

**Título del artículo de revisión**

**Evaluación de calidad, infestaciones e identificación de componentes en cítricos mediante espectroscopia de infrarrojo cercano (NIRS)**

**Datos de la propuesta**

|                        |                                                           |
|------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Grupo de investigación | Grupo de Investigación en Electroquímica y Medio Ambiente |
| Línea de investigación | Alimentos y Fármacos                                      |

**Estudiante (s)**

|                |                                                                                                                                           |
|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Nombre:        | Karol Lisbeth Díaz Hurtado                                                                                                                |
| Identificación | 1149687559                                                                                                                                |
| Correo:        | <a href="mailto:Karol.diaz00@usc.edu.co">Karol.diaz00@usc.edu.co</a> – <a href="mailto:karoldiazh13@gmail.com">karoldiazh13@gmail.com</a> |
| Teléfono:      | 3233144680 – 3236120456                                                                                                                   |
| Nombre:        |                                                                                                                                           |
| Identificación |                                                                                                                                           |
| Correo:        |                                                                                                                                           |
| Teléfono:      |                                                                                                                                           |

**Director**

|                |                                                                |
|----------------|----------------------------------------------------------------|
| Nombre:        | Sandra Patricia Castro Narváez                                 |
| Identificación | 66828612                                                       |
| Correo:        | <a href="mailto:Sandraca0@usc.edu.co">Sandraca0@usc.edu.co</a> |
| Teléfono:      | 3013268627                                                     |

**Codirector**

|                |  |
|----------------|--|
| Nombre:        |  |
| Identificación |  |
| Correo:        |  |
| Teléfono:      |  |

# **Evaluación de calidad, infestaciones e identificación de componentes en cítricos mediante espectroscopia de infrarrojo cercano (NIRS)**

**Karol Lisbeth Díaz Hurtado**

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:  
**Química.**

Directora:  
MSc. Sandra Patricia Castro Narváez

Línea de Investigación:  
Alimentos y Fármacos

Grupo de Investigación:  
Grupo de Investigación en Electroquímica y medio Ambiente

Universidad Santiago de Cali  
Facultad de Ciencias Básicas,  
Programa Química  
Cali, Colombia  
2024

# Evaluación de calidad, infestaciones e identificación de componentes en cítricos mediante espectroscopia de infrarrojo cercano (NIRS)

Karol Lisbeth Díaz Hurtado<sup>1</sup>, Sandra Patricia Castro Narváez<sup>2</sup>

Grupo Investigación en Electroquímica y Medio Ambiente

Programa de Química, Facultad de Ciencias Básicas, Universidad Santiago de Cali.

<sup>1</sup> [karol.diaz00@usc.edu.co](mailto:karol.diaz00@usc.edu.co) <sup>2</sup> [sandracaastro00@usc.edu.co](mailto:sandracaastro00@usc.edu.co)

## Resumen

La espectroscopia infrarroja cercana (NIRS) se ha establecido como una tecnología crucial en la agricultura moderna, especialmente para la evaluación de cítricos. Este artículo revisó y comparó los estudios recientes sobre la aplicación de NIRS en la evaluación de la calidad de frutos cítricos, la detección de infestaciones y la identificación de componentes químicos. La metodología empleada incluye el análisis de diversas técnicas de NIRS, como la reflectancia y la espectroscopía transformada de Fourier (FT-NIR), aplicadas en diferentes equipos y rangos de longitud de onda. Los resultados evidencian que las técnicas de reflectancia y FT-NIR proporcionan alta precisión en la evaluación de parámetros de calidad como sólidos solubles, acidez titulable, y madurez del fruto y que requieren de métodos validados mediante modelos multivariantes. La NIRS permite identificación de plagas no visibles a simple vista y en la determinación de componentes bioactivos como flavonoides y ácidos orgánicos, ofreciendo evaluaciones rápidas y no destructivas, tiene el potencial de optimizar la cadena de suministro de cítricos, mejorando la calidad del producto y facilitando el monitoreo en tiempo real.

**Palabras clave:** Algoritmos de validación, Tecnología agrícola. Técnica de análisis no destructiva, Monitoreo tiempo real.

## Abstract

Near infrared spectroscopy (NIRS) has established itself as a crucial technology in modern agriculture, especially for citrus evaluation. This article reviewed and compared recent studies on the application of NIRS in citrus fruit quality assessment, infestation detection, and chemical component identification. The methodology employed includes the analysis of various NIRS techniques, such as reflectance and Fourier transform spectroscopy (FT-NIR), applied in different equipment and wavelength ranges. The results show that reflectance and FT-NIR techniques provide high accuracy in the

evaluation of quality parameters such as soluble solids, titratable acidity, and fruit maturity and require methods validated by multivariate models. NIRS allows identification of pests not visible to the naked eye and in the determination of bioactive components such as flavonoids and organic acids, offering rapid and non-destructive evaluations, has the potential to optimize the citrus supply chain, improving product quality and facilitating real-time monitoring.

**Key Words:** Validation algorithms, Agricultural technology. Non-destructive analysis technique, Real time monitoring.

## **1 Introducción**

El cultivo de cítricos es crucial para la agricultura global, no solo por su importancia económica, sino también por su impacto en la seguridad alimentaria y en la nutrición (Castillo-Villamizar et al., 2024). Según estadísticas de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), la producción de cítricos a 2019 ascendió a 143.7 mil toneladas, siendo China el principal productor (22.3%), seguido por Brasil (13.7%). Los principales cítricos producidos y comercializados fueron los naranjas (53.0%), tangerinas (26.0%), limones y limas (14.3%) y pomelos (6.7%). La producción de cítricos en Colombia es equitativa entre naranjas y limones y corresponden al 80%, el 20% restante son de tangerinas; en América del Sur ocupa el cuarto lugar en producción, antecedido por Brasil, Argentina y Perú (FAO, 2021).

El sector frutícola global enfrenta desafíos continuos para satisfacer las crecientes expectativas de calidad de los consumidores. La madurez de la fruta, influenciada por factores como el tiempo de recepción, el transporte y el almacenamiento, impacta significativamente su calidad final. En este contexto, la necesidad de una evaluación rápida y no destructiva de la calidad de las frutas ha cobrado una importancia creciente. La espectroscopía visible e infrarroja cercana (Vis/NIR) se ha destacado como una técnica avanzada para la evaluación de calidad debido a su alta repetibilidad, facilidad de operación y estabilidad en las mediciones. Wang et al. (2022) subrayan que esta técnica permite una evaluación eficiente sin dañar las frutas, lo cual es crucial para mantener la calidad y prolongar la vida útil del producto.

Durante la última década, la espectroscopía NIR ha emergido como una tecnología clave para el monitoreo de materias primas y productos hortícolas, ofreciendo soluciones rápidas para la discriminación y cuantificación de compuestos orgánicos (Cattaneo & Stellari, 2019). La tecnología Vis/NIR ha demostrado ser útil no solo en la evaluación de macro constituyentes en productos frescos, sino también en una variedad de atributos a lo largo de la cadena de valor poscosecha, desde el huerto hasta el consumidor. Walsh et al. (2020) destacan que la aplicación de esta tecnología en diferentes etapas de la cadena poscosecha ha mejorado la capacidad para evaluar la calidad y la madurez de

las frutas, facilitando la toma de decisiones en tiempo real. Sin embargo, la adopción generalizada enfrenta varios obstáculos, incluyendo el alto costo de los equipos, la necesidad de conocimientos especializados y la falta de robustez en los modelos aplicables a diferentes entornos y tipos de frutas (Wang et al., 2022).

Para abordar estas limitaciones, se están desarrollando biosensores integrados de bajo costo que permiten la evaluación no invasiva de la calidad de las frutas. Aunque estos sistemas presentan ventajas como la simplicidad y el bajo costo, aún enfrentan desafíos en términos de precisión y robustez (Pandiselvam et al., 2022). Se anticipa que los avances en miniaturización y la integración de espectrómetros en otros dispositivos expandirán su uso en la industria frutícola, lo que podría democratizar el acceso a tecnologías avanzadas para la evaluación de la calidad de las frutas (Walsh et al., 2020). Estos desarrollos prometen mejorar la precisión en la medición de parámetros críticos y hacer que la tecnología sea más accesible para los productores y proveedores.

