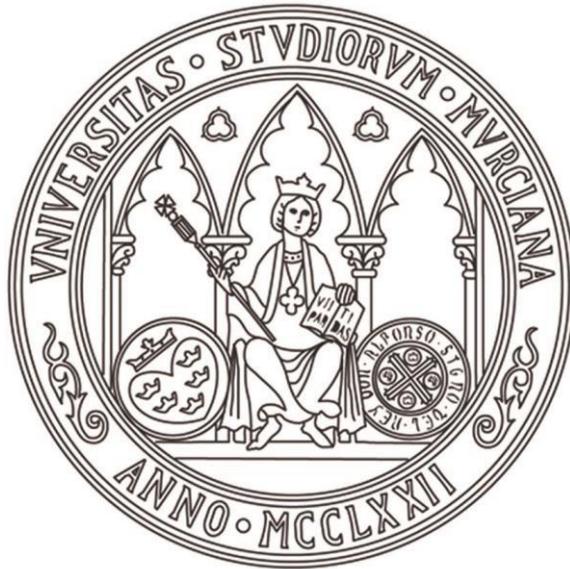




UNIVERSIDAD DE MURCIA
ESCUELA INTERNACIONAL DE DOCTORADO
TESIS DOCTORAL

Procesamiento de imágenes hiperespectrales mediante redes
neuronales convolucionales aplicado a la agricultura

D. Brahim Benmouna
2024



UNIVERSIDAD DE MURCIA
ESCUELA INTERNACIONAL DE DOCTORADO
TESIS DOCTORAL

Procesamiento de imágenes hiperespectrales mediante redes
neuronales convolucionales aplicado a la agricultura

Autor: D. Brahim Benmouna

Director/es: D. Ginés García Mateos

D. José Miguel Molina Martínez

D.Sajad Sabzi



**DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD
DE LA TESIS PRESENTADA EN MODALIDAD DE COMPENDIO O ARTÍCULOS PARA
OBTENER EL TÍTULO DE DOCTOR**

Aprobado por la Comisión General de Doctorado el 19-10-2022

D./Dña. Brahim Benmouna

doctorando del Programa de Doctorado en

Programa de Doctorado en Informática

de la Escuela Internacional de Doctorado de la Universidad Murcia, como autor/a de la tesis presentada para la obtención del título de Doctor y titulada:

Procesamiento de imágenes hiperespectrales mediante redes neuronales convolucionales aplicado a la agricultura

y dirigida por,

D./Dña. Ginés García Mateos

D./Dña. José Miguel Molina Martínez

D./Dña. Sajad Sabzi

DECLARO QUE:

La tesis es una obra original que no infringe los derechos de propiedad intelectual ni los derechos de propiedad industrial u otros, de acuerdo con el ordenamiento jurídico vigente, en particular, la Ley de Propiedad Intelectual (R.D. legislativo 1/1996, de 12 de abril, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Propiedad Intelectual, modificado por la Ley 2/2019, de 1 de marzo, regularizando, aclarando y armonizando las disposiciones legales vigentes sobre la materia), en particular, las disposiciones referidas al derecho de cita, cuando se han utilizado sus resultados o publicaciones.

Además, al haber sido autorizada como compendio de publicaciones o, tal y como prevé el artículo 29.8 del reglamento, cuenta con:

- *La aceptación por escrito de los coautores de las publicaciones de que el doctorando las presente como parte de la tesis.*
- *En su caso, la renuncia por escrito de los coautores no doctores de dichos trabajos a presentarlos como parte de otras tesis doctorales en la Universidad de Murcia o en cualquier otra universidad.*

Del mismo modo, asumo ante la Universidad cualquier responsabilidad que pudiera derivarse de la autoría o falta de originalidad del contenido de la tesis presentada, en caso de plagio, de conformidad con el ordenamiento jurídico vigente.

En Murcia, a 28 de febrero de 2024

Fdo.:

Esta DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD debe ser insertada en la primera página de la tesis presentada para la obtención del título de Doctor.

Código seguro de verificación: RUxFMs+s-z7wrtH+m-2gjui7y8-kYhTxaAC

COPIA ELECTRÓNICA - Página 1 de 2



Información básica sobre protección de sus datos personales aportados

Responsable:	Universidad de Murcia. Avenida teniente Flomesta, 5. Edificio de la Convalecencia. 30003; Murcia. Delegado de Protección de Datos: dpd@um.es
Legitimación:	La Universidad de Murcia se encuentra legitimada para el tratamiento de sus datos por ser necesario para el cumplimiento de una obligación legal aplicable al responsable del tratamiento. art. 6.1.c) del Reglamento General de Protección de Datos
Finalidad:	Gestionar su declaración de autoría y originalidad
Destinatarios:	No se prevén comunicaciones de datos
Derechos:	Los interesados pueden ejercer sus derechos de acceso, rectificación, cancelación, oposición, limitación del tratamiento, olvido y portabilidad a través del procedimiento establecido a tal efecto en el Registro Electrónico o mediante la presentación de la correspondiente solicitud en las Oficinas de Asistencia en Materia de Registro de la Universidad de Murcia



A mis padres, por lo que soy.

A mis hermanas Nadia e Ikram.

A mis sobrinas Ferial y Jinane.

Agradecimientos

En primer lugar, mi agradecimiento al Dr. Ginés García Mateos, quien aceptó ser mi director de tesis del doctorado. Sin él, este trabajo no hubiera sido posible. Desde el primer momento, el apoyo y generosidad recibidos me han permitido no decaer en este proceso. Mi agradecimiento infinito para Ginés.

A mis padres, quienes me han inspirado los ideales que han formado mi personalidad, incluyendo la tenacidad y determinación para culminar esta tesis, a través de su sacrificio, esfuerzo y todo lo que han dado por mí.

Agradezco al Dr. José Miguel Molina Martínez y al Dr. Sajad Sabzi quienes aceptaron ser mis codirectores de tesis, revisaron la tesis y me animaron a participar con artículos y congresos.

Por supuesto, este agradecimiento tiene que mencionar a los doctores Raziye Pouredarbandi, Rubén Fernández Beltrán y Dolores Parras Burgos con los cuales hice equipo de trabajo, compartiendo conocimientos, información y participando en investigaciones muy semejantes. Todo dirigido hacia la elaboración de artículos para congresos. Les agradezco mucho su apoyo.

A todos, muchas gracias.

Producción académica

Publicaciones Científico – Técnicas

Abbaspour-Gilandeh, Y., Sabzi, S., **Benmouna, B.**, García-Mateos, G., Hernández-Hernández, J. L., & Molina-Martínez, J. M. (2020). Estimation of the constituent properties of red delicious apples using a hybrid of artificial neural networks and artificial bee colony algorithm. *Agronomy*, 10(2), 267.

Pourdarbani, R., Sabzi, S., Kalantari, D., Paliwal, J., **Benmouna, B.**, García-Mateos, G., & Molina-Martínez, J. M. (2020). Estimation of different ripening stages of Fuji apples using image processing and spectroscopy based on the majority voting method. *Computers and Electronics in Agriculture*, 176, 105643.

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.

Benmouna, B., García-Mateos, G., Sabzi, S., Fernandez-Beltran, R., Parras-Burgos, D., & Molina-Martínez, J. M. (2022). Convolutional neural networks for estimating the ripening state of Fuji apples using visible and near-infrared spectroscopy. *Food and Bioprocess Technology*, 15(10), 2226-2236.

Benmouna, B., Pourdarbani, R., Sabzi, S., Fernandez-Beltran, R., García-Mateos, G., & Molina-Martínez, J. M. (2022). Comparison of Classic Classifiers, Metaheuristic Algorithms and Convolutional Neural Networks in Hyperspectral Classification of Nitrogen Treatment in Tomato Leaves. *Remote Sensing*, 14(24), 6366.

Benmouna, B., Pourdarbani, R., Sabzi, S., Fernandez-Beltran, R., García-Mateos, G., & Molina-Martínez, J. M. (2023). Attention Mechanisms in Convolutional Neural Networks for Nitrogen Treatment Detection in Tomato Leaves Using Hyperspectral Images. *Electronics*, 12(12), 2706.

