondientes a la emission de gases de efecto invernadero (en toneladas equivalents de CO2). Estos datos, junto al resto de variables, así como a la información por pixel, procedente de imágenes satélite, alimentaron a un modelo genéticamente modificado, dando como resultado los algoritmos predictores en base a tres escenarios (rendimiento 1 mes antes de la cosecha, 15 días antes y 1 día antes).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Teniendo en cuenta el periodo de cultivo (24 de marzo hasta 7 de agosto de cada año), desde 1961 hasta 2100, hay un progresivo incremento de las temperaturas, acompañado de una disminución de las precipiotaciones. Esta última, es más acusada a partir del periodo 1991-2021, coincidente con un valor, alrededor de 128,000 toneladas equivalentes de CO2, de la cantidad de gases de efecto invernadero (GEI). Desde 2021, el aumento exponencial de los GEI está en relación inversa con la precipitación annual.

En relación a cada periodo de 30 años sometido a estudio (desde 1961 a 2100), es preciso resaltar que desde 1961-1990 hasta 2071-2100, se tienen los siguientes valores de incremento por periodo de 30 años (Tabla 1):

Los valores de la Tabla 1 atestiguan un progresivo decrement del rendimiento del tomate Juncal, principalmente debido a un mayor taponaamiento térmico atmósferico. Este efecto es el responsabale de la disminución de la fAPAR, y por ello, de la disminución de producción de almidón por parte de la planta, afectando a la producción de clorofila, a su desarrollo vegetativo, y en último término, al NDVI y a la producción global del cultivo.

En otro orden de cosas, y en relación a lost res escenarios de rendimiento tenidos en cuenta, hay que señalar que el mayor escenario predictor del rendimiento se corresponde con el de 15 días antes de la recolección (R2 = 0.79). Esto es debido a que en ese momento, la relación entre área foliar y tamaño del fruto permite inferir, a través de imágenes satélite, de manera más significativa las toneladas por hectarea (100.71 entre 1991-2021). El resto de escenarios, 1 día antes y 1 mes antes de recolección, dan lugar, respectivamente, a una mayor área foliar y a un deficiente desarrollo del fruto, lo que dificulta una adecuada predicción.

Referencias:

Aldubai, A.A., Alsadon, A.A., Al-Gaadi, K.A., Tola, E., Ibrahim, A.A., 2022. Utilizing spectral vegetation indices for yield assessment of tomato genotypes grown in arid conditions. Saudi J Biol Sci 29, 2506–2513. https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.12.030

Alexopoulos, A., Koutras, K., Ali, S. Ben, Puccio, S., Carella, A., Ottaviano, R., Kalogeras, A., 2023. Complementary Use of Ground-Based Proximal Sensing and Airborne/Spaceborne Remote Sensing Techniques in Precision Agriculture: A Systematic Review. Agronomy 13, 1942. https://doi.org/10.3390/agronomy13071942

Arunrat, N., Sereenonchai, S., Chaowiwat, W., Wang, C., 2022. Climate change impact on major crop yield and water footprint under CMIP6 climate projections in repeated drought and flood areas in Thailand. Science of The Total Environment 807, 150741. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150741

Chen, L., Duan, L., Sun, M., Yang, Z., Li, H., Hu, K., Yang, H., Liu, L., 2023. Current trends and insights on EMS mutagenesis application to studies on plant abiotic stress tolerance and development. Front Plant Sci 13. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1052569

de Oliveira Maia, F.C., Bufon, V.B., Leão, T.P., 2023. Vegetation indices as a Tool for Mapping Sugarcane Management Zones. Precis Agric 24, 213–234. https://doi.org/10.1007/s11119-022-09939-7

Drăguleasa, I.-A., Niță, A.,

Mazilu, M., Curcan, G., 2023. Spatio-Temporal Distribution and Trends of Major Agricultural Crops in Romania Using Interactive Geographic Information System Mapping. Sustainability 15, 14793. https://doi.org/10.3390/su152014793 Dutta, A., Trivedi, A., Nath, C.P., Gupta, D. Sen, Hazra, K.K., 2022. A comprehensive review on grain legumes as climate-smart crops: Challenges and prospects. Environmental Challenges 7, 100479. https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100479 FAOSTAT, 2023. Crops and livestock products by country, Food and Agriculture Organization of the Unites Nations (FAO) [WWW Document]. 2021. URL https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL (accessed 12.16.23). Kayad, A., Rodrigues, F.A., Naranjo, S., Sozzi, M., Pirotti, F., Marinello, F., Schulthess, U., Defourny, P., Gerard, B., Weiss, M., 2022. Radiative transfer model inversion using high-resolution hyperspectral airborne imagery – Retrieving maize LAI to access biomass and grain yield. Field Crops Res 282, 108449. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108449 Khar, A., Singh, H., Verma, P., 2022. Mitigating Abiotic Stresses in Allium Under Changing Climatic Scenario, in: Genomic Designing for Abiotic Stress Resistant Vegetable Crops. Springer International Publishing, Cham, pp. 253–278. https://doi.org/10.1007/978-3-031-03964-5_7 Lesk, C., Anderson, W., Rigden, A., Coast, O., Jägermeyr, J., McDermid, S., Davis, K.F., Konar, M., 2022. Compound heat and moisture extreme impacts on global crop yields under climate change. Nat Rev Earth Environ 3, 872–889. https://doi.org/10.1038/s43017-022-00368-8 Li, X., Xu, S., Fuhrmann-Aoyagi, M.B., Yuan, S., Iwama, T., Kobayashi, M., Miura, K., 2022. CRISPR/Cas9 Technique for Temperature, Drought, and Salinity Stress Responses. Curr Issues Mol Biol 44, 2664–2682. https://doi.org/10.3390/cimb44060182 Liu, B., Song, L., Deng, X., Lu, Y., Lieberman-Lazarovich, M., Shabala, S., Ouyang, B., 2023. Tomato heat tolerance: Progress and prospects. Sci Hortic 322, 112435. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112435 Mesa, T., Polo, J., Arabia, A., Caselles, V., Munné-Bosch, S., 2022. Differential physiological response to heat and cold stress of tomato plants and its implication on fruit quality. J Plant Physiol 268, 153581. https://doi.org/10.1016/j.jplph.2021.153581 Pineda, M., Barón, M., Pérez-Bueno, M.-L., 2020. Thermal Imaging for Plant Stress Detection and Phenotyping. Remote Sens (Basel) 13, 68. https://doi.org/10.3390/rs13010068 Raza, A., Charagh, S., Abbas, S., Hassan, M.U., Saeed, F., Haider, S., Sharif, R., Anand, A., Corpas, F.J., Jin, W., Varshney, R.K., 2023. Assessment of proline function in higher plants under extreme temperatures. Plant Biol 25, 379–395. https://doi.org/10.1111/plb.13510 Ren, R., Zhang, H., Gao, X., Wang, H., Jiang, W., Wang, Y., Jiang, X., Li, Z., Zhao, H., Li, G., Ding, Y., Mu, Y., 2024. Capturing spatiotemporal heterogeneity in fertilizer application for better modelling paddy water nitrogen and phosphorus pollution at regional scale. Agric Ecosyst Environ 362, 108837. https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108837 Rivero, R.M., Mittler, R., Blumwald, E., Zandalinas, S.I., 2022. Developing climate-resilient crops: improving plant tolerance to stress combination. The Plant Journal 109, 373–389. https://doi.org/10.1111/tpj.15483 Shaffique, S., Khan, M.A., Wani, S.H., Pande, A., Imran, M., Kang, S.-M., Rahim, W., Khan, S.A., Bhatta, D., Kwon, E.-H., Lee, I.-J., 2022. A Review on the Role of Endophytes and Plant Growth Promoting Rhizobacteria in Mitigating Heat Stress in Plants. Microorganisms 10, 1286. https://doi.org/10.3390/microorganisms10071286 Shahid, M.R., Wakeel, A., Ishaque, W., Ali, S., Soomro, K.B., Awais, M., 2021. Optimizing different adaptive strategies by using crop growth modeling under IPCC climate change scenarios for sustainable wheat production. Environ Dev Sustain 23, 11310–11334. https://doi.org/10.1007/s10668-020-01112-2

Tayade, R., Yoon, J., Lay, L., Khan, A.L., Yoon, Y., Kim, Y., 2022. Utilization of Spectral Indices for High-Throughput Phenotyping. Plants 11, 1712. https://doi.org/10.3390/plants11131712 Terentev, A., Dolzhenko, V., Fedotov, A., Eremenko, D., 2022. Current State of Hyperspectral Remote Sensing for Early Plant Disease Detection: A Review. Sensors 22, 757. https://doi.org/10.3390/s22030757 Vélez, S., Ariza-Sentís, M., Valente, J., 2023. Mapping the spatial variability of Botrytis bunch rot risk in vineyards using UAV multispectral imagery. European Journal of Agronomy 142, 126691. https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126691 Virnodkar, S.S., Pachghare, V.K., Patil, V.C., Jha, S.K., 2020. Remote sensing and machine learning for crop water stress determination in various crops: a critical review. Precis Agric 21, 1121–1155. https://doi.org/10.1007/s11119-020-09711-9 Viveros Santos, I., Renaud-Gentié, C., Roux, P., Levasseur, A., Bulle, C., Deschênes, L., Boulay, A.-M., 2023. Prospective life cycle assessment of viticulture under climate change scenarios, application on two case studies in France. Science of The Total Environment 880, 163288. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163288

Tabla 1. Incrementos de temperatura, fAPAR, NDVI y Kc en el tiempo de studio.

Periodos de 30 años	**ΔT = 0.548 °C**	**ΔfAPAR = - 0.0061**	**ΔNDVI = - 0.008**	**ΔKc = - 0.0101**

Modelización del crecimiento radicular del Bimi® a partir de fotografía digital cenital

J.C. Abellaneda Pividal[1], D.G. Fernández-Pacheco[1*], V.M. Gallegos-Cedillo[2], J.M. Molina-Martínez[1]

[1] Grupo de investigación de Ingeniería Agromótica y del Mar, Universidad Politécnica de Cartagena, C/ Ángel s/n, Ed. ELDI E1.06, 30203, Cartagena, Murcia.
[2] Grupo de investigación de Hortofloricultura Mediterránea, Universidad Politécnica de Cartagena, Paseo Alfonso XIII 48, 30203, Cartagena, Murcia.

*** Autor para correspondencia**: daniel.garcia@upct.es

Palabras clave: agricultura de precisión, desarrollo de la raíz, procesamiento digital de imágenes, brócoli.

Resumen

El crecimiento radicular es un indicador crítico del estado de salud y desarrollo de los cultivos, permitiendo además estimar las necesidades de riego. Esta comunicación presenta una metodología innovadora para la estimación del crecimiento radicular a partir de la fracción de cobertura vegetal (FCV) utilizando fotografía digital cenital en un cultivo de Bimi®, un híbrido entre el brócoli convencional y el brócoli chino o kailan, con un sabor dulce y suave. Empleando una cámara digital, se capturaron imágenes de alta resolución de varias parcelas de Bimi® en diferentes etapas de desarrollo. Las imágenes fueron preprocesadas y segmentadas utilizando el software de visión ENVI® Classic. Posteriormente se desarrollaron modelos predictivos que correlacionan la FCV con las características del crecimiento radicular, validados con datos de muestreo físico del sistema radicular. Los resultados revelan una correlación significativa entre los indicadores vegetativos observables en las imágenes y el desarrollo subterráneo de las raíces, permitiendo estimaciones precisas y no invasivas del crecimiento radicular. Esta metodología proporciona una herramienta valiosa para el monitoreo continuo y eficiente del crecimiento radicular, optimizando las prácticas de manejo agrícola y la toma de decisiones basada en datos.