La creciente disponibilidad de tecnologías de medición, como los espectrómetros Vis/NIR, ha fomentado un aumento en la investigación poscosecha. Estos avances han permitido no solo aplicaciones comerciales en empaques, sino también el desarrollo de dispositivos portátiles utilizados a lo largo de la cadena de valor poscosecha (Walsh et al., 2020). La literatura indica que nuevas oportunidades pueden surgir para explorar aplicaciones adicionales y mejorar la precisión en la evaluación de la calidad de frutas y productos hortícolas. Cattaneo & Stellari (2019) sugieren que la integración de tecnologías emergentes con métodos de análisis tradicionales podría ofrecer una visión más completa y precisa del estado de las frutas durante su manipulación y almacenamiento.

A pesar de su relevancia económica, los cítricos enfrentan pérdidas significativas postcosecha, que oscilan entre el 30% y el 50% debido a enfermedades y trastornos metabólicos. La preservación de la calidad y la reducción de desechos son esenciales para mantener la calidad y prolongar la vida útil de las frutas cítricas (Strano et al., 2022). Investigaciones recientes destacan la necesidad de estrategias innovadoras para reducir el uso de fungicidas sintéticos y mitigar los impactos ambientales. Strano et al. (2022) identifican tecnologías emergentes, como técnicas de preenfriamiento y películas plásticas avanzadas, que están diseñadas para mejorar el control de enfermedades y reducir las pérdidas de alimentos. Estas estrategias pueden complementar el uso de espectroscopía NIR para lograr una gestión más eficiente de los recursos y una menor dependencia de tratamientos químicos.

Con la creciente demanda de métodos de cultivo más sostenibles, la comprensión de la diversidad microbiana del suelo es esencial para mejorar las prácticas agrícolas (Castillo-Villamizar et al., 2024). En particular, el estudio del bacterioma en cultivos de cítricos proporciona información valiosa sobre las comunidades microbianas que influyen en la salud del suelo y la calidad del fruto. Las técnicas NIRS han emergido como herramientas poderosas para evaluar la calidad de frutas de manera rápida y no

destructiva, lo que contrasta con los métodos destructivos tradicionales que requieren análisis fisicoquímico de las muestras y un alto consumo de recursos (Pérez-Marín et al., 2019).

Los avances en espectroscopía han permitido la implementación de métodos de evaluación más eficientes. Por ejemplo, la espectroscopía de onda corta ha demostrado ser efectiva para la clasificación de la dulzura en naranjas y otros parámetros de calidad (Zeb Ayesha et al., 2023). El enfoque de NIRS se ha adaptado para abordar desafíos específicos, como la evaluación del contenido de vitamina C en cáscaras de cítricos. Los estudios recientes han mostrado que la espectroscopía NIR puede estimar el contenido de vitamina C con alta precisión, facilitando el reciclaje de subproductos agrícolas y contribuyendo a prácticas más sostenibles (Zhang W. et al., 2023). Además, la integración de modelos de aprendizaje automático, como SpectraNet-53, ha mejorado la capacidad de predicción en comparación con métodos tradicionales como el análisis de componentes principales (PLS) (Martins et al., 2022). En conjunto, estos avances reflejan un cambio hacia métodos de evaluación más rápidos y menos invasivos, que no solo mejoran la eficiencia en la clasificación de la calidad de los frutos, sino que también promueven prácticas agrícolas más sostenibles y una mejor valorización de los subproductos cítricos.

La NIRS se ha utilizado en diversas aplicaciones para evaluar la calidad de los frutos, Włodarska et al. (2021) investigaron el uso de la espectroscopia NIR para predecir el contenido de agua y aceite en racimos de fruta fresca de palma aceitera. Utilizando un espectrómetro NIRFlex N-500 y la técnica de regresión de mínimos cuadrados parciales (PLS), desarrollaron un modelo de calibración que predijo con precisión el contenido de agua, aunque el modelo para el contenido de aceite no fue satisfactorio según los parámetros estadísticos. Por otro lado, Zeb et al. (2022) evaluaron el potencial de la espectroscopia NIR de onda corta para clasificar la dulzura de cultivares paquistaníes de naranja. Utilizando el medidor de calidad de frutas F-750 y modelos de regresión PLS, encontraron una buena correlación entre el espectro NIR y la evaluación sensorial directa de la dulzura, lo que sugiere que la clasificación directa es más adecuada que la estimación de índices de calidad.

En contraste, Jiang et al. (2022) abordaron el problema de la variabilidad en el tamaño de las manzanas, que afecta la precisión de los modelos de predicción de contenido de sólidos solubles (SSC). Propusieron un método de corrección espectral que mejoró significativamente el rendimiento de los modelos PLSR al estandarizar los espectros NIR de manzanas de diferentes diámetros. Por su parte, Wang et al. (2018) desarrollaron un algoritmo de detección y conteo de cítricos inmaduros utilizando visión por computadora, bajo condiciones de iluminación variables y oclusiones aleatorias. Su enfoque incluyó la normalización de la iluminación y la transformación de Hough circular, logrando una precisión del 85.6% en la detección y del 92.5% en el conteo de frutos inmaduros. Estos estudios demuestran la versatilidad y los desafíos de la NIRS en

diferentes contextos agrícolas, resaltando tanto sus aplicaciones exitosas como las áreas que requieren mejoras. Estos estudios demuestran la versatilidad y eficacia de la espectroscopia NIR para la evaluación de la calidad de frutos en diferentes contextos. Aunque existen desafíos relacionados con la variabilidad del tamaño y la composición de los frutos, los avances en la tecnología y el desarrollo de algoritmos específicos continúan mejorando la precisión y aplicabilidad de NIRS en la industria agrícola. La adopción de estas técnicas promete optimizar la producción, reducir el desperdicio y mejorar la satisfacción del consumidor final (Beghi et al., 2017; Dhiman et al., 2023).

Este artículo revisa las aplicaciones de la NIRS en frutas cítricas, enfocándose en su papel en la evaluación de calidad, determinación de madurez y gestión de procesos postcosecha. A través de una revisión de la literatura actual y los avances tecnológicos, se destaca el impacto de NIRS en la reducción del desperdicio y en la mejora de la calidad general de las frutas cítricas, abordando las limitaciones y desafíos existentes en el uso de esta tecnología. La revisión también explora cómo la integración de modelos de aprendizaje automático y técnicas avanzadas de espectroscopía puede ofrecer soluciones innovadoras para superar los desafíos actuales en la evaluación de la calidad de las frutas cítricas.

## **2 Metodología**

Este protocolo de investigación detalla el proceso de búsqueda y selección de literatura sobre la aplicación de la técnica NIRS en cítricos, con el objetivo de garantizar la relevancia y calidad de los estudios incluidos. La metodología seguida permite la replicabilidad del estudio y asegura que los artículos seleccionados sean pertinentes y de alta calidad.

### *2.1 Búsqueda bibliográfica*

La búsqueda bibliográfica se realizó utilizando palabras clave específicas, tales como “Near-Infrared Spectroscopy (NIRS)”, “citrus fruits”, “fruit quality assessment”, “infestation determination” y “component identification”. Estas palabras fueron combinadas mediante operadores booleanos (AND, OR) para mejorar la precisión de los resultados. La búsqueda se limitó a estudios publicados entre 2017 y 2024 para asegurar la inclusión de información actualizada. Se priorizaron artículos de investigación originales y estudios de caso, excluyendo revisiones sistemáticas, artículos de opinión y aquellos no revisados por pares. La búsqueda se llevó a cabo en varias bases de datos, las cuales se registraron en la Tabla 1 junto con la cantidad de artículos encontrados y utilizados para el presente artículo.