Comunicaciones a Congresos

Benmouna, B., Sabzi, S., García-Mateos, G., Parras-Burgos, D., & Molina-Martínez, J. M. Redes neuronales convolucionales para la clasificación del estado de maduración de los frutos de las manzanas mediante espectroscopía visible e infrarroja cercana. XVI Congreso Nacional de Ciencias Hortícolas, Córdoba, España, 17-22 de octubre de 2021.

Benmouna, B., Sabzi, S., García-Mateos, G., Parras-Burgos, D., & Molina-Martínez, J. M. Método no destructivo para la clasificación de diferentes estados de maduración de frutos de manzana mediante espectroscopía visible e infrarroja cercana basada en redes neuronales convolucionales. III Symposium Ibérico de Ingeniería Hortícola "Smart Farming" (SIBIH22), Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena, España, 6-8 de abril de 2022.

Benmouna, B. Non-destructive estimation of apple fruits ripening using visible and near-infrared spectroscopy Based on convolutional neural networks. IV Jornadas Doctorales organizadas por la Escuela Internacional de Doctorado de la Universidad de Murcia, Murcia, España, 5 de julio de 2022.

Índice general

Agradecimientos.....	ii
Producción académica.....	iii
Publicaciones Científico – Técnicas	iii
Comunicaciones a Congresos.....	iv
Resumen	vi
Abstract	ix
1. Introducción	1
2. Resumen general de objetivos.....	8
3. Copia completa de los trabajos.....	10
3.1. Publicación 1	11
3.2. Publicación 2	22
3.3. Publicación 3	46
4. Conclusiones generales y vías futuras.....	70
4.1. Conclusiones generales.....	70
4.2. Vías futuras.....	72
Referencias	73

Resumen

Los avances tecnológicos en teledetección han permitido a los agricultores supervisar sus cultivos y tomar decisiones oportunas sobre su gestión. La tecnología de imágenes hiperespectrales o HSI (*hyperspectral imaging*) ha suscitado un gran interés en el campo de la teledetección agrícola debido a su mayor capacidad para representar muchos tipos de terrenos distintos. La HSI se utiliza en agricultura para diversas tareas, como la identificación de cultivos, la detección de enfermedades, la cartografía de malas hierbas, la determinación de la madurez de los frutos, la estimación del nitrógeno en las plantas y otros criterios. El aprendizaje automático combinado con HSI ha tenido un gran éxito en la agricultura, como la detección de defectos en los productos, la clasificación de productos por color, tamaño, textura, firmeza y muchas otras características. Esta tesis doctoral trata sobre la monitorización y gestión de cultivos mediante aplicaciones de teledetección hiperespectral. El objetivo principal de esta tesis doctoral es desarrollar nuevos métodos basados en imágenes hiperespectrales y técnicas de aprendizaje automático para la clasificación no destructiva de información hiperespectral procedente de imágenes de cultivos, especialmente en la estimación del estado de maduración de manzanas y la estimación del contenido de nitrógeno en hojas de tomate.

El cumplimiento de este objetivo general se desarrolla en tres grandes hitos, reflejados en las tres publicaciones que forman la unidad temática de este compendio:

- En el primer artículo, se investigó un nuevo enfoque para la clasificación no destructiva del estado de maduración de las manzanas Fuji mediante espectroscopía visible e infrarroja cercana y un modelo de red neuronal convolucional o CNN (*Convolutional Neural Network*). Se estudiaron los espectros de 127 muestras de manzanas, seleccionadas entre cuatro estados de maduración diferentes (inmadura, semimadura, madura y sobremadurada). Para evaluar la eficacia del método propuesto, el modelo CNN se comparó con tres clasificadores de aprendizaje automático que incluían redes neuronales artificiales o ANN (*Artificial Neural Networks*), máquinas de vectores de soporte o SVM (*Support Vector Machines*) y k-vecinos más próximos o KNN (*k-Nearest Neighbors*). Según los resultados obtenidos, el clasificador CNN tuvo un rendimiento excelente en comparación con los demás clasificadores. Los resultados mostraron que la tasa de clasificación correcta o CCR (*Correct Classification Rate*) del clasificador CNN propuesto alcanzó el 96,5%, mientras que la CCR de los métodos

ANN y KNN alcanzó una media del 89,5% y el 91,68%, respectivamente. SVM obtuvo un índice de CCR comparable del 95,93%.

- El segundo artículo aborda el estudio de la detección precoz de la aplicación excesiva de nitrógeno en las hojas de la variedad de tomate Royal. Para ello, se han estudiado un conjunto de diferentes clasificadores de aprendizaje automático, incluyendo dos clasificadores supervisados clásicos, a saber, análisis discriminante lineal o LDA (*Linear Discriminant Analysis*) y SVMs, tres clasificadores híbridos de redes neuronales artificiales, a saber, redes neuronales artificiales híbridas y algoritmo imperialista competitivo o ANN-ICA (*imperialist competitive algorithm*), búsqueda armónica o ANN-HS (*Harmony Search*) y algoritmo de abejas o ANN-BA (*Bees Algorithm*) y cuatro clasificadores basados en algoritmos de aprendizaje profundo por redes neuronales convolucionales, CNN. Los resultados mostraron que la mejor precisión de predicción media, con una tasa de clasificación correcta (CCR) del 91,6%, la obtuvo el clasificador CNN propuesto con seis capas convolucionales. Los peores resultados los obtienen los métodos clásicos LDA y SVM, con un CCR de solo el 85,5% y el 68,5%, respectivamente. Los demás métodos (ANN-ICA, ANN-HS, ANN-BA) y las demás CNN obtuvieron resultados similares, entre el 88,8% y el 90,8%.
- El tercer artículo continúa la misma línea de investigación en la estimación de nitrógeno en hojas de tomate de variedad Royal. En este caso, se aplicó un mecanismo de atención al mejor modelo de CNN previamente diseñado para minimizar la información redundante en los espectros de entrada, extrayendo los espectros más relevantes de las imágenes HSI para mejorar la precisión del modelo de aprendizaje de la CNN. Los resultados experimentales mostraron que la CNN propuesta con el mecanismo de atención obtuvo mejores resultados que la CNN sin atención y alcanzó un CCR del 97,33%, frente a un CCR del 94,94% de la CNN sola.

En conclusión, se han desarrollado métodos no destructivos basados en imágenes hiperespectrales y técnicas de aprendizaje automático para estimar el estado de crecimiento de las manzanas y la cantidad de nitrógeno requerida en las hojas de tomate. El método propuesto para clasificar el estado de madurez de las manzanas demuestra ser una herramienta útil para una evaluación rápida y precisa de la calidad de las manzanas en las operaciones de cosecha o postcosecha. Como investigación futura, será interesante probar los resultados con grandes conjuntos de datos y los intervalos espectrales más eficientes. También será interesante probar la fiabilidad del método propuesto frente a diferentes temporadas de

cultivo, ubicaciones, variedades de frutas y equipos de captura. El método propuesto para detectar la cantidad de nitrógeno en las hojas de tomate también ha demostrado ser una herramienta útil para la estimación temprana de la sobredosis de nitrógeno en las hojas de tomate. El principal inconveniente de este método es que las imágenes se realizaron en condiciones de laboratorio. Además, el procesamiento se realiza píxel a píxel en lugar de imágenes completas. Por este motivo, las investigaciones futuras deberían abordar cuestiones novedosas; por ejemplo, sería interesante investigar cómo funciona la estrategia propuesta con otros cultivos. El desarrollo de un nuevo modelo CNN con un mecanismo de atención que pueda aprender información de características espaciales y espectrales a partir de imágenes hiperespectrales para detectar conjuntamente hojas anormales (pálidas y retorcidas) y exceso de nitrógeno es otro campo potencial de investigación futura.

