

| |
|---|
| Título del artículo de revisión |
| Aplicación de la espectroscopia de infrarrojo cercano (NIRS) en productos cárnicos |

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

| | |
|-----------------------|-----------------------------|
| Estudiante (s) | |
| Nombre: | José Miguel Rosero Martínez |
| Identificación | 1144104795 |
| Correo: | jose.rosero03@usc.edu.co |
| Teléfono: | 3166175340 |
| | |
| Nombre: | |
| Identificación | |
| Correo: | |
| Teléfono: | |

| | |
|-------------------|--------------------------------|
| Director | |
| Nombre: | Sandra Patricia Castro Narváez |
| Identificación | 66828612 |
| Correo: | Sandraca0@usc.edu.costro0 |
| Teléfono: | 3013268627 |
| | |
| Codirector | |
| Nombre: | |
| Identificación | |
| Correo: | |
| Teléfono: | |

Aplicación de la espectroscopia de infrarrojo cercano (NIRS) en productos cárnicos

José Miguel Rosero Martínez

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

Aplicación de la espectroscopia de infrarrojo cercano (NIRS) en productos cárnicos

José Miguel Rosero Martínez, Sandra Patricia Castro Narváez*

Grupo Investigación en Electroquímica y Medio Ambiente

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

*jose.rosero03@usc.edu.co

Resumen

Se realiza un acercamiento a la espectroscopia de infrarrojo cercano (NIRS) como herramienta para evaluar la calidad y autenticidad de los productos cárnicos. Dada la creciente demanda de productos cárnicos orgánicos y la necesidad de garantizar su integridad, NIRS se destaca como una alternativa eficaz a los métodos tradicionales. La metodología empleada incluyó revisión de literatura, análisis de datos y comparación de métodos, destacando la importancia de desarrollar técnicas de calibración y estandarización más sólidas. Se identificó los parámetros de calidad que NIRS puede evaluar, como la humedad, la grasa, las proteínas, el color y el pH, lo que demuestra su capacidad para proporcionar resultados rápidos y no destructivos. La comparación entre NIRS y técnicas tradicionales como el análisis proximal, reveló que NIRS ofrece ventajas significativas en términos de velocidad y menor necesidad de preparación de muestras. Sin embargo, se han identificado limitaciones, incluida la necesidad de calibraciones específicas para cada tipo de carne y la dependencia de la calidad del equipo utilizado. Las recomendaciones incluyen avanzar en el desarrollo de técnicas de calibración y explorar la integración de la tecnología NIRS en entornos informáticos en tiempo real.

Palabras Clave: Calidad alimentaria, Métodos de análisis, Métodos de calibración multivariable, Autenticación.

Abstract

An approximation is made to near infrared spectroscopy (NIRS) as a tool for evaluating the quality and authenticity of meat products. Given the growing demand for organic meat products and the need to guarantee their integrity, NIRS stands out as an effective alternative to traditional methods. The methodology employed included literature review, data analysis and method comparison, highlighting the importance of developing more robust calibration and standardization techniques. Quality parameters that NIRS can assess, such as moisture, fat, protein, color and pH, were identified, demonstrating its ability to provide rapid and non-destructive results. Comparison between NIRS and traditional techniques such as proximate analysis revealed that NIRS offers significant advantages in terms of speed and reduced need for sample preparation. However, limitations have been identified, including the need for specific calibrations for each type of meat and the dependence on the quality of the equipment used. Recommendations include advancing the development of calibration techniques and exploring the integration of NIRS technology in real-time computing environments.

