

RESUMEN

Para las industrias agroalimentarias es fundamental asegurar que el producto llegue a los consumidores con la mayor calidad posible. En los últimos años, se ha logrado garantizar una buena calidad externa gracias a sistemas avanzados de visión por ordenador integrados en las líneas comerciales. Sin embargo, asegurar una buena calidad interna sigue siendo un tema pendiente que requiere nuevos equipos y técnicas más avanzadas. Algunos atributos, como el contenido de azúcar, la acidez, la textura o la presencia de daños internos, son fundamentales para garantizar la calidad interna de los productos y así satisfacer las expectativas de los consumidores. Los métodos tradicionales para estimar estos atributos requieren realizar un muestreo y un análisis destructivo de una parte de la fruta, lo que, junto con el desperdicio generado, no asegura un resultado óptimo en la evaluación de calidad debido a la heterogeneidad de la fruta. El uso de tecnologías ópticas innovadoras junto con métodos avanzados de análisis de datos puede ofrecer a la industria nuevas herramientas para analizar la fruta en su totalidad y asegurar la calidad del producto que llega al consumidor.

El objetivo principal de esta tesis doctoral fue explorar el potencial de técnicas no destructivas, como son la imagen hiperespectral y la espectroscopía Raman, combinadas con métodos de análisis de datos basados en redes neuronales, para evaluar las cualidades y propiedades internas de las frutas, evitar el fraude alimentario, predecir la aceptación del consumidor y garantizar la seguridad alimentaria. Para estimar atributos relacionados con la calidad, se llevaron a cabo tres experimentos diferentes con imagen hiperespectral en frutas de especial importancia para los mercados holandés, belga y valenciano, como fresas, ciruelas y caquis, utilizando sistemas basados en imágenes hiperespectrales. Para asegurar la inocuidad alimentaria, se llevó a cabo un cuarto experimento utilizando espectroscopía Raman y productos fitosanitarios comúnmente utilizados en el cultivo de manzanas. El primer experimento se centró en fresas, cuyo objetivo fue predecir los parámetros de calidad interna y la aceptación del consumidor, además de identificar diferentes cultivares para prevenir el fraude alimentario utilizando redes neuronales artificiales (ANNs). El segundo experimento tuvo como propósito categorizar la textura de la pulpa de caquis en tres niveles de firmeza directamente relacionados con los estándares industriales, utilizando autoencoders variacionales (VAEs) para la reducción de la dimensionalidad. El tercer experimento se realizó con ciruelas y se enfocó en detectar golpes invisibles utilizando redes neuronales convolucionales (CNNs) para minimizar el desperdicio alimentario en los centros hortofrutícolas y de almacenamiento. En el cuarto experimento, cuya finalidad era asegurar la inocuidad alimentaria, se utilizó espectroscopía Raman y CNNs unidimensionales para identificar hasta nueve compuestos activos diferentes comúnmente presentes en mezclas complejas de fitosanitarios aplicadas a manzanas.

Los resultados de los ensayos demostraron la viabilidad en el uso de la imagen espectral VIS-NIR y ANNs para predecir atributos de calidad en fresas, como los sólidos solubles totales (TSS), la acidez titulable (TA), la textura y la aceptación del consumidor. Los modelos de ANN lograron alta

precisión predictiva ($R^2 = 0,85$ para TSS y $R^2 = 0,81$ para TA), superando a los métodos tradicionales de aprendizaje automático. La aceptación del consumidor para cada cultivar se predijo con un $R^2 = 0,78$, mientras que la discriminación entre cultivares alcanzó una puntuación F1 del 84 %. Para los caquis 'Rojo Brillante', la imagen hiperespectral combinada con VAEs permitió una reducción del 99 % de los datos, clasificando la firmeza con una precisión del 81,3 %. En el caso de las ciruelas, las CNNs detectaron eficazmente golpes en etapas tempranas en cultivares de piel oscura, logrando una puntuación F1 del 90 %. Asimismo, la espectroscopía Raman detectó compuestos activos de fitosanitarios en mezclas complejas aplicadas a manzanas, alcanzando hasta un 100 % de precisión para compuestos específicos mediante CNNs unidimensionales.

Esta investigación tiene un impacto práctico más allá del ámbito académico. Para los consumidores, garantiza productos más seguros y de mayor calidad mediante la detección rápida de residuos de pesticidas y defectos, mejorando la experiencia sensorial al alinearse con las preferencias del consumidor. Para las centrales hortofrutícolas, las técnicas no destructivas combinadas con ANNs ofrecen métodos escalables y eficientes para inspeccionar y clasificar frutas, reduciendo desperdicios y optimizando el almacenamiento. Para los mejoradores de cultivos, facilita el desarrollo de nuevos cultivares que satisfagan las demandas del mercado en cuanto a sabor, textura y nutrición. Además, estos hallazgos respaldan el cumplimiento de la seguridad alimentaria y protegen la salud pública respecto a la utilización de productos fitosanitarios.