Abstract

Technological advances in remote sensing have enabled farmers to monitor their crops and make timely crop management decisions. Hyperspectral imaging (HSI) technology has attracted a great deal of interest in the field of agricultural remote sensing due to its greater ability to depict so many distinctly varied land types. HSI is used in agriculture for a variety of tasks, including crop identification, disease detection; weed mapping, fruit maturity determination, nitrogen crop estimation, and other criteria. Machine learning combined with HSI has had great success in agriculture, such as detecting product defects, sorting produce by color, size, texture, firmness, and many other characteristics. This doctoral thesis deals with the monitoring and management of crops using hyperspectral remote sensing applications. The main objective of this thesis doctoral is to develop new methods based on hyperspectral imaging and machine learning techniques for non-destructive classification of hyperspectral information extracted from crop images, especially in estimating the ripening stage of apples and estimating the nitrogen content in tomato leaves.

The fulfillment of this general objective is treated in three major milestones, reflected in the three publications that form the thematic unit of this compendium:

- In the first article, a new non-destructive approach based on visible and near infrared spectroscopy and a convolutional neural network (CNN) model was proposed to estimate the ripening stages of Fuji apples. Spectra of 127 apple samples were studied, which were selected from four different ripening states (unripe, half-ripe, ripe and over-ripe). To evaluate the effectiveness of the proposed method, the CNN model was compared with three machine learning classifiers including artificial neural networks (ANN), support vector machines (SVMs), and k-nearest neighbors (KNN). According to the experimental results, the classification-based CNN approach performed better than the competing approaches, producing a correct classification rate (CCR) of 96.5%, compared to an average of 89.5%, 95.93%, and 91.68% for ANN, SVM, and KNN, respectively.
- The second article deals with the study of early detection of excessive nitrogen application in the leaves of the Royal tomato variety. For this purpose, a set of different machine learning classifiers were studied, including two classic supervised classifiers, i.e., linear discriminant analysis (LDA) and SVMs, three hybrid artificial neural network classifiers, namely, hybrid artificial neural networks and imperialist competitive algorithm (ANN-ICA), harmony search (ANN-HS) and bees algorithm

(ANN-BA) and four classifiers based on deep learning algorithms by convolutional neural networks (CNNs). The results showed that the best average prediction accuracy with a CCR of 91.6% was achieved by the proposed CNN classifier with six convolutional layers. The worst results are achieved by the classic methods LDA and SVM, with a CCR of only 85.5% and 68.5%, respectively. The remaining methods (ANN-ICA, ANN-HS, ANN-BA and the other CNNs) achieved similar results between 88.8% and 90.8%.

- The third article continues the same line of research in the estimation of nitrogen in the leaves of the Royal tomato variety. In this case, an attention mechanism was applied to the best CNN model previously designed to minimize the redundant information in the input spectra by extracting the most relevant spectra from the HSI images to improve the accuracy of the CNN learning model. Experimental results showed that the proposed CNN with attention mechanism performed better than the CNN without attention, achieved a CCR of 97.33% compared to a CCR of 94.94% for the CNN alone. To evaluate the effectiveness of the proposed method, the attention mechanism-based CNN model was compared with two other CNN classifiers, AlexNet and VGGNet. Regarding the obtained results, only VGGNet with attention achieved an excellent CCR of 97.54%, which is slightly higher than that of the proposed CNN with attention. However, the VGGNet method is more computationally expensive, with 30 times more training parameters. This translated into a slower training process, requiring more than one hour for each execution.

In conclusion, non-destructive methods based on hyperspectral imaging and machine learning techniques were developed to estimate the growth status of apples and the amount of nitrogen required in the leaves of tomatoes. The proposed method for classifying the state of ripeness of apples proves to be a useful tool for fast and accurate assessment of apple quality at harvest or postharvest operations. As future work, it will be interesting to verify the obtained results with large datasets and the most efficient spectral intervals. It will also be interesting to test the robustness of the proposed method against different crop seasons, locations, fruit varieties, and capture equipment. The proposed method for detecting the amount of nitrogen in tomato leaves has also proven to be a useful tool for early estimation of nitrogen overdose in tomato leaves. The main drawback of this method is that the imaging was performed under laboratory conditions. Additionally, processing is done pixel by pixel rather than by entire images. For this purpose, future research should address novel issues; for example, it would be interesting to investigate how well the proposed method works with other crops. The development of a

novel CNN model with an attention mechanism that can learn spatial and spectral feature information from hyperspectral images to jointly detect abnormal (pale and twisted) leaves and excess nitrogen is another potential field of future research.

1. Introducción

En la actualidad, el sector agrario se enfrenta a retos provocados por diversos factores, como el rápido crecimiento de la población, la pérdida de recursos naturales, la contaminación, el cambio climático y las enfermedades de las plantas. Las tecnologías de teledetección se han convertido recientemente en una herramienta importante para el seguimiento y la gestión de los cultivos agrícolas [1]. El seguimiento de la agricultura mediante sensorización remota (o *remote sensing*) es un tema amplio que se ha estudiado extensamente desde muchas perspectivas. Algunas de estas perspectivas se basan en aplicaciones específicas como la predicción del rendimiento, la detección de malas hierbas y el riego, utilizando diversas plataformas de teledetección como satélites [2], vehículos aéreos no tripulados o UAV (*Unmanned Aerial Vehicles*) [3], vehículos terrestres no tripulados o UGV (*Unmanned Ground Vehicles*) [4], detección y localización de la luz o LiDAR (*Light Detection and Ranging*) [5], sensores con teledetección óptica activa [6] y pasiva [7]. La teledetección multispectral e hiperespectral son dos subconjuntos de la teledetección óptica pasiva, basados en la resolución espectral y espacial. Un método más avanzado que la imagen multispectral o MSI (*Multispectral Imaging*) es la HSI (*Hyperspectral Imaging*), que tiene la capacidad de capturar una respuesta espectral precisa de las características del objetivo [8]. La HSI se ha mostrado muy prometedora para aplicaciones en agricultura debido a la abundancia de información espectral sensible a muchas características biofísicas y bioquímicas de las plantas y el suelo. En agricultura, la HSI se ha utilizado para diversas tareas, como la medición del estado del nitrógeno de los cultivos [9], la supervisión de enfermedades de los cultivos [10] o la estimación de la madurez de los cultivos [11]. Por otra parte, las aplicaciones de aprendizaje automático han desempeñado un papel importante en el sector agrícola, ayudando a gestionar el crecimiento de los cultivos y aumentar la producción con menos esfuerzo humano [12]. Por ejemplo, Basak et al. [13] desarrollaron modelos de regresión lineal o LR (*linear-based regression*) y de regresión vectorial de soporte o SVR (*Support Vector Regression*) para estimar el peso de tres cultivos de fresa. Como parámetro de entrada se utilizaron los números de píxeles de la imagen de fresas de tres cultivos de fresas diferentes, calculados mediante técnicas de procesamiento de imágenes. Los resultados obtenidos mostraron que la precisión del modelo LR era superior a la del modelo SVR. Se mostró una relación lineal entre el número de píxeles y el peso de la fruta con un máximo del 96,3% y el 94,2% en la fase de entrenamiento y del 89,6% y el 85,6% en la fase de prueba, respectivamente. Abdel-sattar et al. [14] realizaron un estudio para evaluar la eficacia de tres