Key words: Food quality, Methods of analysis, Multivariate calibration methods, Authentication

1. Introducción

La industria cárnica a lo largo de los años ha enfrentado desafíos en la evaluación de la calidad y seguridad de sus productos. Los métodos de análisis tradicionales, como la evaluación sensorial y las diferentes técnicas de calidad, suelen ser costosos, lentos y destructivos, por lo que se ve una limitación en tiempo real y en grandes volúmenes de producción. Teniendo en cuenta este contexto, la técnica de espectroscopía de infrarrojo (NIRS) se presenta como una prometedora técnica para una evaluación rápida, no destructiva y de alta precisión para analizar las propiedades de los productos cárnicos. (Kademi et al., 2019). La NIRS emergió como una herramienta analítica con un gran potencial en la industria alimentaria, especialmente en el sector cárnico. Su capacidad para proporcionar información rápida y no destructiva sobre la composición química de diversos materiales la convierte en una técnica atractiva para el control de calidad y la seguridad alimentaria. Según Pérez et al. (2018), la NIRS se consolida como una alternativa rápida y rentable a los métodos de análisis tradicionales, permitiendo la determinación simultánea de múltiples componentes en productos cárnicos, como la humedad, la grasa y la proteína. Esta característica resulta particularmente útil para optimizar los procesos de producción y evaluar la calidad nutricional de los alimentos.

A pesar de las ventajas potenciales de la técnica de NIRS, su implementación en la industria cárnica se enfrenta a varios desafíos. Como la calibración de los equipos y la interpretación de los datos espectrales, además de la amplia variabilidad de los productos cárnicos, debido a factores como la raza, la alimentación del animal, la edad, y el manejo post-mortem, todos estos factores pueden afectar la precisión y reproducibilidad de las mediciones espectroscópicas. (Hashem et al., 2022). Además, la interpretación de los datos espectrales requiere modelos de calibración robustos y específicos para cada tipo de producto y parámetro de calidad, lo que implica una inversión inicial significativa en términos de tiempo y recursos. (Hashem et al., 2022). Pero, a pesar de estas circunstancias, si se aplica de manera correcta la técnica, con los operarios calificados y con una buena base de datos de espectros y calibraciones, al ser un procedimiento versátil, rápido y no destructivo, tiene muchas ventajas implementarlo en la industria, ya que no solo se reflejaría en un baja de costos sino también en mayor eficiencia. (Dixit et al., 2017)

Otra aplicación relevante de la NIRS en el sector cárnico es la detección de adulteraciones y fraudes alimentarios. Como señalan Serrano et al. (2016), el NIRS puede utilizarse para identificar la presencia de especies animales no declaradas en productos cárnicos procesados, así como para verificar el origen geográfico de la materia prima. Esta capacidad es esencial para garantizar la trazabilidad y autenticidad de los alimentos, contribuyendo a la confianza del consumidor y a la integridad del mercado alimentario.

Por otra parte, Huang et al. (2010) exploraron el uso de NIRS para monitorear los cambios en la calidad de la carne durante el almacenamiento. Su investigación demostró que NIRS puede detectar la oxidación de lípidos y la formación de compuestos volátiles, lo que permite estimar la vida útil de los productos cárnicos. Este avance proporciona una herramienta adicional para controlar la frescura y la seguridad de los productos durante su almacenamiento.

En conclusión, la espectroscopía de infrarrojo cercano (NIRS) se ha posicionado como una herramienta analítica indispensable en la industria cárnica, ofreciendo un amplio rango de aplicaciones que van desde la evaluación de la composición química hasta la detección de fraudes alimentarios. Su capacidad para proporcionar resultados rápidos, precisos y no destructivos la convierte en una tecnología clave para asegurar la calidad, seguridad y trazabilidad de los productos cárnicos. Además, su potencial de integración en sistemas de control de calidad en línea y en tiempo real la posiciona como una tecnología con un futuro prometedor en el contexto de la Industria 4.0. A medida que avance la investigación en este campo, se espera que la NIRS continúe desempeñando un papel crucial en la optimización de los procesos de producción y en la satisfacción de la demanda de los consumidores de

alimentos seguros y de alta calidad.

La revisión tiene como objetivo analizar la revisión bibliográfica sobre la aplicación de la espectroscopia de infrarrojo cercano (NIRS) en la evaluación de productos cárnicos. Identifica los parámetros de calidad de los productos cárnicos que se pueden evaluar mediante NIRS. Evalúa la eficiencia y precisión de la NIRS frente a métodos tradicionales de análisis de calidad en la industria cárnica e identifica las ventajas, limitaciones y áreas de mejora del uso de NIRS en la industria cárnica.