INTRODUCCIÓN

La modelización del crecimiento radicular en plantas ha cobrado relevancia en el estudio de cultivos, especialmente para especies de interés agrícola como el Bimi (Brassica oleracea var. italica x alboglabra). Este cultivo, conocido por su alto valor nutricional y creciente demanda, requiere una comprensión detallada de su desarrollo subterráneo para optimizar prácticas agronómicas que promuevan un crecimiento eficiente y sostenible (González-Esquiva et al., 2017). La fracción de cobertura vegetal, una medida de la cantidad de suelo cubierto por el follaje de la planta (Fernández-Pacheco et al., 2014), se ha propuesto como un indicador indirecto del desarrollo radicular (Escarabajal-Henarejos et al., 2015). Esto se debe a la relación estrecha entre la expansión de la biomasa aérea y el sistema radicular, los cuales responden a las condiciones del ambiente y a la disponibilidad de recursos.

En este estudio, se propone un modelo predictivo del crecimiento radicular del Bimi basado en la

fracción de cobertura vegetal, con el objetivo de proporcionar una herramienta que permita estimar el desarrollo subterráneo de manera no invasiva y en tiempo real.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo de este estudio se monitorizó un cultivo comercial de Bimi® ubicado en Lorca (Murcia, España) durante un periodo de 91 días (febrero-mayo 2024). Las fotografías de la cubierta vegetal se realizaron sobre 4 parcelas de muestreo de 0,5 m^2 (0,5m x 1m), representativas del cultivo y distribuidas aleatoriamente por la finca evitando la zona externa de la plantación para eliminar el efecto borde. Las parcelas estaban convenientemente señalizadas mediante estacas ubicadas en las esquinas de cada parcela. Cada estaca presentaba marcas a intervalos de 20cm desde el suelo, alcanzando una altura total de 1,2m (Fig. 1a). Las fotografías se realizaron a partir del primer día de trasplante a intervalos de 6-7 días, en cada una de las parcelas muestreadas, lo que supuso la obtención de 52 imágenes. Éstas se realizaron verticalmente sobre el cultivo a una altura de 2,40 m sobre el nivel del suelo. Para hacer coincidir la fracción de suelo cubierto por vegetación con la fracción de área sombreada por la planta, las fotografías fueron tomadas al mediodía solar. Adicionalmente se midieron la profundidad radicular y la anchura de la raíz, calculándose el valor promedio de las mismas (Fig. 2). Una vez obtenidas las imágenes digitales se procesaron mediante el software ENVI Classic v5.0, desarrollado por Exelis Visual Information Solutions, obteniendo así la fracción de cobertura vegetal para cada una de las parcelas (Fig. 1b).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 3 se muestran los valores obtenidos de la FCV (%), la profundidad de la raíz (cm) y la anchura radicular (cm). En la gráfica se puede apreciar como los tres parámetros siguen una evolución muy similar.

Analizando los datos se ha podido establecer una relación entre la FCV y la profundidad radicular de la planta, obteniéndose una ecuación de tipo polinomial capaz de estimar la profundidad radicular de la planta a partir de la información obtenida de la fotografía de la cubierta vegetal, con una alta correlación $R^2 = 0,9936$ (ver Fig. 4).

Adicionalmente, y de forma muy similar, también se ha podido fijar una relación entre la FCV y la anchura radicular la planta, obteniéndose de nuevo una ecuación de tipo polinomial capaz de estimar la anchura radicular de la planta a partir de la información obtenida de la fotografía de la cubierta vegetal, con una correlación $R^2 = 0,991$ (ver Fig. 4).

CONCLUSIONES

A lo largo de la investigación, se ha evidenciado que la fracción de cobertura vegetal es un indicador confiable del crecimiento radicular en el Bimi®, lo que podría ser aplicable a otras variedades de brassicas. Este enfoque no solo aporta valor a la comprensión científica de la relación entre el desarrollo aéreo y subterráneo, sino que también tiene aplicaciones potenciales en el ámbito agronómico y de la ingeniería agrícola, proporcionando información relevante para la optimización del uso de recursos hídricos y nutrientes.

Agradecimientos

Este estudio forma parte del Programa AGROALNEXT que ha sido financiado por MICIN con fondos NextGenerationEU (PRTR-C17.I1) y por la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia a través de la Fundación Séneca - Agencia de Ciencia y Tecnología de la Región de Murcia.

Referencias

Escarabajal-Henarejos, D., Molina-Martínez, J.M., Fernández-Pacheco, D.G., García-Mateos, G. (2015). Methodology for obtaining prediction models of the root depth of lettuce for its application in irrigation automation. Agricultural Water Management 151: 167-173.

Fernández-Pacheco, D.G., Escarabajal-Henarejos, D., Ruiz-Canales, A., Conesa, J. and Molina-Martínez, J.M. (2014). A digital image-processing-based method for determining the crop coefficient of lettuce crops in the southeast of Spain. Biosystems Engineering 117: 23-34.

González-Esquiva, J.M., García-Mateos, G., Escarabajal-Henarejos, D., Hernández-Hernández, J.L., Ruiz-Canales, A., Molina-Martínez, J.M. (2017). A new model for water balance estimation on lettuce crops using effective diameter obtained with image analysis. Agricultural Water Management 183: 116-122.

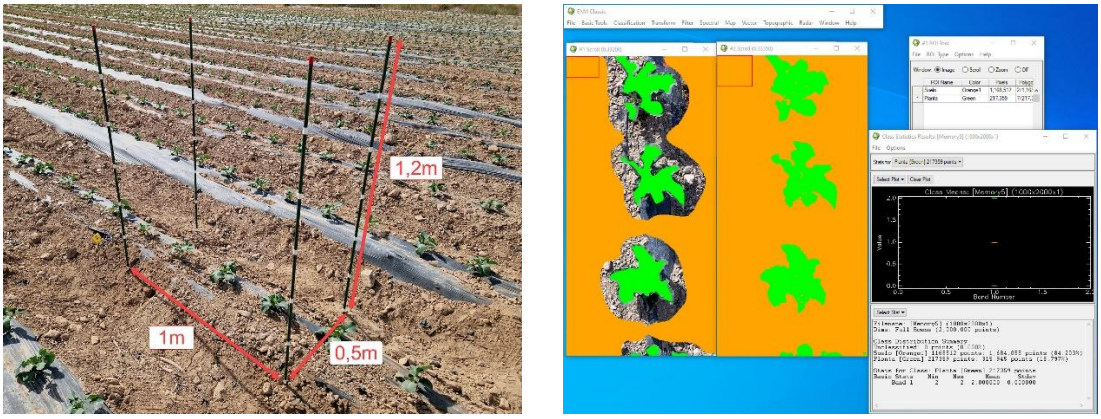


Figura 1. a) Marcación de las parcelas. b) Cálculo FCV con ENVI



Figura 2. Obtención de la profundidad y anchura radicular

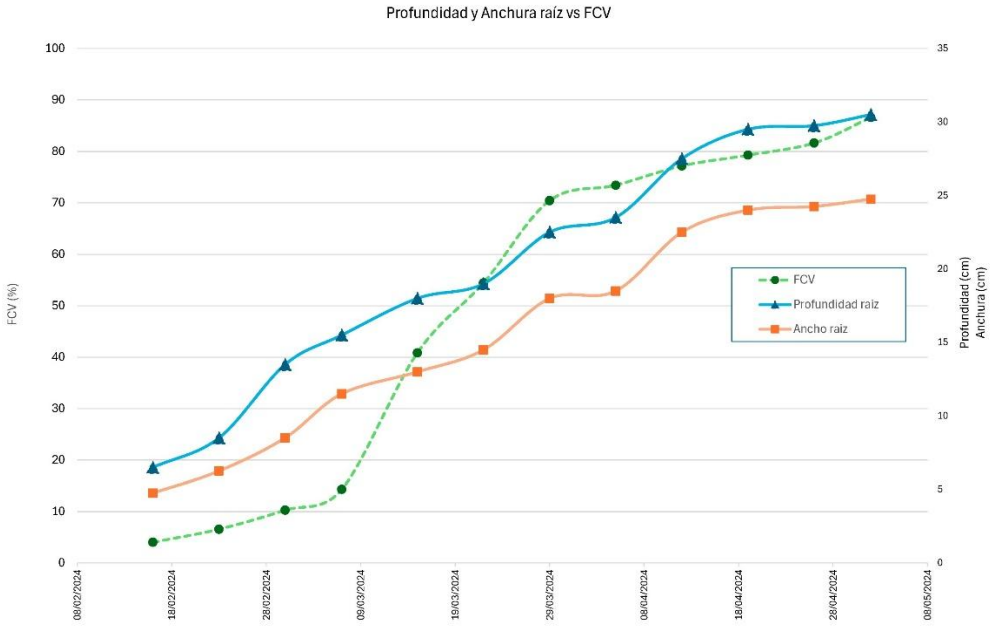


Figura 3. Evolución de la FCV y de la profundidad y anchura radicular a lo largo del ciclo de cultivo

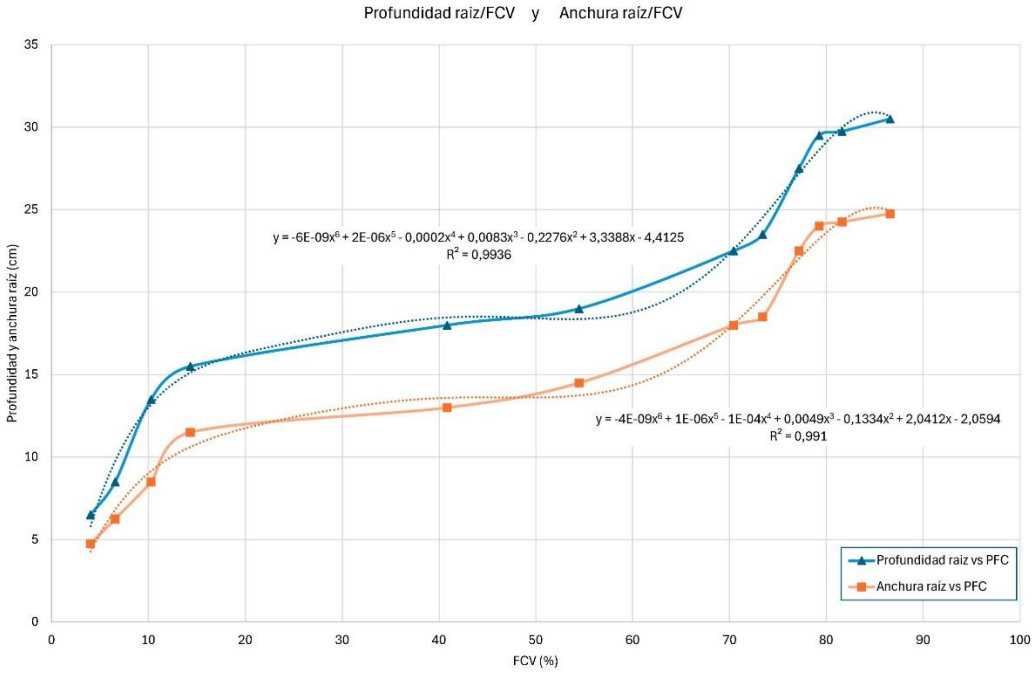


Figura 4. Evolución de la profundidad y anchura de la raíz de la planta en función de la FCV