técnicas de aprendizaje automático, a saber, SVR, MLR y ANN, para predecir la masa de frutos de ber (*Ziziphus mauritiana* Lamk.) basándose en mediciones manuales de la longitud del fruto, el diámetro del fruto pequeño y el diámetro del fruto máximo. En base a los resultados, el enfoque ANN funcionó mejor que SVR y MLR en la estimación de la masa del fruto de ber. Alcanzó un coeficiente de determinación o R^2 de 0,9771 y un error cuadrático medio o RMSE (*Root Mean Square Error*) de 1,8479 g, en comparación con un R^2 de 0,9947 y un RMSE de 1,8814 g para SVR. Tan et al. [15] desarrollaron un modelo CNN para reconocer una imagen en tiempo real de una lesión en la piel de un melón captada por una cámara de vídeo de infrarrojos. Los resultados experimentales muestran que el modelo propuesto tiene unas tasas de precisión y recuperación satisfactorias de hasta el 97,5% y el 98,5%, respectivamente. Aruraj et al. [16] desarrollaron una técnica de textura-patrón basada en el Patrón Binario Local o LBP (*Local Binary Pattern*) y SVM para la detección y clasificación de las enfermedades de las plantas de plátano. Se utilizó LBP para extraer la información de textura de una imagen de entrada, y los algoritmos SVM y KNN para comparar el rendimiento de dos casos de estudio: mancha foliar cordana vs. sana y sigatoka negra vs. sana. En cuanto a los resultados obtenidos, el clasificador SVM fue más preciso que el algoritmo KNN, alcanzando una precisión del 89,1% y el 90,9% para dos ejemplos experimentales, respectivamente. Aherwadi et al. [17] utilizaron modelos CNN y AlexNet para clasificar el estado de madurez de 700 imágenes de plátanos, que se dividieron en tres clases (inmaduros, maduros y demasiado maduros). La precisión de los modelos CNN y AlexNet para el conjunto de datos original fue del 98,25% y el 81,75%, respectivamente, mientras que la precisión de los modelos CNN y AlexNet para el conjunto de datos ampliado a 18.900 imágenes fue del 99,36% y el 99,44%, respectivamente. Con el rápido desarrollo de las tecnologías de imagen remota, en los últimos años se han publicado muchos trabajos de investigación sobre la aplicación de la HSI y el aprendizaje automático con fines agrícolas. Por ejemplo, Cho et al. [18] utilizaron HSI y regresión de mínimos cuadrados parciales o PLSR (*Partial Least Squares Regression*) para determinar el contenido de humedad de los caquis durante el secado. Todos los caquis se secaron en un secador de aire caliente a 40 °C y se clasificaron en siete grupos en función del tiempo de secado: a medio secar (Cont), un día (DP-1), dos días (DP-2), tres días (DP-3), cuatro días (DP-4), cinco días (DP-5) y seis días (DP-6). Se utilizó un sistema HSI infrarrojo de onda corta o SWIR (*Shortwave Infrared*) con un rango espectral de 900-2500 nm para escanear linealmente las muestras de caqui en una placa con fondo oscuro. La precisión de la medición del contenido de humedad fue del 95% y el valor R^2 del modelo de calibración ideal fue de 0,9673. Li et al. [19] desarrollaron un

modelo de regresión basado en el modelo de análisis discriminante de mínimos cuadrados parciales o PLS-DA (*Partial Least Squares Discriminant Analysis*) y el método de discriminación cualitativa de máquinas de vectores de soporte de mínimos cuadrados o LS-SVM (*Least-Squares Support-Vector Machines*) para detectar magulladuras en melocotones. Se utilizaron imágenes hiperespectrales para captar la información de las muestras de melocotón en longitudes de onda de 397,5 a 1014 nm. Los resultados mostraron que con el modelo PLA-DA, los CCR a las 12, 24, 36 y 48 horas después de la magulladura fueron del 96,67%, 96,67%, 93,33% y 83,33%, respectivamente, mientras que los CCR de LS-SVM fueron del 80%, 96,67%, 100% y 100%, respectivamente. Gilandeh et al. [20] desarrollaron un método no destructivo basado en el clasificador híbrido redes neuronales artificiales-optimización de enjambre de partículas o ANN-PSO (*hybrid Artificial Neural Networks-Particle Swarm Optimization*) y un clasificador híbrido redes neuronales artificiales-colonia artificial de abejas o ANN-ABC (*hybrid Artificial Neural Networks-Artificial Bee Colony*), para estimar las propiedades mecánicas y fisicoquímicas de las manzanas Red Delicious, a saber, firmeza, Brix menos ácido o BrimA (*Brix minus acid*), contenido de almidón y acidez, utilizando espectroscopía visible e infrarroja cercana o Vis/Nir (*visible and near-infrared*) en el rango de 400 a 1000. Se utilizó el algoritmo ANN-PSO para seleccionar las longitudes de onda más eficaces para estimar estas propiedades. Se encontraron cinco de las longitudes de onda más eficaces para evaluar las calidades para BrimA, nueve para la firmeza, siete para la acidez y cinco para el contenido de almidón. Entre las 1000 iteraciones, los mejores valores R^2 del híbrido RNA-ABC fueron 0,828, 0,738, 0,9 y 0,923, respectivamente. En otro estudio, Vursavusa et al. [21] desarrollaron un método de clasificación utilizando la regresión lineal simple o SLR (*Simple Linear Regression*) y la regresión lineal múltiple o MLR (*Multiple Linear Regression*) para estimar el nivel de firmeza de los tomates frescos de invernadero. Se seleccionaron tomates libres de enfermedades y lesiones y se clasificaron por color y tamaño utilizando un sistema no destructivo. Los tomates se clasificaron en seis estados diferentes de madurez (verde maduro, rompiendo, girando, rosa, rojo claro y rojo). Los resultados mostraron que el modelo MLR resultó ser el más preciso para estimar la firmeza, con un error cuadrático medio o RMSE (*Root Mean Square Error*) de 0,19 N, un error porcentual absoluto medio (MAPE) de 5,35%, un error absoluto medio (MAE) de 0,10 N y un R^2 de 0,85.

Por otro lado, con el desarrollo de tecnologías de *Big Data* y ordenadores altamente eficientes, la tecnología de aprendizaje profundo o DL (*Deep Learning*) ha abierto nuevas oportunidades para la gestión de cultivos y la cosecha en entornos de operaciones agrícolas.

El DL se ha utilizado recientemente en diversas aplicaciones agrícolas de teledetección, como la predicción de la madurez de los cultivos, la detección de enfermedades de las plantas, el control de las malas hierbas, la distribución de los cultivos, el recuento de frutos fuertes, la recolección de cultivos y la previsión de la producción. Por ejemplo, Davur et al. [22] investigaron el rendimiento de un modelo tridimensional de DL para estimar el tiempo de maduración de la fruta de aguacate Hass. Se realizó HSI para capturar la información espectral y espacial de 551 imágenes de aguacate, y se utilizó un modelo de regresión de red neuronal convolucional profunda o DCNNR (*Deep Convolutional Neural Network Regression*) para predecir el número de días hasta la maduración. Los resultados mostraron que el método de regresión de aprendizaje profundo fue capaz de predecir el tiempo hasta la maduración con alta precisión. En otro estudio, Pourdarbani et al. [23] investigaron la eficacia de tres modelos 3D-CNN diferentes, a saber, PreActResNet, ResNetV2 y MobileNetV2 para la detección de magulladuras en limones mediante HSI. Los resultados mostraron que ResNetV2 superó a PreActResNet y MobileNetV2 y alcanzó un CCR del 92,85%, en comparación con una media del 85,71% y 83,33% para PreActResNet y MobileNetV2, respectivamente. Zhang et al. [24] desarrollaron una red neuronal convolucional profunda o DCNN (*Deep Convolutional Neural Network*) para identificar la roya amarilla en el trigo de invierno en cinco etapas de desarrollo de la enfermedad mediante el análisis y la categorización de datos con alta resolución espacial-espectral recogidos por un sistema HSI basado en UAV. El clasificador DCNN propuesto se comparó con un método alternativo basado en un clasificador de bosque aleatorio o RFC (*Random Forest Classifier*). Según los resultados experimentales, el DCNN basado en la clasificación obtuvo mejores resultados que el clasificador competidor, produciendo una precisión global del 85 %, frente a una media del 77 % para el RFC.