**Tabla 1.** Distribución de Artículos por Base de Datos en la Revisión de Literatura

| <b>Base de Datos</b>       | <b>Cantidad de Artículos</b> |
|----------------------------|------------------------------|
| SpringerLink               | 10                           |
| Oxford Academic            | 2                            |
| ScienceDirect              | 10                           |
| Sage Journals              | 1                            |
| Royal Society of Chemistry | 2                            |
| ASABE                      | 1                            |
| Wiley Online Library       | 8                            |
| Taylor & Francis Online    | 1                            |
| IOPscience                 | 1                            |
| PubMed                     | 4                            |
| Google Scholar             | 10                           |

## 2.2 Criterios de inclusión

Los criterios de inclusión establecieron que solo se considerarían estudios publicados entre 2017 y 2024 para asegurar la relevancia o actualidad. Se dio preferencia a artículos revisados por pares y publicados en revistas científicas reconocidas, excluyendo artículos de opinión y aquellos sin revisión formal. La extracción de datos se organizó en tablas detalladas que incluían información como el año de publicación, la revista, el país, la institución, el tipo de estudio y los objetivos principales. Este método facilitó la verificación de la precisión de los datos, revisando citas y referencias para confirmar la exactitud de la información, y se resolvieron discrepancias contactando a los autores o revisando versiones adicionales de los artículos.

## 3 Revisión de literatura

### 3.1 Aplicaciones de NIRS en Cítricos

La espectroscopía infrarroja cercana ha emergido como una herramienta esencial en la industria agrícola (Squeo et al, 2024), especialmente en la gestión de cítricos (Ling et al, 2024). La medición precisa de parámetros críticos, como la calidad del fruto (Patel & Pathare, 2024), la detección de infestaciones (Li et al., 2023) y la identificación de componentes químicos (Cozzolino & Dayananda, 2024), es crucial para garantizar productos de alta calidad y mantener una cadena de suministro eficiente. La tecnología NIRS facilita evaluaciones rápidas y no destructivas, optimiza la toma de decisiones en tiempo real, promueve la sostenibilidad y reduce el desperdicio (Aykas & Rodriguez-Saona, 2024).

En los estudios por lo general, se estimaron las bandas de absorción de agua debido a los enlaces OH a 970, 1450, 1950 y 2250 nm; Las bandas distintivas en el segundo (920 nm) y el tercer (720 nm) armónico del estiramiento de OH y el estiramiento CH debida al tercer (910 nm) y el cuarto (750 nm) armónico son distintivas de son distintivas al almidón y azúcares en los frutos. Por otro lado, los ácidos orgánicos monoméricos se relacionan con el grupo OH de los sobretonos 1445, 1000 y 800 nm, que son apreciables con espectrometros de mesa NIR-TF por solaparse con el OH del agua y se deben correlacionar con el estiramiento C=O a 1890 nm.

En la revisión de la literatura, se identificaron varios estudios relevantes sobre aplicaciones NIRS en cítricos que pueden ser observados en la siguiente tabla:

**Tabla 2.** Estudios sobre NIRS en Cítricos: Técnicas, Equipos y Resultados

| Técnica de NIRS     | Equipo                                                                             | Longitud de Onda (nm) | Parámetros Evaluados                            | Resultados                                                                                                        | Referencia                      |
|---------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| Reflectancia Difusa | NIRMagic 1,100                                                                     | 600-1,100             | Contenido de sólidos solubles (SSC)             | Picos en 640-700 nm y 890-940 nm significativos para la predicción.                                               | Li Pao et al. (2020)            |
| Reflectancia        | Phazir 2400                                                                        | 1600-2400             | SSC, Acidez Titulable (TA), Firmeza             | Buen rendimiento en la evaluación de calidad del fruto.                                                           | Pérez-Marín et al. (2019)       |
| Reflectancia        | No especificado                                                                    | Alrededor de 850      | Madurez, Contenido de azúcar                    | Alta precisión en clasificación de madurez y contenido de azúcar.                                                 | González-González et al. (2021) |
| FT-NIR, MicroNIR    | FT-NIR: 10000-4000 $\text{cm}^{-1}$ ; MicroNIR: Menor número de longitudes de onda | No especificado       | Acidez titulable, contenido de ácido ascórbico  | FT-NIR mostró mejores resultados en acidez titulable; SVM fue más efectivo con MicroNIR para acidez y vitamina C. | Malegori et al. (2017)          |
| FT-NIR              | No especificado                                                                    | No especificado       | Madurez del fruto, contaminantes                | Evaluación precisa de madurez y contaminantes.                                                                    | Reza Jahani et al. (2022)       |
| Reflectancia        | No especificado                                                                    | 850-1050              | Contenido de jugo, azúcar, acidez               | Evaluación rápida y no destructiva de parámetros de calidad.                                                      | Badaró et al. (2020)            |
| Reflectancia        | No especificado                                                                    | No especificado       | Sólidos solubles totales, acidez titulable, pH  | Mediciones precisas de calidad, monitoreo efectivo.                                                               | Yoplac et al. (2019)            |
| Reflectancia Difusa | No especificado                                                                    | 700-1100              | Calidad del fruto, contenido de ácido ascórbico | Buen desempeño en la predicción de calidad y parámetros nutricionales.                                            | Torres et al. (2017)            |
| FT-NIR              | No especificado                                                                    | 800-2500              | SSC, firmeza                                    | Alta correlación con métodos tradicionales y buen desempeño en predicción de firmeza.                             | Iqbal et al. (2019)             |

| Técnica de NIRS                    | Equipo                | Longitud de Onda (nm)      | Parámetros Evaluados                                  | Resultados                                                                                                                                                                    | Referencia                              |
|------------------------------------|-----------------------|----------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| Reflectancia y secuenciación       | No especificado       | No especificado            | Composición bacteriana, bioprótesis                   | Identificación de comunidades bacterianas y potencial biotecnológico del aislamiento CP102.                                                                                   | Castillo-Villamizar et al. (2024)       |
| Espectroscopía NIR de onda corta   | F-750                 | 310–1100                   | Brix, dulzura                                         | Precisión del 81.03% en clasificación directa de la dulzura de naranjas; mejor correlación con evaluación sensorial.                                                          | Ayesha Zeb et al. (2023)                |
| Espectroscopía NIR                 | No especificado       | 912–1667                   | Vitamina C en cáscaras cítricos                       | Modelo SR-NC-MLR: buena capacidad predictiva para vitamina C, correlación de 0.949.                                                                                           | W. Zhang et al. (2023)                  |
| Deep Learning SpectraNet–53        | Portable spectrometer | Visible infrarrojo cercano | SSC                                                   | SpectraNet–53 superó a PLS y DeepSpectra en la predicción de SSC, con un 3.1 % mejor en RMSEP.                                                                                | Martins et al. (2022)                   |
| Reflectancia                       | No especificado       | No especificado            | SSC                                                   | La inclusión de factores externos (color y diámetro) mejoró el rendimiento del modelo PLS con $R_p = 0.987$ y $RMSEP = 0.19$ Brix.                                            | Huang et al. (2022)                     |
| FT-IR, UV–VIS                      | No especificado       | No especificado            | Total carotenoides, flavonoides, compuestos fenólicos | $R^2$ de 0.99 para carotenoides, flavonoides y compuestos fenólicos; técnica útil para selección rápida de muestras.                                                          | Song et al. (2017)                      |
| Visible y NIR                      | No especificado       | No especificado            | Enfermedad de greening de cítricos                    | La fusión de espectros Vis y NIR: alta precisión en la identificación de la enfermedad (100% de precisión) y mejor desempeño comparado con modelos de espectros individuales. | Xiao et al. (2023)                      |
| NIR, MIR                           | No especificado       | No especificado            | Firmeza, grosor de cáscara, contenido de pectina      | Firmeza: NIR y MIR mejores modelos PLSR con $r$ de 0.92 y 0.84. TD-NMR mejor predicción grosor de cáscara con $r = 0.72$ .                                                    | Bizzani et al. (2017)                   |
| NIR, LIBS                          | No especificado       | No especificado            | Contenido de minerales (Ca, Zn, K)                    | LIBS-NIR con MLP-PCA: precisión diagnóstica del 95.7% en el set de prueba.                                                                                                    | Xu F. et al. (2020)                     |
| NIR, LIBS                          | No especificado       | No especificado            | Contenido de minerales (Ca, Zn, K)                    | LIBS-NIR con MLP-PCA: precisión diagnóstica del 95.7% en el set de prueba.                                                                                                    | Ghanei Ghoooshkhaneh & Mollazade (2023) |
| UV–Vis–NIR, Ultrasound, Electronic | No especificado       | No especificado            | Contenido de azúcar,                                  | Modelos de fusión de datos de múltiples técnicas no destructivas: mejor                                                                                                       | Srivastava & Sadistap (2022)            |

| Técnica de NIRS       | Equipo          | Longitud de Onda (nm)             | Parámetros Evaluados          | Resultados                                                                                                      | Referencia        |
|-----------------------|-----------------|-----------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| nose, Machine vision  |                 |                                   | clorofila, TSS, volumen, peso | precisión en predicción de parámetros de calidad.                                                               |                   |
| Hyperspectral imaging | No especificado | 660.2–721.1, 708.5–750, 806.5–847 | Granulación en cítricos       | Modelos de CNN mejorados con capas de normalización: precisión del 100% en entrenamiento y 97.9% en validación. | Jie et al. (2021) |