Respuesta agronómica y gestión del riego para un cultivo de Bimi®

J.C. Abellaneda Pividal[1], V.M. Gallegos-Cedillo[2*], C.P. García-Ripoll[1], D.G. Fernández-Pacheco[3], M. Soler-Méndez[1], J.M. Molina-Martínez[1]

[1] Grupo de investigación de Ingeniería Agromótica y del Mar, Universidad Politécnica de Cartagena, C/ Ángel s/n, Ed. ELDI E1.06, 30203, Cartagena, Murcia.
[2] Grupo de investigación de Hortofloricultura Mediterránea, Universidad Politécnica de Cartagena, Paseo Alfonso XIII 48, 30203, Cartagena, Murcia.
[3] Departamento de Estructuras, Construcción y Expresión Gráfica, Universidad Politécnica de Cartagena, C/ Doctor Fleming s/n, 30202, Cartagena, Murcia.
* Autor para correspondencia: victor.gallegos@upct.es

Palabras clave: Soluciones basadas en datos, sensores edafoclimáticos, agricultura de precisión, riego, internet de las cosas.

Resumen

El cultivo de Bimi® requiere de una gestión agronómica precisa para maximizar su rendimiento y calidad. El objetivo de esta investigación ha sido utilizar sensores de presión y humedad del suelo junto con el uso de las tecnologías IoT, con el fin de recopilar variables edafoclimáticas y relacionarlas posteriormente con el desarrollo fenológico del cultivo de Bimi®. El experimento se llevó a cabo en una finca comercial de Bimi® ciclo otoño-invierno situada en la localidad de Lorca, Murcia (España). Las distintas variables edafoclimáticas se recogieron mediante sensores de humedad del suelo. Los datos climáticos se registraron a través de una estación meteorológica in situ. Se analizaron las medidas morfométricas de planta y el rendimiento final. También, se determinó el área foliar, el nivel de clorofila SPAD y el contenido iónico en planta. Por otro lado, se cuantificó y analizó el aporte nutricional del fertirriego semanalmente. Los resultados ecofisiológicos de las plantas obtenidos han permitido correlacionar las variables agroclimáticas con la optimización de la gestión del riego, para mejorar el uso eficiente del agua y nutrientes.

INTRODUCCIÓN

El agua es el recurso más preciado que posee la humanidad, y por ello es fundamental que, desde el sector primario, se adopten las medidas oportunas para utilizar eficientemente la cantidad de agua que los suelos son capaces de retener, permitiendo que los cultivos se desarrollen adecuadamente sin alcanzar su punto de marchitez. Actualmente, muchos profesionales del sector agrícola realizan el riego de sus cultivos basándose en criterios subjetivos que carecen de precisión.

La implementación de sistemas IoT para la gestión del riego ofrece una optimización de los recursos hídricos sin comprometer, e incluso incrementando en algunos casos, la productividad de una explotación agropecuaria. Estos sistemas integran sensores de humedad del suelo, estaciones meteorológicas y dispositivos de control que permiten monitorizar en tiempo real las condiciones del cultivo y del entorno. Gracias a la recopilación y análisis de datos precisos, es posible tomar decisiones informadas sobre cuándo y cuánto regar, ajustando el riego a las necesidades reales de los cultivos. La implementación de estos sistemas en un cultivo de Bimi® es vital atendiendo la coyuntura actual, en la que en las zonas dedicadas a este cultivo (levante peninsular) experimentan

cada vez temperaturas más extremas y una disponibilidad de agua más limitada.

MATERIALES Y METODOS

En este ensayo se ha utilizado un datalogger específico. Se instalaron sensores SDI-12 de humedad, temperatura y conductividad a dos profundidades(Topp et al., 1980), con el fin de analizar la humedad y temperatura del suelo de la manera más precisa posible. En los laterales de riego, se instaló un sensor de presión para determinar el número y la duración de los riegos. Los emisores de riego utilizados corresponden a goteros planos turbulentos con un caudal de 1,6 l/h. En cuanto a las variables climáticas, se instaló una estación meteorológica junto con otro datalogger. Esta estación medía la temperatura, la radiación, la humedad ambiental, la pluviometría y la velocidad y dirección del viento.

Los sensores empleados para el análisis del suelo corresponden al modelo TEROS 12 de la empresa Meter Group El equipo de suelo enviaba datos al servidor cada 15 minutos, mientras que la estación climática estaba conectada de forma continua, enviando datos cada 30 segundos, tiempo necesario para recopilar y transmitir la información.

Para determinar las condiciones del suelo, se recogieron muestras cada 30 días desde la fecha de trasplante y se enviaron a un laboratorio para analizarlas. De este modo, se pudieron calibrar los equipos de medida de parámetros del suelo y determinar las características propias del mismo. También se recogieron muestras de las soluciones nutritivas empleadas en cada uno de los riegos, con el fin de determinar la cantidad de aniones y cationes aportados al cultivo de Bimi®.

Para la calibración de los datos de humedad arrojados por los sensores TEROS 12, se utilizó una ecuación facilitada por el fabricante (tabla 1), para su implementación en suelos minerales.

Para la calibración de la CE, se elaboró un diagrama (figura 1) con la EC de referencia y la EC de los sensores a medida que fueron transcurriendo los días después del trasplante del Bimi®.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de este ensayo muestran, en primer lugar, la variación de la composición de aniones y cationes de las soluciones nutritivas a medida que fueron transcurriendo los días después del trasplante. Aun siendo la solución nutritiva, la misma durante todo el ensayo se observan ciertas variaciones que se podrían haber producido por el manejo del sistema de inyección y mezcla de fertilizantes en el cabezal de riego.

Después de la calibración de los sensores de suelo, los datos proporcionados por estos equipos demuestran su fiabilidad para monitorear la conductividad eléctrica del suelo (tabla 2)(Kizito et al., 2008), así como la humedad y la temperatura (tabla 3). Es importante destacar que, según el análisis de laboratorio, en este ensayo la capacidad de retención de agua del suelo es del 15%. Tal y como se muestra en la tabla 3, en todos los casos se ha aplicado un riego excesivo, ya que durante el ensayo no se registró precipitación acumulada.

CONCLUSIONES

El uso de sistemas de monitorización de recursos hídricos supone un avance significativo en cuanto al manejo del cultivo del Bimi®. Valores tan importantes como el contenido de volumen de humedad del suelo permiten optimizar la duración y el número de riegos que se aplicaran siempre que se respete la capacidad de retención de agua del mismo. Además, contar con sensores de

conductividad eléctrica correctamente calibrados ayuda a la hora de determinar las variaciones de este parámetro a lo largo de todo el ensayo sin necesidad de contrastar estos datos con los de las muestras de suelo analizadas en laboratorio.

Agradecimientos

Este estudio forma parte del Programa AGROALNEXT que ha sido financiado por MICIN con fondos NextGenerationEU (PRTR-C17.I1) y por la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia a través de la Fundación Séneca - Agencia de Ciencia y Tecnología de la Región de Murcia.

Referencias

Kizito, F., Campbell, C. S., Campbell, G. S., Cobos, D. R., Teare, B. L., Carter, B., & Hopmans, J. W. (2008). Frequency, electrical conductivity and temperature analysis of a low-cost capacitance soil moisture sensor. *Journal of Hydrology*, *352*(3–4), 367–378. https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2008.01.021

Topp, G. C., Davis, J. L., & Annan, A. P. (1980). Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Research*, *16*(3), 574–582. https://doi.org/10.1029/WR016I003P00574

Tabla 1. *Ecuación de la recta para la calibración de los sensores de suelo TEROS 12.*

Contenido volumétrico	Ecuación
CVA (m^3/m^3)	$3{,}879*10^{-4}$*RAW-0,695

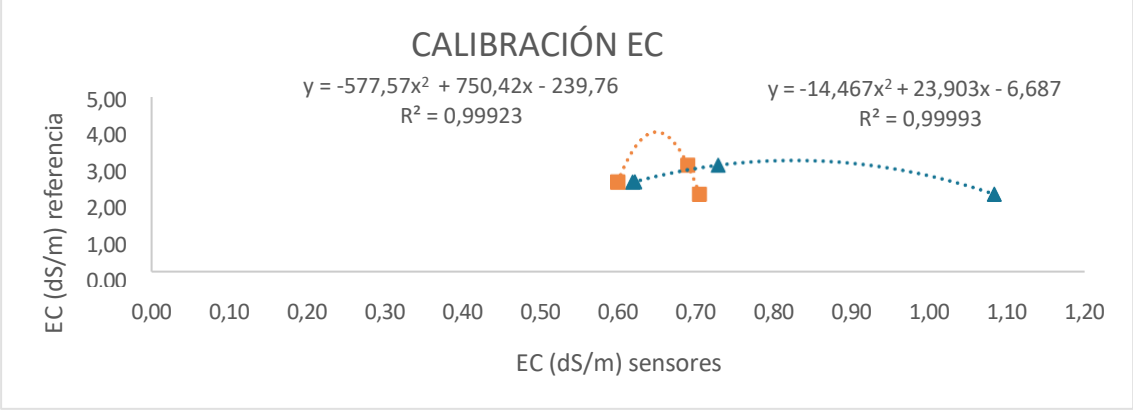


Figura 1. *Diagrama de dispersión para la calibración de los datos de los sensores de conductividad, siendo ■ los datos del sensor a 30 cm de profundidad y ▲ los datos del sensor a 15 cm de profundidad.*

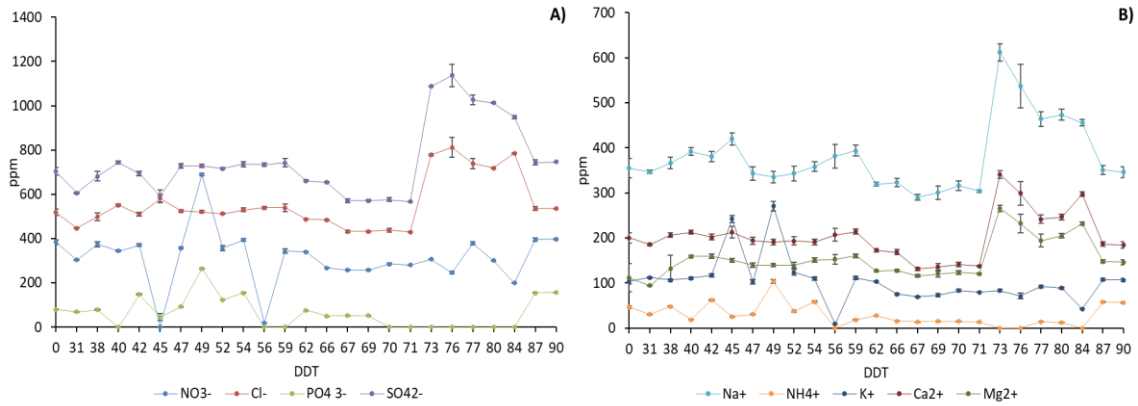


Figura 2. *Composición de A) aniones (ppm) y B) cationes (ppm) de la solución nutritiva suministrada al de cultivo de Bimi. DDT: Días después del trasplante.*

Tabla 2. *Datos de sensores EC (dS/m) a distintas profundidades trás la calibración.*

DDT	EC Sensor 15 cm (dS/m)	EC Análisis de suelo (dS/m)
0	3,05	3,05
30	2,57	2,58
60	2,58	2,57
90	2,23	2,23

Tabla 3. *Datos de sensores CVA (%) y T(ºC) a distintas profundidades tras la calibración.*

DDT	CVA Sensor 15 cm (%)	T Sensor 15 cm (ºC)	CVA Sensor 30 cm (%)	T Sensor 30 cm (ºC)
0	16	12,24	19	14,39
30	19	14,36	20	15,42
60	21	15,13	22	15,36
90	22	13,82	20	15,76

Seguimiento de la transpiración del almendro mediante técnicas de medida de flujo de savia y balance de energía en superficie.