En cuanto al uso de DCNN, los mecanismos de atención han sido ampliamente utilizados en numerosos dominios de aplicación, como la generación de leyendas de imágenes [25], la traducción automática [26], el análisis imagen-sentimiento [27], la cartografía de cultivos [28] y la calibración del color de imágenes de cultivos [29]. Estos mecanismos de atención han despertado un interés creciente en el campo de la teledetección en agricultura. Por ejemplo, Lu et al. [30] desarrollaron una red neuronal profunda o DASNet (Deep Neural Network) con un mecanismo de atención dual y fusión de características multiescala para extraer tierras de cultivo de una imagen GaoFen-2 (GF-2). Los autores demostraron que el modelo de clasificación DASNet es una herramienta factible para la extracción rápida y precisa de

campos en imágenes de teledetección agrícola. Consiguieron una intersección sobre unión o IoU (*Intersection Over Union*) de 0,8932, una puntuación o F1-score de 0,9017, un coeficiente kappa o KC (*Kappa Coefficient*) de 0,8869 y un desplazamiento de localización de 1,1752 píxeles. De forma similar, Lui et al. [31] desarrollaron un novedoso modelo de aprendizaje profundo basado en una red neuronal de memoria a largo plazo o LSTM (*Long Short-Term Memory Neural Network*) con un mecanismo de atención para estimar el rendimiento de grano de diferentes cultivos. Según los resultados obtenidos, el modelo LSTM combinado con un mecanismo de atención ofreció una mejor precisión de estimación, alcanzando un R^2 de 0,940 y un RMSE de 80,020. En el campo de la teledetección hiperespectral, se han propuesto varios enfoques basados en DL en combinación con mecanismos de atención. Por ejemplo, Jai et al. [32] diseñaron un modelo de red neuronal convolucional destripadora o DS-CNN (*De-striping Convolutional Neural Network*) combinado con un mecanismo de atención para identificar enfermedades del maíz. Se utilizó una cámara hiperespectral para extraer datos espacio-espectrales de dos conjuntos de datos de imágenes de maíz diferentes. El CCR correcto del modelo DS-CNN utilizando 200 conjuntos de datos espectrales de enfermedades fue del 98,34%. Xiaoyan et al. [33] desarrollaron un nuevo marco de aprendizaje profundo para la estimación del contenido de clorofila de los cultivos basado en una CNN con un mecanismo de atención e imágenes hiperespectrales. En comparación con el modelo PLSR, que proporcionó una menor precisión de estimación ($R^2 = 0,813$), el modelo CNN con atención proporcionó una mejor precisión de estimación y alcanzó un R^2 de 0,839.

El trabajo que conforma esta tesis doctoral se centra en la monitorización y gestión de cultivos mediante aplicaciones de teledetección hiperespectral, particularmente en la evaluación del estado de maduración de manzanas y la determinación de la cantidad de nitrógeno en hojas de tomate. Las aplicaciones desarrolladas en esta tesis doctoral extraen sus datos del trabajo de campo realizado por un experto humano utilizando imágenes de forma supervisada. Las imágenes hiperespectrales utilizadas para el experimento se obtuvieron de cultivos hortícolas en campos de Kermanshah, Irán. Estas imágenes se tomaron con una cámara hiperespectral en el rango Vis-NIR (Physics Noor Co., Fanavaran, Kashan, Irán). Esta tesis doctoral se presenta como un compendio de tres publicaciones en revistas internacionales de gran prestigio que constituyen una unidad científica de acuerdo con la normativa de doctorado de la Universidad de Murcia, sobre el problema del análisis automático de imágenes hiperespectrales para la monitorización y gestión de cultivos.

Tal y como indica la citada normativa, el resto de esta memoria se organiza de la siguiente manera. En la sección 2 se hace un resumen global de los objetivos, que se dividen en el objetivo general de la tesis doctoral y los objetivos específicos. La sección 3 presenta las tres publicaciones que componen la tesis en forma de compendio, cada una de las cuales sigue una estructura típica: (i) Introducción, (ii) Materiales y Métodos, (iii) Resultados y Discusión y (iv) Conclusiones. En el desarrollo de cada artículo se describe la metodología empleada y los resultados obtenidos. A continuación se describe detalladamente cada uno de ellos.

- "Convolutional neural networks for estimating the ripening state of Fuji apples using visible and near-infrared spectroscopy", publicado en el *International Journal of Food and Bioprocess Technology* (2022) 15:2226-2236. Este trabajo describe la creación de una nueva técnica para la clasificación no destructiva de los estados de maduración (inmaduro, semi-maduro, maduro y sobre-maduro) de las manzanas Fuji basada en espectroscopía Vis/NIR y redes CNN. El artículo está dirigido a aplicaciones de gestión agrícola.
- "Comparison of classic classifiers, metaheuristic algorithms and convolutional neural networks in hyperspectral classification of nitrogen treatment in tomato leaves", publicado en *Remote Sensing* (2022), Volumen 14, Número 24. Esta publicación presenta un trabajo de campo sobre la detección del exceso de nitrógeno en hojas de tomate de la variedad Royal. Este artículo trata sobre el desarrollo de un nuevo método no destructivo que utiliza imágenes con diferentes longitudes de onda de 400 a 1100 nm. En este trabajo se comparó y evaluó el rendimiento de nueve métodos de aprendizaje automático. Los métodos utilizados para la comparación incluyeron dos técnicas clásicas de aprendizaje automático, incluyendo LDA y SVM, tres enfoques híbridos de ANN-ICA, ANN-HS y ANN-BA, y cuatro arquitecturas de CNN con un número creciente de capas convolucionales.
- "Attention mechanisms in convolutional neural networks for nitrogen treatment detection in tomato leaves using hyperspectral images", publicado en *Electronics* (2023), Volume 12 Issue 12. Este artículo presenta un desarrollo completo siguiendo la misma línea introducida en el artículo anterior, pero en este caso se aplicó un mecanismo de atención para mejorar el modelo de CNN desarrollado en el artículo anterior, para minimizar la información redundante en los espectros de entrada extrayendo los datos más relevantes de las imágenes HSI.

La sección 4 aborda las conclusiones y los trabajos futuros derivados de la investigación realizada.

2. Resumen general de objetivos

Esta tesis doctoral combina las disciplinas de la ingeniería informática y la agricultura, desarrollándose como un trabajo interdisciplinar mediante el desarrollo de estudios de campo y su análisis mediante aplicaciones informáticas de aprendizaje y visión artificial. Esta investigación doctoral se centra en el desarrollo de nuevas técnicas de monitorización del rendimiento y producción de cultivos, utilizando tecnologías de teledetección hiperespectral y métodos de aprendizaje automático. La primera área del trabajo se centra en el desarrollo de un nuevo método no destructivo basado en espectroscopía Vis/NIR utilizando un clasificador CNN para estimar la madurez de manzanas Fuji divididas en cuatro estados diferentes (inmadura, semi-madura, madura y sobre-madura). La segunda parte de la tesis aborda el desarrollo de un nuevo método no destructivo basado en espectroscopía Vis/NIR utilizando un clasificador CNN para detectar el exceso de nitrógeno en las hojas de la variedad de tomate Royal. La tercera área de trabajo continúa la misma línea de investigación, pero en este caso, se aplica un mecanismo de atención al mejor modelo CNN desarrollado previamente para minimizar la información redundante en los espectros de entrada extrayendo los espectros más relevantes de las imágenes HSI. El objetivo es demostrar las mejoras que puede ofrecer el uso de información hiperespectral en el análisis de plantas y frutas. Este objetivo principal puede subdividirse en los siguientes objetivos complementarios:

1. Realizar un estudio en profundidad sobre el estado del arte de la investigación en técnicas de aprendizaje automático utilizadas para la gestión de cultivos agrícolas basados en aplicaciones de teledetección.
2. Analizar y comparar la eficacia de diferentes técnicas de aprendizaje automático utilizadas en visión por ordenador para la gestión de cultivos agrícolas basada en aplicaciones de teledetección.
3. Revisar en particular los artículos sobre técnicas de aprendizaje automático para la gestión de cultivos basadas en teledetección hiperespectral: el problema abordado por cada artículo, los diferentes tipos de cultivo, las diferentes plataformas de teledetección y los tipos de clasificadores.
4. Diseñar un método para la clasificación no destructiva del estado de maduración de las manzanas Fuji basado en la información espectral Vis/NIR (de 450 a 1000nm) utilizando CNN unidimensionales.