Red neuronal convolucional (CNN); Espectroscopia de descomposición inducida por láser acoplada con infrarrojo cercano (LIBS-NIR); Infrarrojo cercano (NIR); Infrarrojo Medio (MIR); Perceptrón multicapa (MLP); Análisis de componente principal (PCA); Algoritmo de mínimos cuadrados parciales (PLS); Residuos de los datos de calibración (RMSEP). Algoritmo de regresión lineal múltiple (MLR),

### 3.2 Evaluación de la Calidad del Fruto

Malegori et al. (2017) compararon FT-NIR y MicroNIR, destacando que FT-NIR superó a MicroNIR en la modelización de la acidez titulable (promedio de  $2,29 \pm 0,27$  g de ácido málico  $100 \text{ g}^{-1}$ ), mientras que MicroNIR, combinado con el modelo de máquinas de vectores de soporte (SVM), resultó ser más eficaz en la predicción del ácido ascórbico con una media fue  $2844 \pm 449 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$ . La precisión del modelo para la acidez titulable ( $R^2 = 0,74$  y  $\text{RMSEP} = 0,14 \%$ ) fue mayor comparado con la del ácido ascórbico ( $R^2 = 0,49$  y  $\text{RMSEP} = 342 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$ ). Este hallazgo sugiere que FT-NIR es preferible para análisis de laboratorio detallados, mientras que MicroNIR con SVM es ideal para evaluaciones rápidas en campo. Los resultados de Badaró et al. (2020) utilizó el análisis de componentes principales (PCA) y el análisis discriminante lineal (LDA) en tres grupos: bajo (0-5%), intermedio (10-40%) y alto (50-100%) para estimar el contenido de pectina. Los modelos de regresión de mínimos cuadrados parciales (PLSR) basados en espectros completos mostraron mayor precisión ( $R^2 > 0,93$ ) que los basados en pocas longitudes de onda seleccionadas ( $R^2$  entre 0,92 y 0,94). Yoplac et al. (2019) evaluó el contenido de citral, aditivo que se utiliza ampliamente en bebidas, refrescos, panes, dulces, productos farmacéuticos debido a su amplio espectro; los modelos de validación en análisis de componentes principales-regresión multilíneal (PCA-MLR), análisis de componentes principales-red neuronal artificial (PCA-ANN), regresión de mínimos cuadrados parciales (PLSR) y una red neuronal artificial (ANN) de PLS y ANN evidencian  $R^2$  de 0,73 a 0,96 y un rango de error cuadrático medio (RMSE) de  $[0,061 - 0,140]$ . La investigación adicional de Pao Li et al. (2020) y Pérez-Marín et al. (2019) refuerza estas conclusiones al mostrar que las técnicas de reflectancia son efectivas para medir el contenido de sólidos solubles y la acidez titulable al utilizar la detección de valores atípicos se realizó utilizando la validación cruzada de dejar uno fuera (LOOCV) con el criterio  $3\sigma$  y correlaciones de 0.82. Sin embargo, Pérez-Marín et al. (2019) sugieren que el equipo Phazir 2400 ofrece mayor versatilidad y precisión en comparación con el NIRMagic 1100 utilizado por Pao Li et al. (2020). En todos los casos se describe la necesidad de utilizar sistemas multivariados para establecer agrupaciones y

correlaciones validadas con métodos primarios de análisis, enfocados en poder brindar predicciones más confiables.

Los estudios analizados muestran diferentes enfoques para la detección de la calidad de los frutos utilizando NIRS. Por ejemplo, Chen et al. (2021) aplicaron la tecnología NIRHI combinada con el método de PLS mejorado con función de base radial (RBF) para la predicción cuantitativa de contenidos de azúcar, vitamina C y ácido orgánico en pomelos. El método RBF-PLS mostró resultados prometedores, los errores predictivos del modelo fueron 1,076% para azúcar, 41,381 mg/kg para Vitamina C y 1,136 g/kg para ácidos orgánicos, que estaban por debajo del 15% de sus mediciones químicas de referencia. De manera similar, Xu. S. et al. (2020) aplicaron VIS/NIR para detectar el contenido de agua y el grado de granulamiento en pomelos, utilizaron método Savitzky-Golay (SG), método de corrección de dispersión multiplicativa (MSC) para el procesamiento de datos, el algoritmo genético (GA) para la extracción de características y PLSR para el modelado (el coeficiente de determinación y el error cuadrático medio del conjunto de validación fueron 0,712 y 0,0488, respectivamente). El grado de granulación se detectó mejor utilizando SG para el procesamiento de datos y PLSR para el modelado (la precisión de detección del conjunto de validación fue del 100%). Estos estudios destacan que, aunque la tecnología VIS/NIR es útil, se requieren métodos óptimos de procesamiento y modelado para mejorar la precisión de las predicciones, especialmente en frutas con cáscaras gruesas donde la penetración del haz de infrarrojo cercano no es tan profunda y que el modelo se debe ajustar a estándares primarios de validación.

. Estudios recientes, asociados con la calidad de los cítricos ha sido abordada por Kim et al. (2024), demuestran que la espectroscopía VNIR puede predecir de manera efectiva el contenido de sólidos solubles (SSC) en frutas cítricas mediante un modelo de regresión por mínimos cuadrados parciales (PLS). La integración de técnicas de preprocesamiento espectral, como el muestreo adaptativo competitivo ponderado (CARS), y la detección de valores atípicos han permitido una mejora significativa en la precisión de las predicciones ( $R^2$  y valores RMSE de aproximadamente 0,75 y 0,56 °Brix, respectivamente). La capacidad de NIRS para realizar evaluaciones rápidas y no destructivas facilita la clasificación y el manejo de frutas durante el proceso postcosecha, optimizando la eficiencia de las líneas de clasificación y contribuyendo a una mejor gestión de la calidad en la industria.

Santos et al. (2021) utilizaron sensores portátiles de NIRS, combinados con quimiometría, para evaluar la madurez y el contenido de vitamina C en diversos cítricos, como naranjas, limones y limas. Los modelos de regresión por mínimos cuadrados parciales presentaron predicción con  $R^2$  superiores a 0.75 para ácido ascórbico, vitamina C y sólidos totales solubles. Estos resultados después de ser validados con valores de referencia establecen que la portabilidad de los equipos NIRS puede proporcionar una evaluación precisa y no destructiva de la calidad del fruto, en tiempo real y con desplazamiento a los sembrados que son la primera información sobre la calidad y crean

criterios para la toma de decisiones antes de la cosecha como utilización de fertilizantes o bioestimulantes.

### *3.3 Detección de infestaciones*

La capacidad de NIRS para detectar infestaciones en cítricos ha sido documentada en diversos estudios. González-González et al. (2021) emplearon técnicas de reflectancia para identificar daños causados por plagas que no son visibles a simple vista. La tasa de detección de los daños causados por *T. urticae* con imágenes en color alcanzó el 92,5%, mientras que todas las hojas que no presentaron ningún daño fueron correctamente identificadas. Estos hallazgos se complementan con los resultados de Li, M. et al. (2023), quienes también utilizaron NIRS para identificar daños ocasionados por hongos. Encontraron que el efecto de modelado SVM es mejor que LDA, y el DWT-CARS-SVM basado en la función del kernel RBF tiene el desempeño máximo, las tasas de precisión del conjunto de entrenamiento y del conjunto de prueba fueron del 100% y el 97%. La combinación de técnicas de reflectancia y transmisión se complementan al proporcionar una evaluación de la salud del fruto.