Ll. Simón[1*]; J. M. Sánchez[2]; V. Jiménez[1]; F. Montoya[1]; J. González-Piqueras[2]; Á. Sánchez-Virosta[2]; Y. Pérez[2]; I. Buesa[3]; R. López-Urrea[3]

[1]Instituto Técnico Agronómico Provincial (ITAP), Parque Empresarial Campollano, 2º Avda. N.º 61, 02007, Albacete, España. lsj.itap@dipualba.es
[2]Universidad de Castilla-La Mancha (UCLM), Instituto de Desarrollo Regional, *Teledetección, Agronomía y Riego*, UCLM, Unidad Asociada al CSIC por el CIDE, Campus Universitario, 02071 Albacete
[3] CIDE, CSIC-UV-GVA, Ctra CV-315, km 10.7, 46113-Moncada, Valencia

Palabras Clave: radiometría térmica, necesidades hídricas, riego por goteo superficial, riego por goteo subterráneo, modelo STSEB.

Resumen

En los últimos años, al crecimiento de la superficie cultivada de almendro se ha unido un incremento de las plantaciones en regadío, por lo que, en zonas con escasez de recursos hídricos, como el SE de Castilla-La Mancha, es necesario optimizar el manejo del agua, para lo que conocer la transpiración de la planta (T_c) es fundamental. El objetivo de este estudio fue medir la transpiración de plantas adultas de almendro y comparar estas observaciones con las estimaciones de T_c obtenidas con una versión simplificada del modelo de balance de energía en superficie de dos fuentes (STSEB). El estudio se llevó a cabo en una plantación de almendros (*Prunus dulcis* (Mill.) D.A. Webb "Penta") de 12,5 ha plantados en 2018 (portainjertos GF-677) con un marco de 5 x 6 m (333 árboles/ha), regados por goteo (superficial y subterráneo) y dotada de una estación meteorológica y un conjunto de radiómetros térmicos. En 2023, se instalaron dos sensores de flujo de savia (IAS CHP-AG FSES+) en dos árboles de cada sistema de riego. Se siguió una programación de riegos basada en balance de agua en el suelo, evitando cualquier tipo de estrés hídrico. Los valores máximos de T_c medida se registraron en el mes de agosto, con valores medios oscilando entre 2,5 y 4,3 mm/día en riego superficial y 2,8 y 4,8 mm/día en subterráneo. Los resultados de T_c medidos con los sensores y estimados con el modelo mostraron una mejor correlación en los últimos meses de estudio, probablemente debida a la necesidad de estabilización de los sensores de flujo de savia. Es necesaria más investigación en próximas campañas para corroborar estas tendencias.

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial se cultivan más de 2,2 millones de ha de almendro, siendo España el primer país en superficie con más de 744.000 ha, seguido de EEUU con 534.000 ha, (MAPA, 2022). Sin embargo, el orden productivo no se corresponde con la superficie existente, siendo EEUU, y en concreto el estado de California, el mayor productor mundial con más de 2 millones de toneladas, un 55% de la producción mundial, mientras que en España se producen 365.200 t, un 9% de la producción mundial. Esto es debido a los bajos rendimientos medios obtenidos en nuestro país, con 490 kg/ha de pepita frente a los más de 4.000 kg/ha obtenidos en EEUU (FAOSTAT, 2023). La evolución total de la superficie de almendro en España a lo largo de la década pasada fue disminuyendo, período 2004-2014. A partir del año 2014 esta superficie ha mostrado un ascenso progresivo y continuado. Aunque el almendro es una especie capaz de convivir con el déficit

hídrico (Marsal et al., 1997), está aumentando la superficie de este cultivo en regadío para incrementar su productividad, en muchas ocasiones en zonas con una alta demanda evaporativa y escasas precipitaciones durante el ciclo del cultivo (Mañas et al., 2014). Sin embargo, en la zona de estudio, con unos recursos hídricos muy limitados, no es posible llevar a cabo estrategias de riego que cubran la demanda de agua potencial del almendro. Por este motivo, determinar las necesidades hídricas del almendro con la mayor precisión posible es fundamental para optimizar la programación del riego de este árbol frutal (Sánchez et al., 2021). El objetivo de este trabajo fue medir la transpiración de árboles adultos de almendro regados por goteo, superficial y subterráneo, utilizando sensores de flujo de savia y evaluar el desempeño del modelo simplificado de balance de energía de dos fuentes, STSEB (Sánchez et al., 2008).

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción de la zona de estudio

El estudio se llevó a cabo en una parcela comercial de almendros adultos de 12,5 ha ubicada en Hellín (Albacete) (38° 29' N, 1° 47' O, 550 m s.n.m.) (Fig. 1). El clima es mediterráneo templado semiárido. La precipitación media anual es de 320 mm, y la evapotranspiración de referencia (ET_o) acumulada anual alcanza los 1259 mm. El suelo se clasifica como Aridisol, con una textura franca.

Los almendros (*Prunus dulcis* (Mill.) D.A. Webb "Penta") se plantaron en 2018 sobre el patrón GF-677, con marco de plantación de 5 x 6 m (333 árboles ha^{-1}). Se diseñaron dos tratamientos para aplicar el 100% de las necesidades hídricas usando dos sistemas de riego por goteo, superficial y subterráneo, con una disposición aleatoria de bloques completos con cuatro repeticiones. Cada parcela constaba de 5 hileras con 6 árboles cada una (900 m^2 y 30 almendros). Las características del sistema de riego fue la siguiente: doble tubería de goteros autocompensantes de 4 l/h, separados 0,75 m, y a una distancia del eje de la planta de 0,70 m. la línea de goteros en el sistema de riego subterráneo se situó a unos 30 cm de profundidad. La pluviometría de ambos sistemas de riego fue de 1,8 mm/hora. Se realizó una programación de riegos diaria, basada en el balance de agua en el suelo sin restricción hídrica según FAO56 (Allen et al. 1998). Las necesidades hídricas o evapotranspiración del cultivo (ET_c) se han calculado a partir de la expresión: $ET_c = ET_o \times ((K_{cb} \times K_r) + K_e)$ siendo: K_{cb} el coeficiente de cultivo basal, que representa la transpiración del cultivo; K_e la componente evaporativa (Allen et al., 1998, 2005) y; K_r el factor de cobertura (Fereres et al., 1981), que relaciona el porcentaje de suelo sombreado y el porcentaje de gasto potencial de agua.

Instrumentación

En la parcela se instaló una torre meteorológica completa, a una altura entre 2,5 y 4,0 m sobre la superficie del suelo, y los datos meteorológicos se registraron cada 15 minutos pasándose posteriormente a escala horaria y diaria. Las variables medidas fueron las siguientes: radiación de onda corta incidente y reflejada en la superficie, radiación de onda larga descendente y ascendente, temperatura del aire/humedad relativa, velocidad y dirección del viento y precipitaciones. Además, se instalaron en un mástil 3 radiómetros de infrarrojo térmico (IRT) en cada uno de los sistemas de riego para la monitorización de la temperatura de la copa del almendro y del suelo. El conjunto completo de mediciones térmicas se completó con un sensor IRT adicional apuntando hacia el cielo. Para la corrección de efectos atmosféricos y de emisividad se siguió la metodología descrita en Sánchez et al. (2008). Cada 15-20 días se tomaron medidas de altura y diámetro de copa de árbol en ambos sistemas de riego, así como fotografías realizadas con dron para obtener la fracción de cobertura vegetal (f_c) del almendro, mediante el software CANOPEO (Patrignan y Ochsner, 2015). Con los datos de temperatura, f_c, altura, humedad, velocidad del viento y radiación se estimó la transpiración de los almendros adultos a través del modelo STSEB (Sánchez et al., 2021). Para las medidas del flujo de savia se ha utilizado el sistema IAS CHP-AG FSES+ desarrollado por el

IAS-CSIC de Córdoba (Testi y Villalobos 2009). El día 11 de abril de 2023 se instalaron dos sensores por árbol y en dos árboles de cada sistema de riego (goteo superficial y subterráneo). Estos sensores se basan en la técnica de pulso de calor compensado en combinación con la metodología de gradiente promedio calibrado para los rangos de bajas velocidades.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La T_c se monitoreó durante un total de 124 días, omitiéndose un periodo de 30 días durante el mes de julio debido a fallos en la alimentación del equipo (Fig. 2). Los valores máximos de T_c medida se registraron en el mes de agosto, con valores medios oscilando entre 2,5 y 4,3 mm/día en riego superficial y 2,8 y 4,8 mm/día en subterráneo. No se apreciaron diferencias significativas entre ambos sistemas de riego. En el conjunto de datos se observa que la T_c fue sobrestimada por el modelo STSEB en comparación a la medida mediante el flujo de savia en un 29% y 21%, resultando una raíz del error cuadrático medio (RMSE) de 1,7 y 1,4 mm/ para los tratamientos superficial y subterráneo, respectivamente; con coeficientes de determinación (R^2) de alrededor de 0,50 (Fig. 3). En cambio, si se estudian únicamente los últimos meses (agosto y septiembre), se observó una subestimación de la T_c del modelo de un 16% y 14%, con un RMSE 0,8 y 0,7 mm/día para riego superficial y subterráneo, respectivamente, con R^2 próximos a 0,85 (Fig. 3).

Los resultados de este estudio muestran la viabilidad del uso de sensores de flujo de savia para el seguimiento de la transpiración en el cultivo del almendro adulto y para evaluar la partición de la evapotranspiración que los modelos de balance de energía realizan entre las componentes evaporativa y transpirativa. Se observa la necesidad de estabilización en los sensores de flujo de savia en los primeros meses del ciclo. Con un segundo año de medidas (2024) se obtendrán resultados más robustos y se podrá profundizar este análisis.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por la Consejería de Educación, Cultura y Deporte, JCCM, España (proyectos PISATEL, SBPLY/21/180501/000070), junto con fondos FEDER. Y por la Agencia Estatal de Investigación con cofinanciación NextGenerationEU (proyecto TED2021–130405B-I00).