5. Diseñar un algoritmo para entrenar automáticamente el modelo 1D-CNN para la clasificación del estado de maduración de la manzana, incluyendo una selección de la arquitectura óptima y los hiperparámetros óptimos de la CNN propuesta.
6. Comparar la fiabilidad del método propuesto con tres métodos alternativos, incluyendo ANN, SVM y KNN.
7. Diseñar un método para la estimación no destructiva de la sobredosis de nitrógeno en hojas de tomate basado en datos espectrales Vis/NIR (de 450 a 1000nm) utilizando CNN.
8. Diseñar un algoritmo para entrenar automáticamente el modelo CNN para la estimación del contenido de nitrógeno en hojas de tomate, incluyendo la selección de la arquitectura óptima y los hiperparámetros óptimos de la CNN propuesta.
9. Comparar la fiabilidad de la CNN propuesta con cinco métodos alternativos incluyendo LDA, SVM, ANN-ICA, ANN-HS y ANN-BA.
10. Diseñar un algoritmo para el entrenamiento automático del modelo CNN con atención para la estimación del contenido de nitrógeno en hojas de tomate, con el propósito de mejorar la precisión del modelo de aprendizaje CNN.
11. Comparar la fiabilidad de la CNN basada en el mecanismo de atención propuesto con una CNN alternativa que tenga la misma arquitectura sin integrar el mecanismo de atención, y con otros modelos de CNN, AlexNet y VGGNet.
12. Elaborar comunicaciones sobre la marcha de las actividades del doctorado, para dar a conocer en congresos o simposios lo que se está trabajando en el doctorado.
13. Preparar artículos para revistas indexadas en la categoría Q1 del JCR y de gran impacto en todo el mundo.

3. Copia completa de los trabajos

De acuerdo con la normativa de tesis doctorales como compendio de publicaciones de la Universidad de Murcia, se adjuntan a continuación los tres artículos que componen esta tesis doctoral. Los artículos siguen la siguiente estructura: introducción, materiales y métodos, resultados, discusión y conclusiones, con adaptaciones para tener en cuenta las características específicas de cada uno de los trabajos. Los artículos están escritos en inglés. El primer artículo fue publicado en la revista "Food and Bioprocess Technology" (con clasificación JCR en cuartil Q1) en 2022. El siguiente artículo fue publicado en la revista "Remote Sensing" (con clasificación JCR en cuartil Q1) también en 2022. Y el tercer artículo fue publicado en 2023 en la revista "Electronics" (con clasificación JCR en cuartil Q2). Cada uno de los artículos destaca por los resultados alcanzados y las aportaciones más relevantes en el campo de la monitorización del crecimiento de cultivos mediante HSI y aprendizaje automático. En concreto, los artículos presentados son:

- Convolutional neural networks for estimating the ripening state of Fuji apples using visible and near-infrared spectroscopy. Food and Bioprocess Technology, 15(10), 2226-2236.
- Comparison of classic classifiers, metaheuristic algorithms and convolutional neural networks in hyperspectral classification of nitrogen treatment in tomato leaves. Remote Sensing, 14(24), 6366.
- Attention mechanisms in convolutional neural networks for nitrogen treatment detection in tomato leaves using hyperspectral images. Electronics, 12(12), 2706.

3.1. Publicación 1

Título	Convolutional neural networks for estimating the ripening state of Fuji apples using visible and near-infrared spectroscopy
Autores	Brahim Benmouna, Ginés García-Mateos, Sajad Sabzi, Ruben Fernandez-Beltran, Dolores Parras-Burgos, José Miguel Molina-Martínez
Tipo	Revista, JCR journal impact factor: 5,6 (Q1 en Food and Science Technology)
Revista	Food and Bioprocess Technology, Springer
Páginas	2226-2236
Año	2022
Mes	Julio
Volumen	15
Abstract	<p>The quality of fresh apple fruits is a major concern for consumers and manufacturers. Classification of these fruits according to their ripening stage is one of the most decisive factors in determining their quality. In this regard, the aim of this work is to develop a new method for non-destructive classification of the ripening state of Fuji apples using hyperspectral information in the visible and near-infrared (Vis/NIR) regions. Spectra of 172 apple samples in the range from 450 to 1000 nm were studied, which were selected from four different ripening stages. A convolutional neural network (CNN) model was proposed to perform the classification of the samples. The proposed method was compared with three alternative methods based on artificial neural networks (ANN), support vector machines (SVM), and k-nearest neighbors (KNN). The results revealed that the CNN method outperformed the alternative methods, achieving a correct classification rate (CCR) of 96.5%, compared with an average of 89.5%, 95.93%, and 91.68% for ANN, SVM, and KNN, respectively. These results will help in the development of a new device for fast and accurate estimation of the quality of apples.</p>
DOI	https://doi.org/10.1007/s11947-022-02880-7
URI	https://link.springer.com/article/10.1007/s11947-022-02880-7
Estado	Publicado

Aportaciones del doctorando	<ul style="list-style-type: none">• Estudio del estado de arte y propuesta de las técnicas de aprendizaje computacional más adecuadas al problema.• Experimentación, implementación del software y validación de los resultados.• Elaboración, redacción y revisión del artículo.
--	---

3.2. Publicación 2

Título	Comparison of classic classifiers, metaheuristic algorithms and convolutional neural networks in hyperspectral classification of nitrogen treatment in tomato leaves
Autores	Brahim Benmouna, Raziye Pourdarbani, Sajad Sabzi, Ruben Fernandez-Beltran, Ginés García-Mateos, José Miguel Molina-Martínez
Tipo	Revista, JCR journal impact factor: 5,0 (Q1 en Geosciences, Multidisciplinary)
Revista	Remote Sensing , MDPI
Páginas	6366
Año	2022
Mes	Diciembre
Volumen	14
Número	24
Abstract	<p>Tomato is an agricultural product of great economic importance because it is one of the most consumed vegetables in the world. The most crucial chemical element for the growth and development of tomato is nitrogen (N). However, incorrect nitrogen usage can alter the quality of tomato fruit, rendering it undesirable to customers. Therefore, the goal of the current study is to investigate the early detection of excess nitrogen application in the leaves of the Royal tomato variety using a non-destructive hyperspectral imaging system. Hyperspectral information in the leaf images at different wavelengths of 400–1100 nm was studied; they were taken from different treatments with normal nitrogen application (A), and at the first (B), second (C) and third (D) day after the application of excess nitrogen. We investigated the performance of nine machine learning classifiers, including two classic supervised classifiers, i.e., linear discriminant analysis (LDA) and support vector machines (SVMs), three hybrid artificial neural network classifiers, namely, hybrid artificial neural networks and imperialist competitive algorithm (ANN-ICA), harmony search (ANN-HS) and bees algorithm (ANN-BA) and four classifiers based on deep learning algorithms by convolutional neural networks (CNNs). The results showed that the best classifier was a CNN method,</p>

	with a correct classification rate (CCR) of 91.6%, compared with an average of 85.5%, 68.5%, 90.8%, 88.8% and 89.2% for LDA, SVM, ANN-ICA, ANN-HS and ANN-BA, respectively. This shows that modern CNN methods should be preferred for spectral analysis over other classical techniques. These CNN architectures can be used in remote sensing for the precise detection of the excessive use of nitrogen fertilizers in large extensions.
DOI	https://doi.org/10.3390/rs14246366
URI	https://www.mdpi.com/2072-4292/14/24/6366
Estado	Publicado
Aportaciones del doctorando	<ul style="list-style-type: none"> • Estudio del estado de arte en redes neuronales convolucionales y propuesta de las técnicas de aprendizaje computacional más adecuadas al problema. • Experimentación, implementación del software y validación de los resultados. • Elaboración, redacción y revisión del artículo.