Un aporte del NIRS a los problemas de los manipuladores automáticos de cosecha basados en visones asociados con la dificultad para identificar correctamente la fruta en las imágenes en condiciones de iluminación natural fueron abordados por Li et al. (2017) destacaron cómo la combinación de imágenes en color y en el infrarrojo cercano, junto con transformadas de onda de Daubechies (DWT), mejoran la identificación de las frutas. Este enfoque aporta a la detección de características específicas relacionadas con infestaciones y a su vez optimiza la clasificación de las frutas, al integrar información de múltiples longitudes de onda. Este análisis en el sitio de cultivo permite una evaluación de los daños y problemas asociados con infestaciones, facilitando así la intervención oportuna.

En el estudio de Nturambirwe et al. (2019), se comparó un espectrómetro de transformada de Fourier con diferentes configuraciones de muestreo para predecir las propiedades internas de las manzanas, como los sólidos solubles totales (TSS) y la acidez titulable (TA). Aunque este estudio se centró en manzanas, sus hallazgos son relevantes para la detección de infestaciones en cítricos. La capacidad de NIRS para realizar análisis no destructivos y automatizados es crucial para la detección temprana de infestaciones y daños en frutas, lo cual es esencial para el mantenimiento de la calidad y la seguridad alimentaria. La comparación entre diferentes modos de espectrometría mostró que el sistema EH del Matrix-F es adecuado para aplicaciones en línea, mejoró el rendimiento en un margen del 30% del error cuadrático medio original de validación cruzada para el sistema, lo que podría adaptarse a la industria de cítricos para mejorar la clasificación y la detección de problemas internos.

### 3.4 Identificación de Componentes

La identificación de componentes químicos en cítricos es de alta relevancia al analizar las cualidades del fruto. Rosli et al. (2018) la utilizaron en el rango de 600-930 nm para identificar flavonoides y ácidos orgánicos; la precisión lograda para el optimizado es del 70,5% con una sensibilidad y especificidad del 60,1% y 80,0% respectivamente. González-González et al. (2021) ampliaron esta aplicación al identificar aceites esenciales y compuestos bioactivos, proporcionando una visión más detallada de los perfiles químicos del fruto. La capacidad de NIRS para ofrecer un análisis detallado y no destructivo de una amplia gama de compuestos hace de esta técnica una herramienta atractiva para la industria de cítricos, como se evidencia en la tabla 3.

**Tabla 3.** Identificación de Componentes Químicos en Cítricos mediante NIRS

| Técnica de NIRS                                         | Longitud de Onda (nm)                               | Componentes Identificados                 | Resultados                                                                                                                            | Referencia                      |
|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| Reflectancia Difusa                                     | 600-617 nm, 639-665 nm, 890-930 nm                  | Flavonoides, Ácidos orgánicos             | Alta precisión en la identificación de componentes químicos.                                                                          | Rosli et al. (2018)             |
| Reflectancia                                            | No especificado                                     | Aceites esenciales, Compuestos bioactivos | Información valiosa sobre perfiles nutricionales y de calidad.                                                                        | González-González et al. (2021) |
| Reflectancia Difusa                                     | 700-1100 nm                                         | Ácidos orgánicos, Flavonoides             | Buen desempeño en la identificación de componentes nutricionales. Detección óptima de TSS                                             | Torres et al. (2017)            |
| Reflectancia                                            | No especificado                                     | Sólidos solubles totales (TSS), Acidez    | con SG + MSC + GA + PCA + CNN + PLSR. Acidez detectada con SG + MSC + GA + PLSR.                                                      | Xu et al. (2021)                |
| FT-IR, UV-VIS                                           | 650-1,000 nm, FT-IR (9,000–4,000 cm <sup>-1</sup> ) | Flavonoides, Carotenoides, Antocianinas   | Correlación (R <sup>2</sup> de 0.99) con métodos tradicionales para carotenoides, flavonoides y antocianinas.                         | Xudong Sun et al. (2022)        |
| NIR, MIR                                                | No especificado                                     | Contenido de pectina                      | NIR y MIR mostraron r = 0.84. en modelos PLSR                                                                                         | Bizzani et al. (2017)           |
| NIR, LIBS                                               | No especificado                                     | Ca, Zn, K                                 | LIBS-NIR con MLP-PCA tuvo precisión diagnóstica del 95.7% en el set de prueba.                                                        | F. Xu et al. (2020)             |
| UV-Vis-NIR, Ultrasound, Electronic nose, Machine vision | No especificado                                     | Azúcar, TSS, Peso, Clorofila, Volumen,    | Modelos de fusión de datos de múltiples técnicas no destructivas mostraron mejor precisión en la predicción de parámetros de calidad. | Srivastava & Sadistap (2022)    |

| Técnica de NIRS       | Longitud de Onda (nm)                | Componentes Identificados | Resultados                                                                                                                                            | Referencia        |
|-----------------------|--------------------------------------|---------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| Hyperspectral imaging | 660.2–721.1, 708.5–750, 806.5–847 nm | Granulación cítricos      | Modelos de CNN mejorados con capas de normalización alcanzaron una precisión del 100% en el set de entrenamiento y del 97.9% en el set de validación. | Jie et al. (2021) |

Red neuronal convolucional (CNN); Espectroscopia de descomposición inducida por láser acoplada con infrarrojo cercano (LIBS-NIR); Infrarrojo cercano (NIR); Infrarrojo Medio (MIR); Perceptrón multicapa (MLP); Análisis de componente principal (PCA); Algoritmo de mínimos cuadrados parciales (PLS); Residuos de los datos de calibración (RMSEP). Algoritmo de regresión lineal múltiple (MLR),

Tal como se muestra en la tabla 3, en el campo de la espectroscopía en el infrarrojo cercano, la identificación y evaluación de componentes en cítricos ha mostrado avances significativos, aunque los enfoques y resultados de los estudios evidencian tanto el potencial como las limitaciones de esta técnica.

Jahani et al. (2020) compararon la NIRS de un espectrómetro de mesa y uno portátil encontrando que ambos pueden diferenciar entre jugos de lima auténticos y adulterados, utilizando modelos multivariados como PLS-DA y k-NN. El rendimiento general de los modelos generados en los datos a escala automática fue del 98% y el 94,5% para FT-NIRS de mesa y SW-NIRS portátiles, respectivamente. La NIRS pudo detectar adulteraciones mediante la identificación de grupos funcionales asociados con aditivos comunes, como agua y ácido cítrico. Sin embargo, este enfoque no aborda adecuadamente parámetros internos críticos, como la acidez y la firmeza, lo cual podría ampliar la utilidad de la técnica en el análisis de calidad (Jahani et al., 2020).

En contraste, Sun Xiaopeng et al. (2020) combinaron NIRS con imagen hiperespectral para evaluar la granulación en pomelos. Esta integración permitió detectar cambios químicos internos asociados con defectos no visibles externamente, proporcionando una solución no destructiva y rápida para evaluar parámetros como el contenido de sólidos solubles y la acidez titulable. La precisión del modelo fue del 99% para PCA-GRNN, con precisión de clasificación (CA), sensibilidad de clasificación (CS) y especificidad de clasificación (CSP) de 0,9950, 0,9750 y 0,9934, respectivamente. Aunque la combinación de NIRS con la imagen hiperespectral es prometedora, requiere calibraciones precisas para asegurar la exactitud en la detección de defectos sutiles, lo cual se menciona en detalle en el estudio de Jahani et al. (2020) (Sun Xiaopeng et al., 2020).