Referencias

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop Evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements, FAO Irrig. Drain. Paper 56, FAO, Rome, Italy, 300 pp.

FAOSTAT, 2023. FAO statistical database. http://www.fao.org/faostat/es (dic. 2023).

Fereres, E., Pruitt, W.O., Beutel, J.A., Henderson, D.W., Holzapfel, E., Shulbach, H. and Uriu, K. 1981. ET and drip irrigation scheduling. p. 8-13. In: E. Fereres (ed.), Drip Irrigation Management. University of California. Div. of Agric. Sci. No 21259.

Mañas, F., Lopez- Fuster, P., Lopez- Urrea, R. 2014. Effects of Differents Regulated and Sustrainer Deficit irrigation Strategies in Almond Production. Acta Horticulturae, 1028:391-394.

MAPA, 2022. Anuario de estadística. Avance de 2022. https://www.mapa.gob.es/es/estadistica/temas/publicaciones/anuario-de-estadistica/

Marsal, J., Girona, J., Mata M. 1997. Leaf wáter relation parameters in almond compared to hazelnut tres during a déficit irrigation period. J Amer Soc Hort Sci 122:582-857

Patrignani, A., & Ochsner, T. E. 2015. Canopeo: A Powerful New Tool for Measuring Fractional Green Canopy Cover. Agronomy Journal, 107(6), 2312–2320.

Sánchez JM, Kustas WP, Caselles V, Anderson M. 2008. Modelling Surface energy fluxes over maize using a two-source patch model and radiometric soil and canopy temperature

observations. Remote Sens Environ 112:1130-1143
Sánchez, J.M., Simón, L., González-Piqueras, J., Montoya, F., López-Urrea, R., 2021. Monitoring crop evapotranspiration and transpiration/evaporation partitioning in a Drip-irrigated young almond orchard applying a two-source surface energy balance model. Water 13, 2073.
Testi L, Villalobos FJ. 2009 New approach for measuring low sap velocities in trees. Agric For Meteorol 149:730-734



Fig. 1. Localización parcela de ensayo; estación meteorológica y sensores de flujo de savia

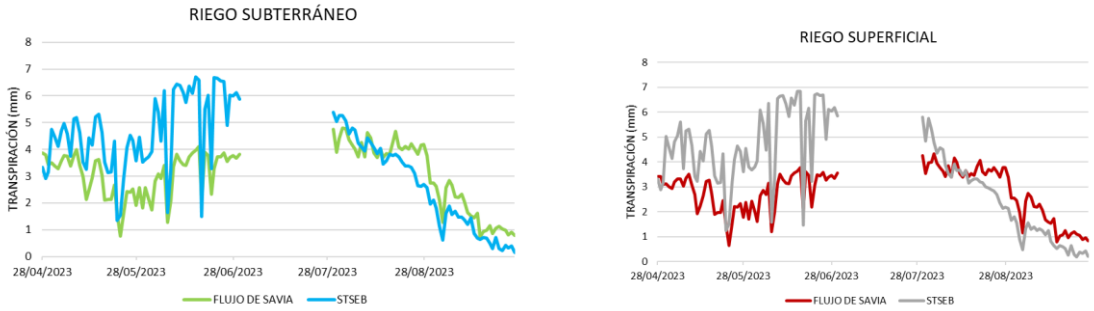


Fig. 2. Comparación de transpiración calculada con el modelo STSEB y medida con los sensores de flujo de savia, en un sistema de riego por goteo superficial vs riego subterráneo.

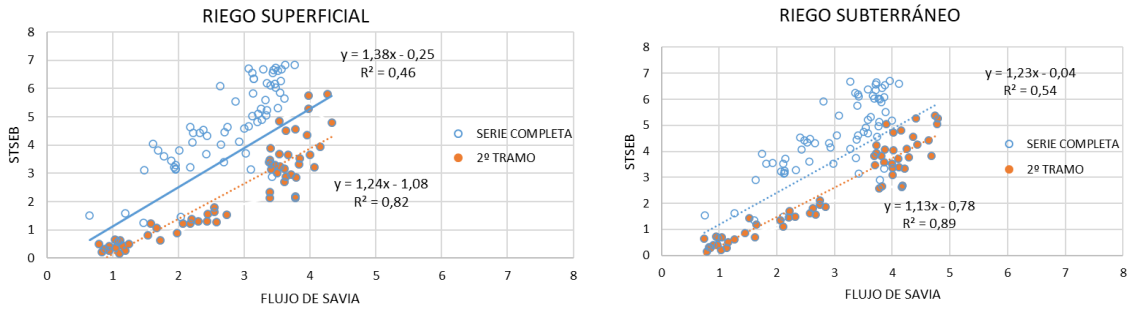


Fig. 3. Regresión lineal de la transpiración (mm) para el sistema de riego superficial y el subterráneo.

Análisis, diseño y cálculo de la instalación de alumbrado en sistemas agrovoltaicos de cultivos hortícolas.

A. Rodríguez Nicolás[1], F. J. Cánovas Rodríguez[2], F.J. Fernández Cañavate[3], J.M. Molina Martínez[1].

[1] Grupo de Investigación de Ingeniería Agromótica y del Mar, Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT), 30202 Cartagena, España; antonio.rodriguez@edu.upct.es , josem.molina@upct.es
[2] Dpto. de Automática, Ingeniería Eléctrica y Tecnología Electrónica, UPCT, C/Doctor Fleming s/n, 30202, Cartagena, Murcia. fcojavier.canovas@upct.es
[3] Dpto. de Estructuras, Construcción y Expresión Gráfica, UPCT, C/Doctor Fleming s/n, 30202, Cartagena, Murcia. francisco.canavate@upct.es

Palabras clave: generación de energía, paneles solares móviles, iluminación LED, sostenible, control automático, excedente de electricidad

Resumen

La creciente necesidad de optimizar los recursos energéticos en el sureste de España ha impulsado el desarrollo de sistemas "agrovoltaicos", que integran la producción agrícola con la generación de energía eléctrica. Nuestro innovador modelo presenta una estructura elevada de 4,5 metros, que permite instalar paneles fotovoltaicos móviles sobre los cultivos sin interferir en las labores agrícolas. Estos paneles se ajustan para regular la cantidad de luz natural recibida, complementándose con un sistema de iluminación LED cuando sea necesario. Las luminarias, en forma de campana, han sido seleccionadas para proporcionar la intensidad lumínica óptima para los cultivos de lechuga y melón en cada etapa de su desarrollo, adaptándose a las demandas de luz de cada fase fenológica. Utilizando el software DIALux Evo para la planificación y cálculo de la distribución lumínica, se ha dimensionado el sistema con lámparas de 50W y 6000 lúmenes. Estas luminarias pueden encenderse y apagarse de manera alternada, sincronizadas con el ajuste de las placas solares, para asegurar que se cubran las necesidades lumínicas máximas: en torno a 900 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ para el melón y 250 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ para la lechuga. De este modo, se garantiza que los cultivos reciban siempre la cantidad adecuada de luz, complementándose esta luz aportada con la ya proporcionada de manera natural por el sol.

INTRODUCCIÓN

Ante la necesidad, cada vez mayor, de agua y energía en el sur de Europa, y en particular en el sureste español, donde el alto potencial fotovoltaico se debe a la gran cantidad de horas de luz solar diaria, surge la posibilidad de fusionar la producción agrícola con la generación de energía. Este terreno, ya productivo en términos de cultivos hortícolas, tiene el potencial de integrarse con la producción eléctrica a través de lo que se denomina "Agrovoltaica", una innovadora rama que permite la coexistencia de ambas actividades. Esta integración plantea una serie de preguntas y desafíos que requieren soluciones variadas y específicas. En el presente trabajo, se aborda un aspecto que, aunque ha sido estudiado en entornos cerrados como invernaderos, ha recibido poca atención en entornos abiertos.

En nuestro caso, la propuesta consiste en una estructura de aproximadamente 4,5 metros de altura, que permite el paso de maquinaria agrícola sin interferencias, y que albergará una

instalación fotovoltaica innovadora en su cubierta. La característica distintiva de este sistema es que la mitad de las placas solares son móviles, lo que nos permite gestionar su movimiento con el fin de optimizar el rendimiento del cultivo, que es la prioridad, junto con la generación de la máxima energía eléctrica posible.

Se presentan situaciones en las que puede ser más eficiente cerrar completamente las placas móviles, bloqueando así la entrada de luz natural al cultivo, o bien, abrirlas parcialmente, creando áreas de sombra y luz directa. Dada esta compleja dinámica, se ha diseñado una instalación de iluminación artificial basada en tecnología LED, con el objetivo de asegurar que, independientemente del grado de apertura de las placas, el cultivo reciba siempre el aporte lumínico adecuado para su desarrollo óptimo. Este sistema evitará tanto la sobreexposición como la insuficiencia de luz. Para lograr esto, se han considerado aspectos como el consumo energético, la eficiencia lumínica, el espectro y la temperatura de color de las lámparas. Además, el control automatizado de las luminarias, apoyado por sensores estratégicamente ubicados, permitirá regular la intensidad de la iluminación según las necesidades del cultivo en cada momento.

Este análisis, diseño y cálculo forman parte de una solución integral cuyo objetivo es asegurar la viabilidad económica de la instalación, haciendo que la propuesta sea rentable y sostenible a largo plazo en el sector hortícola. En definitiva, este trabajo presenta el método seguido, las dificultades encontradas y las soluciones alcanzadas para obtener el máximo rendimiento tanto del cultivo como de la instalación fotovoltaica. Así, no solo se cubrirán las necesidades de autoconsumo energético (un porcentaje mínimo destinado al alumbrado), sino que también se generará un excedente de electricidad que podrá ser comercializado, unificando la producción agrícola y energética en este innovador modelo "Agrovoltaico".

MATERIAL Y MÉTODOS

Punto de partida. Se parte de una parcela 15×20 m, cultivada de hortalizas, sobre la que se levanta nuestro sistema fotovoltaico, teniendo este una altura, desde la superficie del suelo, de 4,5 m. La zona de estudio, será la parte central de dicha estructura, para minimizar los efectos borde, es decir, minimizar los efectos medio ambientales especialmente existentes en la zona cercana a los laterales de nuestra estructura.

Software Utilizado. Para el modelado y simulación se utilizará el programa DialuxEVO. Representando en el mismo la estructura tridimensional diseñada, para así estudiar y simular el comportamiento de nuestra instalación de alumbrado con las soluciones localizadas en el mercado, en cuanto a lámparas –luminarias-, con sus potencias (W), y flujos lumínicos (lux) necesarios para cada cultivo.

Dimensionado. En el momento del dimensionado se tendrá en cuenta las necesidades lumínicas de los cultivos propuestos, siendo estos, lechuga (*lactuca sativa* var. little gem) y melón (*cucumis melo* var. piel de sapo). Dado que este último cuenta con unos requerimientos más elevados, este será nuestro factor limitante de cara al cálculo. Revisando bibliografía se determinará que la luz máxima demandada por algunas variedades de melón puede ascender hasta 600 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ [1], en nuestro caso, no se conoce la demanda máxima de nuestra variedad, por lo que se tomará como referencia de diseño el valor de 700 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$[3].