3.3. Publicación 3

Título	Attention mechanisms in convolutional neural networks for nitrogen treatment detection in tomato leaves using hyperspectral images
Autores	Brahim Benmouna, Raziye Pouredarabani, Sajad Sabzi, Ruben Fernandez-Beltran, Ginés García-Mateos, José Miguel Molina-Martínez
Tipo	Revista, JCR journal impact factor: 2,9 (Q2 en Electrical and Electronic Engineering)
Revista	Electronics, MDPI
Páginas	2706
Año	2023
Mes	Junio
Volumen	12
Número	12
Abstract	<p>Nitrogen is an essential macronutrient for the growth and development of tomatoes. However, excess nitrogen fertilization can affect the quality of tomato fruit, making it unattractive to consumers. Consequently, the aim of this study is to develop a method for the early detection of excessive nitrogen fertilizer use in Royal tomato by visible and near-infrared spectroscopy. Spectral reflectance values of tomato leaves were captured at wavelengths between 400 and 1100 nm, collected from several treatments after application of normal nitrogen and on the first, second, and third days after application of excess nitrogen. A new method based on convolutional neural networks (CNN) with an attention mechanism was proposed to perform the estimation of nitrogen overdose in tomato leaves. To verify the effectiveness of this method, the proposed attention mechanism-based CNN classifier was compared with an alternative CNN having the same architecture without integrating the attention mechanism, and with other CNN models, AlexNet and VGGNet. Experimental results showed that the CNN with an attention mechanism outperformed the alternative CNN, achieving a correct classification rate (CCR) of 97.33% for the treatment, compared with a CCR of 94.94% for the CNN alone. These findings will help in the development of a new tool for rapid and accurate detection of nitrogen fertilizer overuse in large areas.</p>

3. Copia completa de los trabajos

DOI	https://doi.org/10.3390/electronics12122706
URI	https://www.mdpi.com/2079-9292/12/12/2706
Estado	Publicado
Aportaciones del doctorando	<ul style="list-style-type: none">• Estudio del estado de arte en mecanismos de atención y propuesta de las técnicas de aprendizaje computacional más adecuadas al problema.• Experimentación, implementación del software y validación de los resultados.• Elaboración, redacción y revisión del artículo.

4. Conclusiones generales y vías futuras

4.1. Conclusiones generales

Detectar el uso excesivo de nitrógeno en las hojas de las plantas y estimar la madurez de los frutos son factores clave para optimizar la gestión del campo y cosechar los productos con la calidad deseada. La inteligencia artificial y las técnicas de imagen hiperespectral (HSI) se encuentran entre las herramientas básicas de los sistemas actuales para la gestión de cultivos y la monitorización del crecimiento de los mismos en el campo agrícola. La principal contribución de esta tesis doctoral es el desarrollo y validación de nuevas técnicas basadas en HSI y redes neuronales convolucionales (CNN) para la estimación del estado de maduración de las manzanas Fuji, y la estimación de la cantidad de nitrógeno presente en las hojas de los tomates. La eficacia, robustez y fiabilidad de estas técnicas han quedado ampliamente demostradas con los experimentos descritos en los tres artículos.

Con los experimentos desarrollados, se puede asegurar que tanto el objetivo general como los objetivos específicos definidos al inicio del trabajo han quedado plenamente cubiertos en el ámbito de la tesis doctoral aquí descrita:

- Se han extraído datos espectrales de muestras de manzanas divididas en cuatro fases diferentes (inmadura, semi-madura, madura y sobre-madura) utilizando una cámara hiperespectral.
- Se han estudiado y aplicado técnicas para reducir el ruido que aparece en los datos espectrales utilizando métodos de normalización.
- Se ha diseñado un algoritmo para la clasificación no destructiva del estado de maduración de manzanas basado en información espectral Vis/NIR (de 450 a 1000nm) utilizando CNN unidimensionales.
- Se ha desarrollado una aplicación para clasificar automáticamente las muestras de manzana según su información espectral.
- Se ha comparado la eficacia del método propuesto con tres clasificadores de aprendizaje automático, incluyendo redes neuronales artificiales (ANN), máquinas de vectores de soporte (SVM) y k-vecinos más cercanos (KNN). Los resultados demostraron que el clasificador CNN superó a los métodos alternativos, alcanzando una tasa de clasificación correcta del 96,5%.
- Se ha extraído también información hiperespectral de imágenes de hojas de tomate Royal en diferentes longitudes de onda de 400 a 1100 nm, tomadas de diferentes

tratamientos con contenido normal de nitrógeno y después de 1, 2 y 3 días con una sobredosis de 30% de fertilizante nitrogenado.

- Se ha diseñado un algoritmo para la detección no destructiva del exceso de nitrógeno en las hojas de tomate de la variedad Royal. En este caso, se compararon tres enfoques de clasificación diversos que utilizaban métodos clásicos de aprendizaje automático, combinaciones híbridas de redes neuronales artificiales y algoritmos metaheurísticos y redes neuronales convolucionales. Los métodos utilizados para la comparación incluían dos técnicas clásicas de aprendizaje automático, SVM y análisis de discriminantes lineales (LDA), tres enfoques híbridos, ANN-algoritmo imperialista competitivo (ICA), ANN-búsqueda de armonía (HS) y ANN-algoritmo de las abejas (BA), y cuatro arquitecturas de CNN con un número creciente de capas convolucionales. Los experimentos mostraron que el enfoque basado en CNN obtuvo el mejor resultado, con un acierto superior al 91%.
- Se ha diseñado y aplicado un nuevo mecanismo de atención para el algoritmo de detección no destructiva del exceso de nitrógeno en las hojas de la variedad de tomate Royal, basado en el mejor modelo de CNN previamente diseñado.
- Se ha comparado la fiabilidad de la CNN basada en el mecanismo de atención propuesta con una CNN alternativa con la misma arquitectura, pero sin integrar el mecanismo de atención, y con otros modelos de CNN, AlexNet y VGGNet. Los resultados experimentales mostraron que la CNN con un mecanismo de atención superó a la CNN alternativa, alcanzando una tasa de clasificación correcta (CCR) del 97,33%. En cuanto a los resultados obtenidos, solo VGGNet con atención logró un excelente CCR del 97,54%, que es ligeramente superior al de la CNN con atención propuesta. Sin embargo, el método VGGNet es más costoso computacionalmente, con 30 veces más parámetros de entrenamiento. Esto se tradujo en un proceso de entrenamiento más lento, que requería más de una hora para cada ejecución.

4.2. Vías futuras

Las aportaciones de esta tesis abren nuevas vías de investigación futura que será interesante explorar. En primer lugar, como ya se ha mencionado, desde un punto de vista práctico, la integración de los métodos propuestos para monitorizar el crecimiento de las plantas en un sistema de gestión totalmente automatizado, incluyendo la clasificación del estado de maduración de las manzanas y la detección del exceso de nitrógeno en las hojas del tomate. Alcanzar esta meta, que es uno de los objetivos de la tecnología agrícola y de la información, será un paso esencial para optimizar y mejorar los sistemas agrícolas.

Por otro lado, la mejora de los algoritmos para la clasificación del estado de madurez de las manzanas y la detección del exceso de nitrógeno en las hojas de tomate, que se probaron con un conjunto de datos pequeño en esta tesis, se probaría con un conjunto de datos grande y con los intervalos espectrales más eficientes. Probar la robustez de estos algoritmos frente a diferentes temporadas de cultivo, ubicaciones, variedades de fruta y equipos de captura es un campo potencial de investigación futura. El desarrollo de un nuevo modelo CNN con un mecanismo de atención que pueda aprender información de características espaciales y espectrales a partir de imágenes hiperespectrales para detectar conjuntamente hojas anormales (pálidas y retorcidas) y exceso de nitrógeno es otro campo potencial de investigación futura.

Por último, y también en el contexto de otros problemas interesantes, otra posible vía de futuro es utilizar los algoritmos de detección como base para el desarrollo de nuevas aplicaciones de detección de plagas y enfermedades en plantas de cultivo, considerando las distintas tonalidades que se encuentran en las hojas o frutos de la parcela de muestreo. Lógicamente, la resolución de estos problemas requerirá una estrecha colaboración con expertos del ámbito agronómico para la obtención de grandes volúmenes de imágenes, para su posterior experimentación.