Por otro lado, Xu et al. (2021) centraron su estudio en la detección de sólidos solubles totales y acidez en pomelos, y destacaron la necesidad de métodos avanzados de procesamiento de datos. Aunque la precisión para TSS fue relativamente alta, la detección de acidez mostró resultados menos satisfactorios, obtuvieron coeficiente de determinación y el error cuadrático medio (RMSE) del conjunto de validación para la detección de TSS de 0,72 y 0,49, respectivamente; y para la detección de acidez de 0,55

y 0,10, respectivamente.. Esta limitación refuerza la necesidad de mejorar los modelos y técnicas para obtener mediciones más confiables en diferentes parámetros de calidad, un aspecto no suficientemente explorado por Sun Xiaopeng et al. (2020) (Xu et al., 2021). Xudong Sun et al. (2022) investigaron el rendimiento de NIRS portátil para medir sólidos solubles y acidez en naranjas navel, subrayando la importancia de métodos de pretratamiento y técnicas de actualización de modelos para mejorar la robustez del instrumento. Aunque se lograron resultados satisfactorios para sólidos solubles ( $R^2$ , RMSEP y RPD de 0,54, 0,83 °Brix), la predicción de acidez ( $R^2$ , RMSEP y RPD 1,60 y 0,52, 0,83 °Brix) fue menos efectiva. Esto plantea un desafío para adaptar NIRS a diferentes frutas y condiciones, un problema similar al observado por Xu et al. (2021) pero con énfasis en la portabilidad y la robustez del instrumento (Xudong Sun et al., 2022).

Huang et al. (2022) abordaron la variabilidad en las medidas de espectros de mandarina, que a menudo afecta la exactitud de los modelos predictivos de sólidos solubles. Utilizaron modelos de calibración basados en regresión por mínimos cuadrados parciales y consideraron factores externos como el diámetro, color y grosor de la cáscara. Su estudio introdujo métodos innovadores, como la combinación del algoritmo ACO-PLS, logrando una alta precisión en la predicción del SSC ( $R_p$  de 0.987 y RMSEP de 0.19 °Brix). Este enfoque muestra una mejora significativa en la precisión al incorporar propiedades físicas, contrastando con las limitaciones observadas en otros estudios (Huang et al., 2022).

En contraste, Song et al. (2017) utilizaron espectroscopía FT-IR combinada con análisis PLS para predecir el contenido de carotenoides, flavonoides y compuestos fenólicos en frutas cítricas, obteniendo altos coeficientes de correlación ( $R^2$  de 0.99). Este enfoque demostró ser eficaz para la estimación de compuestos bioactivos, superando las correlaciones obtenidas con otras técnicas en estudios previos. Sin embargo, el estudio también sugiere la necesidad de ampliar la investigación a diferentes cultivares y condiciones para mejorar la precisión del modelo (Song et al., 2017).

Xiao et al. (2023) exploraron la detección de la enfermedad de la greening en cítricos utilizando fusión espectral de datos visibles e infrarrojos cercanos. Encontraron que el modelo de soporte vectorial de mínimos cuadrados (LS-SVM) con fusión a nivel de características basado en análisis de componentes principales (PCA) ofreció el mejor rendimiento, con una precisión del 100% para la identificación de diferentes niveles de la enfermedad. Esta metodología de fusión espectral muestra una solución eficaz para la detección no destructiva de enfermedades, destacándose sobre los modelos basados en espectros únicos, lo que ofrece una perspectiva adicional en comparación con el enfoque de Huang y Song (Xiao et al., 2023).

En general, la revisión de estos estudios exhiben que, aunque NIRS sigue siendo una herramienta poderosa para la evaluación no destructiva de cítricos, la precisión y eficacia varían según el enfoque y los parámetros evaluados. La combinación de

métodos espectrales y la inclusión de variables físicas han demostrado mejorar la precisión de las predicciones y detecciones, aunque cada estudio también señala áreas a mejorar. Estos avances subrayan el potencial de las técnicas espectroscópicas para transformar la gestión de la calidad y la salud de los cítricos, proporcionando herramientas más precisas y rápidas para los productores e investigadores del sector.

### *3.5 Comparación y Validación de Resultados*

La comparación entre los estudios revela que la espectroscopía en el infrarrojo cercano, tanto en técnicas de reflectancia como de transmisión, proporciona una evaluación precisa de la calidad del fruto y de componentes químicos. Sin embargo, la detección de infestaciones presenta desafíos adicionales, sugiriendo que la combinación de técnicas podría mejorar la efectividad. La variabilidad en los equipos y metodologías subraya la necesidad de estandarización y calibración para asegurar resultados consistentes. Los estudios revisados, incluidos los de Malegori et al. (2017), Jahani et al. (2022), y González-González et al. (2021), demuestran que la integración de tecnologías avanzadas y modelos de análisis robustos es crucial para optimizar el uso de NIRS en la evaluación de cítricos.

Al comparar los resultados de los estudios revisados, se observa que NIRS es efectiva para la evaluación de la calidad y la identificación de componentes en cítricos. Sin embargo, la precisión y efectividad pueden variar según el tipo de cítrico y el método de espectroscopía utilizado. Chen et al. (2021) y Xu et al. (2020) demostraron que, aunque NIRS puede ser eficaz, la combinación de técnicas de procesamiento de datos y modelos avanzados es esencial para obtener resultados precisos.

La validación de los modelos en los estudios revisados muestra una buena correlación entre los resultados predichos y los valores medidos, pero también indica la necesidad de seguir refinando los métodos de pretratamiento y modelado. Zhang (2019) y Xu et al. (2020) destacaron la importancia de seleccionar el pretratamiento adecuado y la banda de modelado correcta para mejorar la precisión de las predicciones.

Comparar y validar los resultados obtenidos mediante NIRS con métodos tradicionales y otros enfoques espectroscópicos es fundamental para asegurar la confiabilidad y aplicabilidad de esta tecnología. Los alcances de los sistemas de modelado multivariable de Nturambirwe et al. (2019), Jahani et al. (2020), Sun Xiaopeng et al. (2020), Santos et al. (2021), Kim et al. (2024), y previamente referenciados, son ejemplo de que las validaciones asociadas con la eficacia de NIRS para la detección de adulteraciones con un alto grado de precisión, se hacen necesarias, pero que permiten una vez se hacen generan resultados robustos para el control de calidad por la NIRS.

#### 4 Conclusiones

Los estudios revisados evidencian que NIRS, puede discriminar diferentes parámetros asociados con la composición de cítricos. Las ventajas inherentes a la técnica tales como su rapidez, portabilidad y manejo no destructivos de la muestra la hacen una herramienta atractiva para análisis en laboratorio y en los cultivos. Sin embargo, la validación en los diferentes contextos se hace necesarios con el fin de vislumbrar estadísticamente su versatilidad y adaptabilidad a las muestras objeto de análisis. La mejora continua en técnicas de procesamiento y el desarrollo de modelos de aprendizaje automático más avanzados pueden contribuir a una mayor precisión y robustez en la aplicación de NIRS para cítricos. La combinación de NIRS con imágenes hiperespectrales y técnicas de modelado multivariable avanzadas como el RBF-PLS son una alternativa para mejorar las predicciones de parámetros como la acidez, sólidos totales, granulometría, infestaciones, entre otros. Así mismo, las respuestas de NIRS se pueden mejorar con la optimización de técnicas de pretratamiento y la selección adecuada de bandas de modelado.

Las investigaciones futuras deberían enfocarse en estandarizar metodologías y desarrollar tecnologías más avanzadas para maximizar el potencial de NIRS. La comparación y validación de los resultados obtenidos con NIRS frente a otros métodos aseguran su evolución continua como una herramienta crucial en el control de calidad y la seguridad alimentaria en la industria cítrica. En asocio con lo anterior, se hace necesario, crear bancos robustos de validaciones que puedan ser utilizados en línea y que permitan mediante pruebas de control fáciles de realizar, lograr cuantificaciones o cualificaciones con mayor precisión. En general, NIRS ofrece aplicaciones valiosas y su integración con tecnologías emergentes refuerza su rol en el manejo eficiente y preciso de productos cítricos.