Para la interpretación de los modelos proporcionados por DialuxEVO se utiliza el siguiente procedimiento de Riley [2], que nos permite estimar el factor de conversión de luxes a $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$.

El factor de conversión (fc), que nos relacionará nuestros luxes y nuestro PPFD (µmol·m-

2·s-1), se calculará tal que, $f_c = \frac{\sum(SPD \cdot AS)}{\sum SPD}$

Realizado los cálculos a partir de la *tabla 1*, se obtiene un $f_c \approx 0{,}76$, determinando pues los luxes necesarios, tal que se cumple que $PPFD\left(\frac{\mu mol}{m^2 \cdot s}\right) = PPFD\ (lux) \cdot f_c$

Concluyendo que, los luxes necesario serán aproximadamente 900 lux, para abastecer al cultivo de melón en su totalidad, junto con el de lechuga.

Modelizado. A partir de estudiar las diversas soluciones que aparecen en el mercado, considerando el consumo energético, la eficiencia lumínica, el espectro y la temperatura de color de las lámparas, se escoge como opción óptima una luminaria con forma de campana, y cuyas características técnicas se reflejan en la Tabla 2.

RESULTADOS

A partir de la luminaria tomada como referencia se procede a la modelización en DialuxEVO. Dado que la estructura de partida consta de 7 cerchas expresamente colocadas para la iluminación. Tras valorar diversas disposiciones sobre las limitaciones definidas, se llega a una disposición de 8 luminarias por cercha, obteniendo así la distribución lumínica reflejada en la fig. 2.1 en luxes. Para cubrir las necesidades de la lechuga sin excedernos se idea un sistema de encendido y apagado de lámparas al tresbolillo con el que la distribución lumínica quedaría tal como se muestra en la fig. 1.b. Para ambos cálculos se considera una altura de cultivo máxima de 20 cm y una altura desde el suelo a la cercha de 4,20 m, teniendo pues una distancia teórica de la fuente de luz a la planta de 4 m.

CONCLUSIÓN

En síntesis, se obtiene un modelado que nos suple las necesidades máximas requeridas por nuestros cultivos. Habiendo fijado como techo 900 lux en el cultivo del melón, y reduciendo este valor a menos de la mitad para el cultivo de la lechuga, la cual puede llegar a tener una demanda de 250 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ [4], lo que se traduce a unos 330 lux, suplementados correctamente con la mitad del alumbrado encendido al tresbolillo, ilustrado en la fig.2.b. Cabe destacar que este diseño está pensado para aportar las íntegramente los requerimientos lumínicos de las plantas propuestas, pero en la aplicación de campo todo este sistema va a tener una función complementaria a los aportes lumínicos naturales provenientes desde el sol. Ya que en ciertos momentos las placas se solaparán alternativamente, permitiendo el paso de radiación solar. Dejando a su vez zonas sombreadas, en las que las lámparas añadirán esa energía restante. Considerándose fundamentalmente los aspectos relacionados el consumo energético y la eficiencia lumínica. En este sentido, encontrar fuentes lumínicas que cumplieras las restricciones de longitudes de onda, potencia y precio, no fue tarea simple.

Agradecimientos

Este estudio forma parte del Programa AGROALNEXT que ha sido financiado por MICIU con fondos NextGenerationEU (PRTR-C17.I1) y por la Fundación Séneca con fondos de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia (CARM).

Referencias

[1] Chen, N., Gan, Y., & Wang, G. (2003). Photosynthetic responses of muskmelon *(Cucumis melo L.)* to photon flux density, leaf temperature and CO2 concentration. Canadian Journal of Plant Science, 83(2), 393-399. https://doi.org/10.4141/P02-124

[2] Riley, M. (2023, marzo 14). What is PPFD and DLI. Cutter Electronics. https://www.cutter.com.au/horticulture-design/what-is-ppfd-and-dli/
[3] Planificación de la iluminación de las plantas | Crescience. (2020, marzo 26). https://cre.science/es/lonas-de-iluminacion-para-plantas/
[4] Boros, I. F., Székely, G., Balázs, L., Csambalik, L., & Sipos, L. (2023). Effects of LED lighting environments on lettuce (Lactuca sativa L.) in PFAL systems – A review. Scientia Horticulturae, 321, 112351. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112351

Tabla 1. Longitudes de onda (λ), distribución de potencia espectral (SPD) y espectro de acción (AS), para una lámpara LED de 3000 K de temperatura de color.

λ (nm)	SPD (W/nm)	AS
400	0,05	0,25
500	0,15	0,75
600	0,4	0,9
700	0,2	0,6

Tabla 2. Características técnicas de lampara seleccionada

Característica	Valor
Potencia LED	50W ±1%
Tono de luz	CCT (3000K + 4000K + 6000K),
Eficiencia luminaria	120 Lm/W
Luminosidad (Lm)	6.000 ± 5%

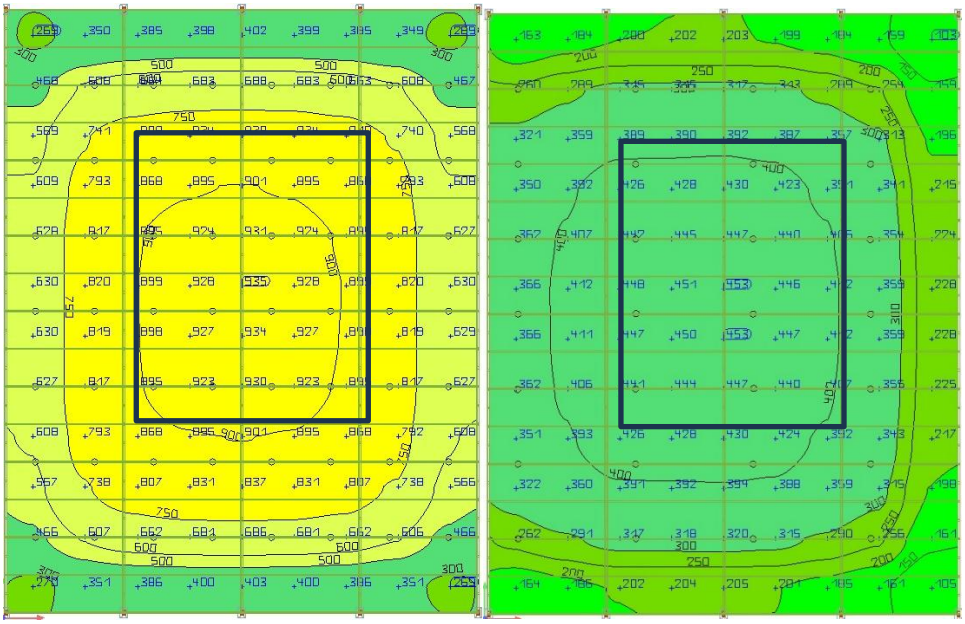


Figura 1. a) Distribución lumínica en lux, para 8 lampara encendidas por cercha (imagen izquierda) y b) para 4 lámparas con encendido al tresbolillo (imagen derecha).

Influencia del sombreado sobre los cultivos de acelga, borraja y puerro

A. Arroyo-García[1], J. Casanova-Gascón[2], P. Martín-Ramos[1], L. M. Navas-Gracia[1,*]

[1] Departamento de Ingeniería Agrícola y Forestal, Universidad de Valladolid. ETSIIAA, Avenida de Madrid 44, 34004 Palencia
[2] Departamento de Ciencias Agrarias y del Medio Natural, Universidad de Zaragoza. EPS, Carretera de Cuarte s/n 22071 Huesca.

Palabras clave: evapotranspiración, fotosíntesis, intercepción lumínica, AquaCrop, SketchUp, Skelion, modelización agronómica

Resumen

La agrovoltaica, que combina la producción agrícola con la generación de energía solar, emerge como una solución prometedora para optimizar el uso del suelo y mejorar la eficiencia de los recursos. Este estudio investiga la influencia del sombreado parcial en la producción de tres cultivos —acelga, borraja y puerro— en Tabernas de Isuela, Huesca. La estructura de un sistema de agrovoltaica con instalaciones fijas sobre el cultivo se simuló mediante lonas de sombreado (80% de opacidad) sobre una de las aguas del tejado de un antiguo invernadero. Se utilizó SketchUp con la extensión Skelion para modelar la estructura y calcular la reducción de radiación solar incidente, y AquaCrop para estimar el crecimiento de cultivos con y sin sombreado. Los resultados de las simulaciones mostraron pérdidas de radiación entre 33,8% y 45,9%, dependiendo de la época del año, con reducciones asociadas en la producción de biomasa de 7,9% a 8,5% bajo condiciones de sombreado: de 10,7 a 9,8 t/ha en acelga, de 8,2 a 7,5 t/ha en borraja, y de 10,1 a 9,3 t/ha en puerro. Sin embargo, el sombreado redujo la evapotranspiración y mejoró la eficiencia en el uso del agua entre un 16,7% y 20,6% (de 3,6 a 4,2 kg/m³ para la acelga, de 3 a 3,6 kg/m³ para la borraja, y de 3,4 a 4,1 kg/m³ en el puerro). Los resultados experimentales de una campaña mostraron pérdidas de peso mayores que en las simulaciones, especialmente en acelga (15,3–22,2%) y puerro (18,3–33,2%). Estos hallazgos sugieren que la metodología propuesta puede ser útil para optimizar sistemas agrovoltaicos, aunque se requiere un ajuste cuidadoso de los parámetros de AquaCrop.

INTRODUCCIÓN

El uso masivo de combustibles fósiles y sus efectos sobre el cambio climático están impulsando la transición hacia las energías renovables. Los escenarios climáticos del IPCC prevén aumentos de hasta 5 °C en las temperaturas estivales y reducciones del 20% en las precipitaciones primaverales y estivales en las regiones mediterráneas (Romero et al., 2023). Esto plantea un doble desafío: la necesidad de generar energía limpia y mantener la producción agrícola bajo condiciones climáticas más adversas.

La agrovoltaica, que combina la producción agrícola con la generación de energía solar fotovoltaica en la misma superficie, emerge como una solución innovadora (Goetzberger y Zastrow, 1982). Este sistema puede aumentar la eficiencia del uso de la tierra entre un 56-70% (Trommsdorff et al., 2021), aunque su implementación requiere evaluar cuidadosamente los efectos del sombreado sobre los cultivos. Estudios previos han mostrado que el sombreado parcial puede reducir la evapotranspiración hasta un 30% y mejorar el estado hídrico de algunos cultivos

hortícolas (Weselek et al., 2021), si bien los rendimientos pueden verse afectados dependiendo de la especie y el diseño del sistema.

Los estudios sobre cultivos hortícolas bajo sistemas agrovoltaicos son aún limitados en España. El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto del sombreado sobre el desarrollo y rendimiento de tres cultivos hortícolas (acelga, *Beta vulgaris* var. *cicla*; borraja, *Borago officinalis*; y puerro, *Allium ampeloprasum* var. *porrum*) mediante una combinación de mediciones experimentales y modelización, con el fin de optimizar el diseño de futuros sistemas agrovoltaicos en condiciones mediterráneas.