Referencias

- [1] Z. Zhan, D., Mu, Y., Duan, W., Ye, M., Song, Y., Song, Z., ... & Ding, “Spatial Prediction and Mapping of Soil Water Content by TPE-GBDT Model in Chinese Coastal Delta Farmland with Sentinel-2 Remote Sensing Data,” *Agriculture*, vol. 13(5), no. 1088, 2023.
- [2] D. Helber, P., Bischke, B., Dengel, A., & Borth, “Eurosat: A novel dataset and deep learning benchmark for land use and land cover classification,” *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.*, vol. 12(7), pp. 2217–2226, 2019.
- [3] B. Matese, A., Toscano, P., Di Gennaro, S. F., Genesio, L., Vaccari, F. P., Primicerio, J., ... & Gioli, “Intercomparison of UAV, aircraft and satellite remote sensing platforms for precision viticulture,” *Remote Sens.*, vol. 7(3), pp. 2971–2990, 2005.
- [4] N. S. Vasudevan, A., Kumar, D. A., & Bhuvaneswari, “Precision farming using unmanned aerial and ground vehicles,” 2016 IEEE Technol. Innov. ICT Agric. Rural Dev., pp. 146–150, 2016.
- [5] J. P. Rivera, G., Porrás, R., Florencia, R., & Sánchez-Solís, “LiDAR applications in precision agriculture for cultivating crops: A review of recent advances,” *Comput. Electron. Agric.*, vol. 207, p. 107737, 2023.
- [6] K. Sharabian, V. R., Noguchi, N., Han-Ya, I., & Ishi, “Evaluation of an active remote sensor for monitoring winter wheat growth status,” *Eng. Agric. Environ. food*, vol. 6(3), pp. 118–127, 2013.
- [7] M. A. Farooq, M. S., Riaz, S., Abid, A., Abid, K., & Naeem, “A Survey on the Role of IoT in Agriculture for the Implementation of Smart Farming,” *Ieee Access*, vol. 7, pp. 156237–156271, 2019.
- [8] J. Lu, B., Dao, P. D., Liu, J., He, Y., & Shang, “Recent Advances of Hyperspectral Imaging Technology and Applications in Agriculture,” *Remote Sens.*, vol. 12(16), p. 2659, 2020.
- [9] R. Cilia, C., Panigada, C., Rossini, M., Meroni, M., Busetto, L., Amaducci, S., ... & Colombo, “Nitrogen status assessment for variable rate fertilization in maize through hyperspectral imagery,” *Remote Sens.*, vol. 6(7), pp. 6549–6565.

- [10] P. Abdulridha, J., Ampatzidis, Y., Kakarla, S. C., & Roberts, “Detection of target spot and bacterial spot diseases in tomato using UAV-based and benchtop-based hyperspectral imaging techniques,” *Precis. Agric.*, vol. 21, pp. 955–978, 2020.
- [11] S. Liu, Z., Li, H., Ding, X., Cao, X., Chen, H., & Zhang, “Estimating Maize Maturity by Using UAV Multi-Spectral Images Combined with a CCC-Based Model,” *Drones*, vol. 7(9), p. 586, 2023.
- [12] S. N. Goel, S., Guleria, K., & Panda, “Machine learning techniques for precision agriculture using wireless sensor networks,” *ECS Trans.*, vol. 107(1), p. 9229, 2022.
- [13] Basak, J. K., Paudel, B., Kim, N. E., Deb, N. C., Kaushalya Madhavi, B. G., & Kim, H.T., “Non-Destructive Estimation of Fruit Weight of Strawberry Using Machine Learning Models,” *Agronomy*, vol. 12(10), p. 2487.
- [14] B.M. Abdel-Sattar, M., Aboukarima, A. M., & Alnahdi, “Application of artificial neural network and support vector regression in predicting mass of ber fruits (*Ziziphus mauritiana* Lamk.) based on fruit axial dimensions,” *PLoS One*, vol. 16(1), p. e0245228, 2021.
- [15] H. Tan, W., Zhao, C., & Wu, “Intelligent alerting for fruit-melon lesion image based on momentum deep learning,” *Multimedia*, no. 75, pp. 16741–16761, 2016.
- [16] S. V Aruraj, A., Alex, A., Subathra, M. S. P., Sairamy, N. J., George, S. T., & Edwards, “Detection and classification of diseases of banana plant using local binary pattern and support vector machine,” *IEEE*, In 2019 2n, pp. 231–235, 2019.
- [17] M. S. Aherwadi, N., Mittal, U., Singla, J., Jhanjhi, N. Z., Yassine, A., & Hossain, “Prediction of fruit maturity, quality, and its life using deep learning algorithms,” *Electronics*, vol. 11(24), p. 4100, 2022.
- [18] K. D. Cho, J. S., Choi, J. Y., & Moon, “Hyperspectral imaging technology for monitoring of moisture contents of dried persimmons during drying process,” *Food Scien*, no. 29, pp. 1407–1412, 2020.
- [19] G. Li, X., Liu, Y., Jiang, X., & Wang, “Supervised classification of slightly bruised peaches with respect to the time after bruising by using hyperspectral imaging technology,” *Infrared Phys. Technol.*, vol. 113, p. 103557, 2021.

- [20] J. M. Abbaspour-Gilandeh, Y., Sabzi, S., Benmouna, B., García-Mateos, G., Hernández-Hernández, J. L., & Molina-Martínez, “Estimation of the constituent properties of red delicious apples using a hybrid of artificial neural networks and artificial bee colony algorithm,” *Agronomy*, vol. 10(2), p. 267, 2020.
- [21] Y. B. Vursavusa, K. K., Kesilmisb, Z., & Oztekinc, “Nondestructive dropped fruit impact test for assessing tomato firmness,” *Chem. Eng.*, vol. 58, pp. 1–6, 2017.
- [22] S. H. Davur, Y. J., Kämper, W., Khoshelham, K., Trueman, S. J., & Bai, “Estimating the ripeness of Hass avocado fruit using deep learning with hyperspectral imaging,” *Horticulturae*, vol. 9(5), p. 599, 2023.
- [23] J. Pourdarbani, R., Sabzi, S., Nadimi, M., & Paliwal, “Interpretation of Hyperspectral Images Using Integrated Gradients to Detect Bruising in Lemons,” *Horticulturae*, vol. 9(7), p. 750.
- [24] T. Zhang, X., Han, L., Dong, Y., Shi, Y., Huang, W., Han, L., ... & Sobeih, “A deep learning-based approach for automated yellow rust disease detection from high-resolution hyperspectral UAV images,” *Remote Sens.*, vol. 11(13), p. 1554, 2019.
- [25] S. H. Yang, J., Sun, Y., Liang, J., Ren, B., & Lai, “Image captioning by incorporating affective concepts learned from both visual and textual components,” *Neurocomputing*, vol. 328, pp. 56–68.
- [26] Y. Jia, “Attention mechanism in machine translation,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. Vol. 1314, p. 012186, 2019.
- [27] T. Song, K., Yao, T., Ling, Q., & Mei, “Boosting image sentiment analysis with visual attention,” *Neurocomputing*, vol. 312, pp. 218–228, 2018.
- [28] L. Gao, M., Lu, T., & Wang, “Crop Mapping Based on Sentinel-2 Images Using Semantic Segmentation Model of Attention Mechanism,” *Sensors*, vol. 23(15), p. 7008, 2023.
- [29] J. Huang, H., Tang, Y., Tan, Z., Zhuang, J., Hou, C., Chen, W., & Ren, “Object-Based Attention Mechanism for Color Calibration of UAV Remote Sensing Images in Precision Agriculture,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 60, pp. 1–13, 2022.
- [30] Z. Lu, R., Wang, N., Zhang, Y., Lin, Y., Wu, W., & Shi, “Extraction of agricultural

- fields via dasfnet with dual attention mechanism and multi-scale feature fusion in south xinjiang, china,” *Remote Sens.*, vol. 14(9), p. 2253, 2022.
- [31] Z. Liu, F., Jiang, X., & Wu, “Attention Mechanism-Combined LSTM for Grain Yield Prediction in China Using Multi-Source Satellite Imagery,” *Sustainability*, vol. 15(12), p. 9210, 2023.
- [32] H. Jia, Y., Shi, Y., Luo, J., & Sun, “Identification of Typical Diseases of Corn Leaves Using a 3D–2D Hybrid CNN Model Combined with a Hyperspectral Image Band Selection Module,” *Sensors*, vol. 23(3), p. 1494.
- [33] W. Xiaoyan, W., Zhiwei, L., Wenjun, W., & Jiawei, “Chlorophyll content for millet leaf using hyperspectral imaging and an attention-convolutional neural network,” *Ciência Rural*, vol. 50, 2020.