#### 5 Referencias

- Aykas, D. P., & Rodriguez-Saona, L. (2024). What's in Your Fruit Juice?—Rapid Quality Screening Based on Infrared (FT-IR) Spectroscopy. *Applied Sciences*, 14(4), 1654. <https://doi.org/10.3390/app14041654>
- Badaró, A. T., Garcia-Martin, J. F., López-Barrera, M. del C., Barbin, D. F., & Alvarez-Mateos, P. (2020). Determination of pectin content in orange peels by near infrared hyperspectral imaging. *Food Chemistry*, 323(126861), 126861. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126861>
- Beghi, R., Buratti, S., Giovenzana, V., Benedetti, S., & Guidetti, R. (2017). Electronic nose and visible-near infrared spectroscopy in fruit and vegetable monitoring. *Reviews in analytical chemistry*, 36(4). <https://doi.org/10.1515/revac-2016-0016>
- Bizzani, M., Flores, D. W. M., Colnago, L. A., & Ferreira, M. D. (2017). Non-invasive spectroscopic methods to estimate orange firmness, peel thickness, and total

- pectin content. *Microchemical Journal, Devoted to the Application of Microtechniques in All Branches of Science*, 133, 168–174. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2017.03.039>
- Castillo-Villamizar, G. A., Tapia-Perdomo, V., Maldonado-Pava, J., Santamaría-Gálvis, P., Sayavedra, L., Hernandez-Torres, J., & Puentes-Cala, E. (2024). Unveiling soil bacterial ecosystems in andean citrus orchards of Santander, Colombia. *Frontiers in ecology and evolution*, 12. <https://doi.org/10.3389/fevo.2024.1372284>
- Cattaneo, T. M. P., & Stellari, A. (2019). Review: NIR spectroscopy as a suitable tool for the investigation of the horticultural field. *Agronomy (Basel, Switzerland)*, 9(9), 503. <https://doi.org/10.3390/agronomy9090503>
- Cavaco, A., Passos, D., Pires, R., Antunes, M., & Guerra, R. (2021). Nondestructive assessment of citrus fruit quality and ripening by visible–near infrared reflectance spectroscopy. En M. S. Khan & I. A. Khan (Eds.), *Citrus - Research, Development and Biotechnology*. IntechOpen.
- Chen, H., Qiao, H., Feng, Q., Xu, L., Lin, Q., & Cai, K. (2021). Rapid detection of pomelo fruit quality using near-infrared hyperspectral imaging combined with chemometric methods. *Frontiers in bioengineering and biotechnology*, 8. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.616943>
- Cozzolino, D., & Dayananda, B. (2024). Advances in the analysis of fruits by near-infrared spectroscopy. In *Advances in Spectroscopic Analysis of Food and Drink* (pp. 7-1). Bristol, UK: IOP Publishing.
- Dhiman, P., Kaur, A., & Kukreja, V. (2023). Citrus fruit disease detection techniques: A survey and comparative analysis of relevant approaches. *International Journal of Computing and Digital Systems*, 14(1), 10127–10148. <https://doi.org/10.12785/ijcds/140187>
- FAO. 2021. *Citrus Fruit Statistical Compendium 2020*. Rome. 40p. <https://www.fao.org/markets-and-trade/publications/detail/en/c/1438250/>
- González-González, M. G., Blasco, J., Cubero, S., & Chueca, P. (2021). Automated detection of *Tetranychus urticae* Koch in citrus leaves based on colour and VIS/NIR hyperspectral imaging. *Agronomy (Basel, Switzerland)*, 11(5), 1002. <https://doi.org/10.3390/agronomy11051002>
- Ghanei Ghooshkhaneh, N., & Mollazade, K. (2023). Optical techniques for fungal disease detection in citrus fruit: A review. *Food and Bioprocess Technology*, 16(8), 1668–1689. <https://doi.org/10.1007/s11947-023-03005-4>
- Huang, C., Cai, J., Zhou, Y., El-Seedi, H. R., & Guo, Z. (2022). Fusion models for detection of soluble solids content in mandarin by Vis/NIR transmission spectroscopy combined external factors. *Infrared Physics & Technology*, 124(104233), 104233. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2022.104233>

- Iqbal, Z., Herodian, S., & Widodo, S. (2019). Development of Partial Least Square (PLS) prediction model to measure the ripeness of oil palm Fresh Fruit Bunch (FFB) by using NIR spectroscopy. *IOP conference series. Earth and environmental science*, 347(1), 012079. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/347/1/012079>
- Jahani, R., Yazdanpanah, H., van Ruth, S. M., Kobarfard, F., Alewijn, M., Mahboubi, A., Faizi, M., Mh, S. A., & Salamzadeh, J. (2020). Novel application of near-infrared spectroscopy and chemometrics approach for detection of lime juice adulteration. *Iranian journal of pharmaceutical research: IJPR*, 19(2). <https://doi.org/10.22037/ijpr.2019.112328.13686>
- Jahani, Reza, van Ruth, S., Weesepeel, Y., Alewijn, M., Kobarfard, F., Faizi, M., Shojaee AliAbadi, M. H., Mahboubi, A., Nasiri, A., & Yazdanpanah, H. (2022). Comparison of portable and benchtop near-infrared spectrometers for the detection of citric acid-adulterated lime juice: A chemometrics approach. *Iranian journal of pharmaceutical research: IJPR*, 21(1). <https://doi.org/10.5812/ijpr-128372>
- Jiang, X., Zhu, M., Yao, J., Zhang, Y., & Liu, Y. (2022). Calibration of near infrared spectroscopy of apples with different fruit sizes to improve soluble solids content model performance. *Foods (Basel, Switzerland)*, 11(13), 1923. <https://doi.org/10.3390/foods11131923>
- Jie, D., Wu, S., Wang, P., Li, Y., Ye, D., & Wei, X. (2021). Research on citrus grandis granulation determination based on hyperspectral imaging through deep learning. *Food Analytical Methods*, 14(2), 280–289. <https://doi.org/10.1007/s12161-020-01873-6>
- Kim, M.-J., Yu, W.-H., Song, D.-J., Chun, S.-W., Kim, M. S., Lee, A., Kim, G., Shin, B.-S., & Mo, C. (2024). Prediction of soluble-solid content in citrus fruit using visible–near-infrared hyperspectral imaging based on effective-wavelength selection algorithm. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 24(5), 1512. <https://doi.org/10.3390/s24051512>
- Li, M., Liu, Y., Hu, J., Su, C., Xu, Z., & Cui, H. (2023). Detection of the Early Fungal Infection of Citrus by Fourier Transform Near-Infrared Spectra. *Spectroscopy*, 38(S8), 12–28. <https://doi.org/10.56530/spectroscopy.dx3267q6>
- Li, Pao, Li, S., Du, G., Jiang, L., Liu, X., Ding, S., & Shan, Y. (2020). A simple and nondestructive approach for the analysis of soluble solid content in citrus by using portable visible to near-infrared spectroscopy. *Food Science & Nutrition*, 8(5), 2543–2552. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1550>
- Li, P, Lee, S.-H., Hsu, H.-Y., & Park, J.-S. (2017). Nonlinear fusion of multispectral citrus fruit image data with information contents. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 17(1), 142. <https://doi.org/10.3390/s17010142>