MATERIAL Y MÉTODOS

Área de estudio y diseño del ensayo

El ensayo se realizó en Tabernas de Isuela (Huesca: 42°03'19"N 0°24'39"O) durante 2023. Se simuló un sistema agrovoltaico mediante lonas de sombreado (80% opacidad) sobre una estructura tipo invernadero orientada Norte-Sur. Se plantaron cinco filas de plantas hortícolas bajo la estructura, con una densidad de 8 plantas/m² y un espaciamiento de 30 cm entre plantas y 1 m entre hileras. El manejo fue convencional adaptado a agricultura ecológica, con riego por goteo cada 3 días.

Material vegetal y muestreo

Se evaluaron acelga (*Beta vulgaris* var. *cicla*), borraja (*Borago officinalis*) y puerro (*Allium ampeloprasum* var. *porrum*), plantados el 15/06/2023 y cosechados el 5/12/2023. La plantación se realizó con cepellón, sin separar los individuos en puerro (2-3 por cepellón). Para cada especie, se determinó el peso fresco y seco (65 °C, 48 h) para evaluar el efecto del sombreado.

Simulación y modelización

Se utilizó SketchUp 2024 con la extensión Skelion para modelar la estructura y calcular la reducción de radiación incidente (Fig. 1*a*). La simulación del crecimiento de los cultivos se realizó con AquaCrop 7.1, usando datos meteorológicos diarios de la estación de Huesca (AEMET) y los parámetros de sombreo obtenidos. Se compararon escenarios con y sin sombreado para evaluar la producción de biomasa y la eficiencia en el uso del agua.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Simulación del sombreado

La simulación con SketchUp (Fig. 1) mostró que las pérdidas de radiación solar variaron estacionalmente, desde un mínimo del 33,8% en diciembre hasta un máximo del 45,9% en julio. El período de mayor sombreado coincidió con los meses de mayor radiación (junio-septiembre, 42,2-45,9%), mientras que los valores mínimos se registraron en invierno (33,8-36,8%). Este patrón puede resultar beneficioso al proporcionar mayor protección durante los períodos de máximo estrés térmico y radiativo.

Simulación del crecimiento y uso del agua

La modelización con AquaCrop (Tabla 1) mostró una reducción media de biomasa del 8% bajo sombreado para los tres cultivos. Sin embargo, la evapotranspiración disminuyó un 22-24%, resultando en una mejora significativa de la eficiencia en el uso del agua de entre un 16,7% y 20,6%. El puerro mostró la mayor sensibilidad al sombreado en términos de producción, mientras que la acelga presentó la mejor adaptación en términos de eficiencia hídrica.

Resultados experimentales

Las pérdidas de peso fresco a seco bajo sombreado fueron variables según el cultivo: 15,3-22,2% en acelga, 18,3-33,2% en puerro, mientras que en borraja el peso fresco medio por planta varió de 0,65-0,70 kg al aire libre a 0,76-0,92 kg en la zona sombreada. El crecimiento excesivamente denso de la borraja (con tasas de supervivencia del 90-100%) limitó el desarrollo individual de las plantas, lo que pudo enmascarar el efecto real del sombreado. Se observó también que la altura y densidad foliar de la borraja fue mayor en la zona sombreada, aunque este efecto podría estar más relacionado con el sombreado entre plantas que con el sistema de sombreo artificial.

Estos resultados coinciden parcialmente con estudios previos que muestran reducciones de rendimiento del 5-10% en cultivos bajo sistemas agrovoltaicos (Weselek et al., 2021), aunque con mejoras significativas en la eficiencia del uso del agua (Elamri et al., 2018). El comportamiento diferencial de la borraja es similar al observado por Dupraz (2023) en otros cultivos de hoja ancha bajo sombreo, donde el aumento de área foliar puede compensar parcialmente la reducción de radiación disponible.

La metodología propuesta, basada en herramientas software gratuitas y de fácil manejo como SketchUp, Skelion y AquaCrop, permite evaluar de forma sencilla y reproducible la viabilidad de sistemas agrovoltaicos en cultivos hortícolas. Sin embargo, las diferencias observadas entre las predicciones del modelo y los resultados experimentales señalan la necesidad de incorporar las interacciones microclimáticas y entre plantas en los modelos de simulación, desarrollar parámetros específicos por cultivo para las condiciones de sombreado parcial y realizar ensayos multianuales que contemplen diferentes configuraciones de diseño y densidades de plantación. La integración de análisis económicos que consideren tanto la producción agrícola como la energética será también fundamental. La optimización de estos aspectos resultará clave para el desarrollo e implementación exitosa de sistemas agrovoltaicos en regiones mediterráneas.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Gobierno de Aragón a través del Programa de Desarrollo Rural (PDR) para Aragón 2014-2020 (GCP-2021-0039-01), dentro del proyecto "Grupo de Cooperación Agrovoltaica en el Altoaragón: ensayo en plantas aromáticas y hortícolas", y por el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, a través del “Grupo operativo para estudio de la integración de sistemas de producción fotovoltaica en cultivos de regadío, gestionado por sistemas inteligentes de gestión irrivoltaica (VOLTAGRO)”. A. Arroyo-García agradece la financiación del Programa Investigo Castilla y León

Referencias

Dupraz, C. 2023. Assessment of the ground coverage ratio of agrivoltaic systems as a proxy for potential crop productivity. Agrofor. Syst. 97:387-404.

Elamri, Y., Cheviron, B., Lopez, J.M., Dejean, C. y Belaud, G. 2018. Water budget and crop modelling for agrivoltaic systems: Application to irrigated lettuces. Agric. Water Manag. 208:440-453.

Goetzberger, A. y Zastrow, A. 1982. On the coexistence of solar-energy conversion and plant cultivation. Int. J. Sol. Energy 1:55-69.

Romero, J., Lee, H. y Core Writing, T. 2023. AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023. IPCC, Geneva.

Trommsdorff, M., Kang, J., Reise, C., Schindele, S., Bopp, G., Ehmann, A., Weselek, A., Högy, P. y Obergfell, T. 2021. Combining food and energy production: Design of an agrivoltaic system applied in arable and vegetable farming in Germany. Renew. Sustain. Energy Rev. 140:110694.

Weselek, A., Bauerle, A., Hartung, J., Zikeli, S., Lewandowski, I. y Högy, P. 2021. Agrivoltaic system impacts on microclimate and yield of different crops within an organic crop rotation in a temperate climate. Agron. Sustain. Dev. 41:1-14.

Tabla 1. Resultados de AquaCrop en la simulación con sombreo y sin sombreo

Cultivo	Biomasa (t/ha)		Productividad del agua evapotranspirada (kg/m^3)	
	Sin sombreo	Con sombreo	Sin sombreo	Con sombreo
Acelga	10,72	9,85	3,56	4,23
Borraja	8,25	7,58	3,02	3,59
Puerro	10,10	9,28	3,44	4,09

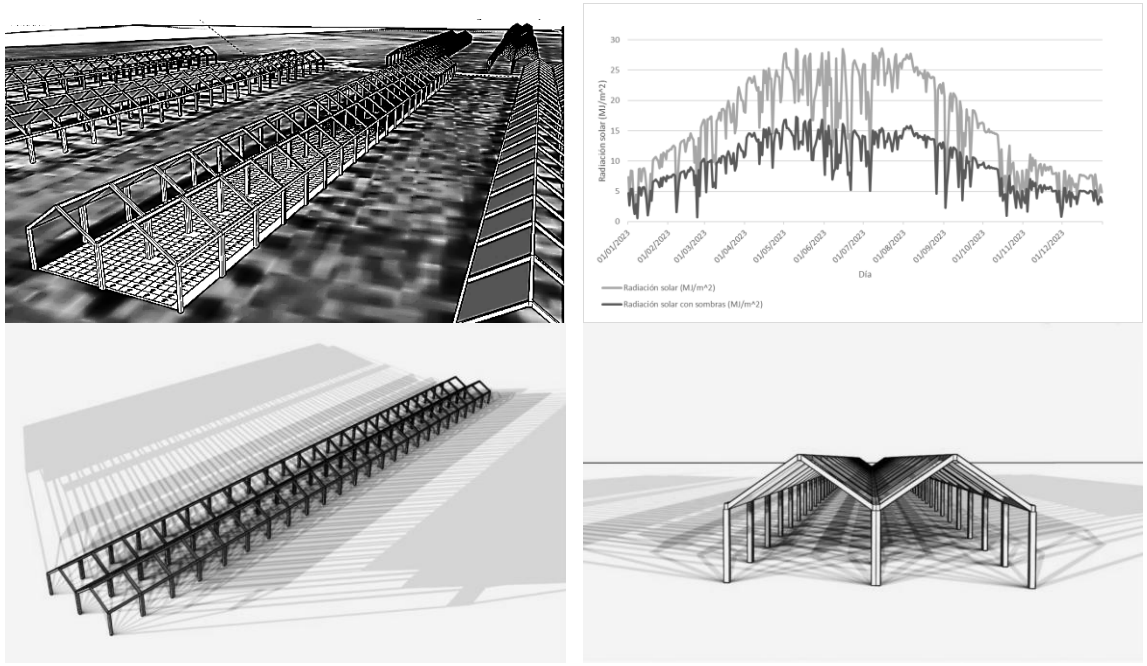


Fig. 1. Simulación del sistema agrovoltaico: (a) modelo 3D en SketchUp de la estructura y malla de sombreo; (b) comparación de la radiación solar incidente diaria con y sin sombreo; (c-d) proyección de sombras.

Dinámica de fluidos computacional bidimensional en tiempo real para invernaderos tipo Almería

Zhang Chunhao[1,2*], Francisco García-Mañas[1], Francisco Rodríguez[1], Li Ming[2]

[1] Departamento de Informática, ceiA3, CIESOL, Universidad de Almería, 04120 Almería, España

[2] Research Center of Information Technology, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences/ National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture/ National Engineering Laboratory for Agri-product Quality Traceability/ Meteorological Service Center for Urban Agriculture, China Meteorological Administration- Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing, China 100097

*Autor de correspondencia: cz917@inlumine.ual.es

Palabras clave: Horticultura en invernaderos, monitorización en tiempo real

Resumen: El sector de la horticultura en invernadero está utilizando cada vez más técnicas de visualización virtual para mejorar la supervisión de la producción, centrándose en conseguir una monitorización en tiempo real. Este estudio examina el comportamiento térmico y de ventilación de un invernadero tipo Almería situado en las instalaciones de AgroConnect. Se utiliza el método de dinámica de fluidos computacional (CFD) para modelar y simular la distribución ambiental en el interior del invernadero. La simulación tiene en cuenta diferentes variables y las simplifica, como el complejo efecto de la ventilación natural o la influencia del calor sensible y latente del cultivo, entre otras. El modelo CFD está conectado con MATLAB para abordar el ajuste de bloques o superficies en un modelo 2D y adaptarlo a los procesos dinámicos del invernadero real. Los resultados muestran que una representación simplificada de la temperatura del invernadero mediante el enfoque presentado cumple los requisitos de tiempo real y precisión y puede aplicarse para el futuro diseño de estrategias de control automático.

INTRODUCCIÓN

Las instalaciones agrícolas de alta tecnología, caracterizadas por la industrialización, son el futuro de la horticultura de invernadero, y en ellas se puede destacar la aplicación de métodos de dinámica de fluidos computacional (CFD) y sistemas de monitorización ambiental. Sin embargo, la diversidad de diseños y condiciones de funcionamiento dificulta la integración de CFD y otras tecnologías en los invernaderos (Pierre-Emmanuel et al., 2022). Además, las interfaces de funcionamiento dicha tecnología suelen ser poco intuitivas y difíciles de adaptar a la producción real. Para aplicar un sistema CFD visual en un invernadero tipo Almería e integrar otras tecnologías como sistemas de control y monitorización, este trabajo modela la dinámica de un invernadero con ventilación natural mediante CFD y lo combina con un script automatizado en MATLAB consistente en una TUI (interfaz de usuario basada en texto). Esto proporciona un mecanismo para ejecutar automáticamente un modelo CFD y generar un mapa

de distribución de la temperatura del invernadero en dos dimensiones. Además, dicho enfoque permite un alto grado de parametrización, lo que mejora su adaptabilidad. La principal contribución de este trabajo es el diseño de un sistema automatizado basado en CFD que puede aplicarse a un invernadero tipo Almería para realizar tareas de monitorización y control con un tiempo de muestreo de cinco minutos.

MATERIALES Y MÉTODOS

1. Invernadero de AgroConnect

Para las experiencias presentadas en este artículo, se utilizó el invernadero experimental de AgroConnect (https://agroconnect.es/), situado junto a la Universidad de Almería, España. Posee seis ventanas cenitales y siete ventanas laterales (Cañadas-Aránega et al., 2024). Los sensores están colocados como se muestra en la Figura 1.

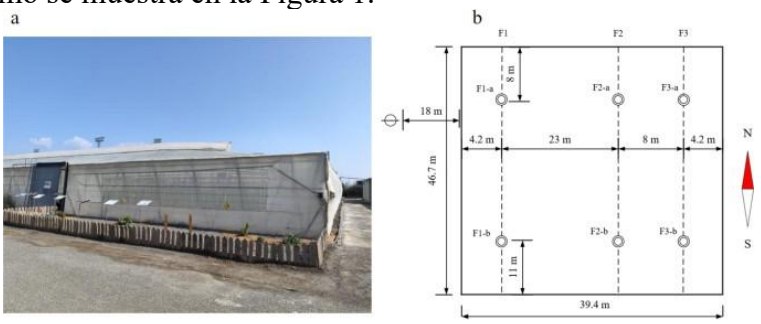


Figura 1. (a) Invernadero y (b) localización de los sensores; ◎ F1-a ... F3-b seis sensores de temperatura y humedad; ⊖:Estación de clima exterior: temperatura, humedad, radiación solar, velocidad y dirección del viento.

2. Modelo CFD del invernadero

Considerando las condiciones meteorológicas exteriores locales (Molina-Aiz et al., 2009), el modelo 3D del invernadero se simplifica en tres modelos 2D independientes sin grosor (Figura 2) con seis ventilaciones cenitales y tres laterales. Las cuatro ventilaciones laterales restantes se consideran mediante un archivo UDF (función definida por el usuario). Las ventanas se dividieron en diez dominios equidistantes y su movimiento se simplificó como una variación de los parámetros del medio poroso en un dominio determinado (tres de ellos están en el modelo geométrico y los otros cuatro se simplificaron mediante un modelo 1D).

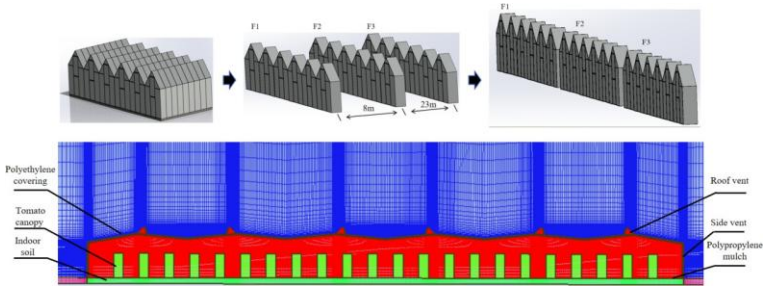


Figura 2. Modelos geométricos 2D y mallas. F1, F2, F3 son tres modelos 2D independientes.

3. Software

Para implementar el sistema propuesto es necesario utilizar MATLAB (The MathWorks, EE.UU.) para ejecutar los cálculos para generar mapas de distribución de temperatura y Ansys Fluent (Ansys, EE.UU.) para el modelo CFD. Evidentemente, el planteamiento presentado en este trabajo requiere una integración y combinación adecuadas de ambas herramientas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. Arquitectura hardware and software

Como se muestra en la Figura 3, tras recibir las instrucciones parametrizadas, el script automatizado se ejecuta en la capa de preprocesamiento. El paso de parámetros se compila en una TUI y Fluent la ejecuta directamente. El cálculo de alto rendimiento se asigna a MATLAB para su procesamiento mediante el sistema de acoplamiento ES (Simulación de energía)-CFD (Yamamoto et al., 2023), que se incrusta en el archivo UDF en forma de constantes. Los resultados del cálculo son procesados por la capa de posprocesamiento en MATLAB y devueltos a una base de datos. Hay que destacar que el intercambio de datos entre Fluent y MATLAB forma una relación de acoplamiento. Por ejemplo, la simulación CFD proporciona parámetros como la temperatura límite utilizada en la simulación de energía. A su vez, el modelo ES transmite el calor latente y calor sensible del cultivo al modelo CFD.

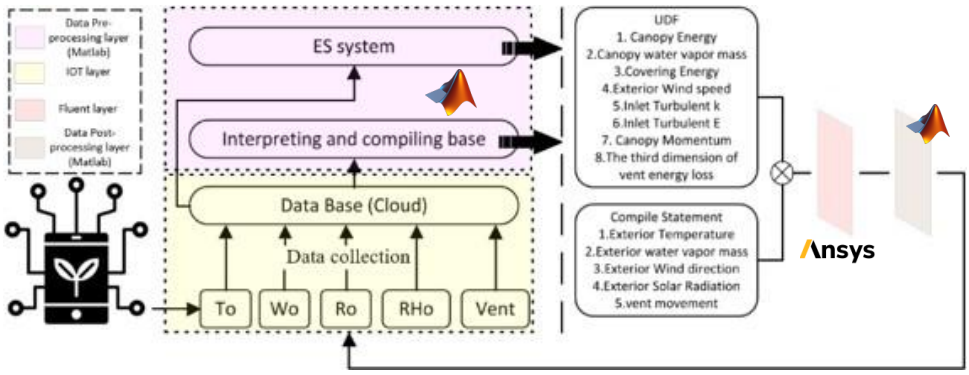


Figura 3. Arquitectura. *MATLAB* se utiliza en las áreas roda y amarilla. *Fluent* se utiliza en la zona naranja.

Ejemplo de mapa de distribución de la temperatura en el invernadero

La Figura 4 muestra cómo se simula el efecto de la apertura de una ventana cenital en el modelo CFD. El mapa 2D muestra la distribución de la temperatura en el interior del invernadero como consecuencia de la apertura de dicha ventana y del clima exterior. Se trata de una información valiosa que puede utilizarse para tareas como el control, la supervisión o la optimización del proceso hortícola.

CONCLUSION

Mediante *MATLAB*, el script automático simplifica y parametriza el complejo diseño original y las condiciones de funcionamiento de un modelo CFD, lo que facilita la integración

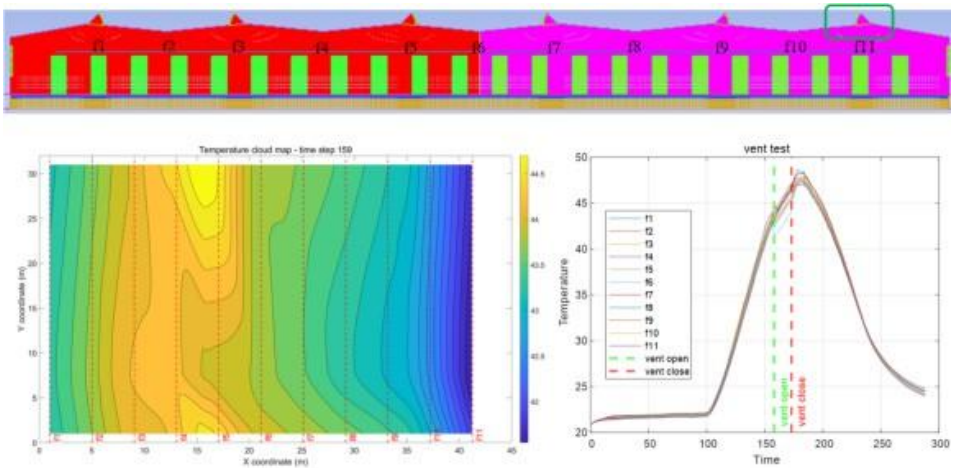


Figura 4. Mapa de temperaturas a 2 m por encima del suelo (abriendo sólo la primera ventana cenital de la derecha); f1-f11: puntos de recogida de datos. Tres modelos 2D con un total de 33 puntos de recogida de temperaturas.

de otras técnicas como el control y la monitorización, a la vez que permite generar mapas de temperatura en tiempo real cuya precisión depende del número de bloques bidimensionales y de la densidad de puntos donde se recogen los resultados de los cálculos. En futuros trabajos, este método se integrará en una plataforma IoT para el intercambio de datos en tiempo real y para diseñar e implementar el diseño de un controlador distribuido multiobjetivo (distintas ventanas). Los desafíos de diseño incluyen lidiar con la complejidad de simular el efecto de la ventilación cuando se utilizan múltiples ventanas simultaneamente y la necesidad de un mayor número de experimentos para diseñar un controlador adecuado del clima del invernadero.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero del programa del Consejo de Becas de China (nº 202209505003). Este trabajo es un resultado del proyecto CyberGreen, PID2021- 122560OBI00, y de AgroConnect.es, EQC2019-006658-P, ambos financiados por MCIN/AEI/ 10.13039/501100011033 y por FEDER A way to make Europe.

BIBLIOGRAFIA

B. Pierre-Emmanuel, R. Fernando, Advances of Computational Fluid Dynamics (CFD) applications in agricultural building modelling: Research, applications and challenges, *Computers and Electronics in Agriculture*, 201, 2022, 107277.

F. Cañadas-Aránega, J.C. Moreno, J.L. Blanco-Claraco, G. Antonio, F. Rodríguez, J. Sánchez-Hermosilla, Autonomous collaborative mobile robot for greenhouses: Design, development, and validation tests, *Smart Agricultural Technology*, 9, 2024, 100606.

F. D. Molina-Aiz, D.L. Valera, A.A. Peña, J.A. Gil, A. López, A study of natural ventilation in an Almería-type greenhouse with insect screens by means of tri-sonic anemometry, *Biosystems Engineering*, 104, 2009, 224-242.

T. Yamamoto, T. Yamashita, S. Niihara, Thermophysiological coupled analysis with COM, ES, and CFD, *Energy and Buildings*, 291, 2023, 113132.