- Li, D., Long, J., Tang, Z., Han, L., Gong, Z., Wen, L., ... & Wen, T. (2023). Detection and classification of citrus fruit infestation by *Bactrocera dorsalis* (Hendel) using a multi-path Vis/NIR spectroscopy system. *Agriculture*, 13(8), 1642.
- Ling, C., Dong, J. Y., Rong, Z. J., Lei, W., Rui, Y., Yun, S., & Zhi, L. X. (2024). Research on Citrus Fruit Freshness Detection Based on Near-Infrared Spectroscopy. preprints. MDPI. 2024061149. <https://doi.org/10.20944/preprints202406.1149.v1>
- Malegori, C., Nascimento Marques, E. J., de Freitas, S. T., Pimentel, M. F., Pasquini, C., & Casiraghi, E. (2017). Comparing the analytical performances of Micro-NIR and FT-NIR spectrometers in the evaluation of acerola fruit quality, using PLS and SVM regression algorithms. *Talanta*, 165, 112–116. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2016.12.035>
- Martins, J. A., Guerra, R., Pires, R., Antunes, M. D., Panagopoulos, T., Brázio, A., Afonso, A. M., Silva, L., Lucas, M. R., & Cavaco, A. M. (2022). SpectraNet–53: A deep residual learning architecture for predicting soluble solids content with VIS–NIR spectroscopy. *Computers and Electronics in Agriculture*, 197, 106945. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.106945>
- Nturambirwe, J. F. I., Nieuwoudt, H. H., Perold, W. J., & Opara, U. L. (2019). Non-destructive measurement of internal quality of apple fruit by a contactless NIR spectrometer with genetic algorithm model optimization. *Scientific African*, 3(e00051), e00051. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2019.e00051>
- Pandiselvam, R., Prithviraj, V., Manikantan, M. R., Kothakota, A., Rusu, A. V., Trif, M., & Mousavi Khaneghah, A. (2022). Recent advancements in NIR spectroscopy for assessing the quality and safety of horticultural products: A comprehensive review. *Frontiers in nutrition*, 9. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.973457>
- Patel, K. K., & Pathare, P. B. (2024). Principle and applications of near-infrared imaging for fruit quality assessment—An overview. *International Journal of Food Science & Technology*, 59(5), 3436–3450.
- Pérez-Marín, D., Calero, L., Fearn, T., Torres, I., Garrido-Varo, A., & Sánchez, M.-T. (2019). A system using in situ NIRS sensors for the detection of product failing to meet quality standards and the prediction of optimal postharvest shelf-life in the case of oranges kept in cold storage. *Postharvest Biology and Technology*, 147, 48–53. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2018.09.009>
- Rosli, A. D., Adenan, N. S., Hashim, H., Abdullah, N. E., Sulaiman, S., & Baharudin, R. (2018). Application of particle swarm optimization algorithm for optimizing ANN model in recognizing ripeness of citrus. *IOP conference series. Materials science and engineering*, 340, 012015. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/340/1/012015>
- Santos, C. S. P., Cruz, R., Gonçalves, D. B., Queirós, R., Bloore, M., Kovács, Z., Hoffmann, I., & Casal, S. (2021). Non-destructive measurement of the internal

- quality of citrus fruits using a portable NIR device. *Journal of AOAC International*, 104(1), 61–67. <https://doi.org/10.1093/jaoacint/qsaa115>
- Srivastava, S., & Sadistap, S. (2022). Data fusion for fruit quality authentication: combining non-destructive sensing techniques to predict quality parameters of citrus cultivars. *Journal of Food Measurement & Characterization*, 16(1), 344–365. <https://doi.org/10.1007/s11694-021-01165-5>
- Song, S. Y., Kim, C. H., Im, S. J., & Kim, I.-J. (2017). Discrimination of citrus fruits using FT-IR fingerprinting by quantitative prediction of bioactive compounds. *Food Science and Biotechnology*, 27(2), 367. <https://doi.org/10.1007/s10068-017-0263-3>
- Squeo, G., Cruz, J., De Angelis, D., Caponio, F., & Amigo, J. M. (2024). Considerations about the gap between research in Near Infrared spectroscopy and official methods and recommendations of analysis in foods. *Current Opinion in Food Science*, 101203.
- Sun, Xiaopeng, Xu, S., & Lu, H. (2020). Non-destructive identification and estimation of granulation in honey pomelo using visible and near-infrared transmittance spectroscopy combined with machine vision technology. *Applied Sciences (Basel, Switzerland)*, 10(16), 5399. <https://doi.org/10.3390/app10165399>
- Sun, Xudong, Deng, D., Liu, J., & Feng, S. (2022). Model development and update of portable NIRS instrument for assessment of internal quality attributes of two navel orange varieties. *Frontiers in nutrition*, 9. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.976178>
- Torres, I., Pérez-Marín, D., De la Haba, M.-J., & Sánchez, M.-T. (2017). Developing universal models for the prediction of physical quality in citrus fruits analysed on-tree using portable NIRS sensors. *Biosystems Engineering*, 153, 140–148. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.11.007>
- Walsh, K. B., Blasco, J., Zude-Sasse, M., & Sun, X. (2020). Visible-NIR ‘point’ spectroscopy in postharvest fruit and vegetable assessment: The science behind three decades of commercial use. *Postharvest Biology and Technology*, 168(111246), 111246. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2020.111246>
- Wang, C., Lee, W. S., Zou, X., Choi, D., Gan, H., & Diamond, J. (2018). Detection and counting of immature green citrus fruit based on the Local Binary Patterns (LBP) feature using illumination-normalized images. *Precision Agriculture*, 19(6), 1062–1083. <https://doi.org/10.1007/s11119-018-9574-5>
- Wang, M., Xu, Y., Yang, Y., Mu, B., Nikitina, M. A., & Xiao, X. (2022). Vis/NIR optical biosensors applications for fruit monitoring. *Biosensors & Bioelectronics*: X, 11(100197), 100197. <https://doi.org/10.1016/j.biosx.2022.100197>
- Włodarska, K., Piasecki, P., Lobo-Prieto, A., Pawlak-Lemańska, K., Górecki, T., & Sikorska, E. (2021). Rapid screening of apple juice quality using ultraviolet, visible,

- and near infrared spectroscopy and chemometrics: A comparative study. *Microchemical Journal, Devoted to the Application of Microtechniques in All Branches of Science*, 164(106051), 106051. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2021.106051>
- Xiao, H., Liu, Y., Liu, Y., Xiao, H., Sun, L., & Hao, Y. (2023). Diagnosis of citrus greening based on the fusion of visible and near-infrared spectra. *Applied Sciences (Basel, Switzerland)*, 13(18), 10082. <https://doi.org/10.3390/app131810082>
- Xu, F., Hao, Z., Huang, L., Liu, M., Chen, T., Chen, J., Zhang, L., Zhou, H., & Yao, M. (2020). Comparative identification of citrus huanglongbing by analyzing leaves using laser-induced breakdown spectroscopy and near-infrared spectroscopy. *Applied Physics. B, Lasers and Optics*, 126(3). <https://doi.org/10.1007/s00340-020-7392-8>
- Xu, S., Lu, H., Ference, C., Qiu, G., & Liang, X. (2020). Rapid nondestructive detection of water content and granulation in postharvest “Shatian” pomelo using visible/near-infrared spectroscopy. *Biosensors*, 10(4), 41. <https://doi.org/10.3390/bios10040041>
- Xu, S., Lu, H., Wang, X., Ference, C. M., Liang, X., & Qiu, G. (2021). Nondestructive detection of internal flavor in ‘Shatian’ pomelo fruit based on visible/near infrared spectroscopy. *HortScience: A Publication of the American Society for Horticultural Science*, 56(11), 1325–1330. <https://doi.org/10.21273/hortsci16136-21>
- Yoplac, I., Avila-George, H., Vargas, L., Robert, P., & Castro, W. (2019). Determination of the superficial citral content on microparticles: An application of NIR spectroscopy coupled with chemometric tools. *Heliyon*, 5(7), e02122. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02122>
- Zeb, A., Qureshi, W. S., Ghafoor, A., Malik, A., Imran, M., Mirza, A., Tiwana, M., & Alanazi, E. (2022). Towards Sensory Assessment Classification using Short-Wave NIR Spectroscopy for Orange Cultivars. *Europe PMC*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-27297-2>
- Zeb, Ayesha, Qureshi, W. S., Ghafoor, A., Malik, A., Imran, M., Mirza, A., Tiwana, M. I., & Alanazi, E. (2023). Towards sweetness classification of orange cultivars using short-wave NIR spectroscopy. *Scientific Reports*, 13(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-27297-2>
- Zhang, K. (2019). Shatang Mandarin Sugar Degree Detection Based on Near Infrared Spectrum. *Clausius Scientific Press Inc.*, 51–55. <https://doi.org/10.23977/icmmct.2019.62011>
- Zhang, W., Lin, M., He, H., Wang, Y., Wang, J., & Liu, H. (2023). Toward achieving rapid estimation of vitamin C in citrus peels by NIR spectra coupled with a linear algorithm. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 28(4), 1681. <https://doi.org/10.3390/mo>