1. Metodología

2.1. Selección de la Literatura

Se realizó una búsqueda exhaustiva en bases de datos académicas como ScienceDirect y Google Scholar para identificar artículos científicos, revisiones y estudios de casos relevantes sobre la aplicación de la espectroscopia de infrarrojo cercano (NIRS) en el análisis de productos cárnicos. Se utilizaron términos de búsqueda específicos y combinaciones de palabras clave relacionadas con NIRS y productos cárnicos, como "NIR y carne", "pollo", "calidad", "calibración", "autenticación" y "tipo de carne". Esta búsqueda se centró en identificar investigaciones que abordaran las aplicaciones prácticas y teóricas de NIRS en la industria cárnica, prestando especial atención a los estudios que proporcionaran información detallada sobre técnicas de calibración, autenticación y evaluación de la calidad. Se incluyó un filtro de fecha para garantizar la relevancia y actualidad de la información, que abarca las publicaciones entre 2017 y 2024. Además, se consideraron revisiones y meta análisis exhaustivos para proporcionar una visión integral del estado actual de la tecnología NIRS en el campo de la carne.

2.2. Criterios de Inclusión y Exclusión

Se incluyeron estudios que abordaran específicamente la aplicación de NIRS en el análisis de productos cárnicos, como carne de res, pollo y otros tipos de carne. Los artículos debían proporcionar información detallada sobre la técnica NIRS, incluidos los métodos de calibración, autenticación y evaluación de la calidad. Se consideraron artículos de investigación originales, revisiones sistemáticas y estudios de caso que proporcionaran datos empíricos o una evaluación crítica de la técnica NIRS. Se excluyeron los artículos que no proporcionaran un análisis detallado de la aplicación práctica o teórica de NIRS en el análisis de productos cárnicos. Los artículos seleccionados utilizaron métodos de calibración y validación robustos y bien descritos y presentaron resultados cuantitativos claros sobre la efectividad de NIRS. Se excluyeron los estudios con metodologías deficientes, datos incompletos o falta de análisis crítico de los resultados. Se dio prioridad a los estudios que comparaban NIRS con métodos tradicionales de evaluación de la calidad de la carne. También, a los estudios que exploraban diversas aplicaciones de NIRS en el análisis de productos cárnicos, como la detección de adulteraciones, la calibración de la calidad y la autenticación del grado de la carne. Se excluyeron los estudios que no proporcionaban una perspectiva clara sobre el impacto de NIRS en la industria de la carne o que se centraban exclusivamente en aplicaciones fuera del sector cárnico.

2.3. Análisis de los Datos

En el análisis de datos se extrajo información clave de los estudios seleccionados para realizar una evaluación integral de la técnica NIRS en productos cárnicos. Los parámetros de calidad tales como humedad, contenido de grasa, proteína, color, pH y otros atributos relevantes se identificaron y clasificaron. Se documentaron los métodos de calibración y validación utilizados en cada estudio, incluyendo técnicas como regresión de mínimos cuadrados parciales (PLSR), redes neuronales

artificiales y otros enfoques estadísticos. Se evaluó la robustez y efectividad de estos métodos en la calibración NIRS. Se analizaron los resultados cuantitativos proporcionados en los estudios, incluyendo valores R^2 , errores de predicción y precisión de la técnica NIRS. Esta información se organizó en una base de datos de Excel para facilitar la comparación y el análisis. Así mismo se documentó el tipo de espectroscopia NIR utilizada (por ejemplo, Transformada de Fourier NIR, Reflectancia NIRS), el equipo utilizado y las condiciones experimentales específicas.

2.4. Comparación de Métodos

En la comparación de métodos se evaluaron las técnicas NIRS en relación con los métodos tradicionales de evaluación de la calidad de la carne. se comparó la exactitud y eficiencia de NIRS con métodos tradicionales como el análisis proximal, la cromatografía líquida de alta resolución (HPLC) y la espectrometría de masas (MS). Se evaluaron factores como el tiempo de análisis, la necesidad de preparación de la muestra y la capacidad de detectar adulteraciones. Finalmente, se identificaron y discutieron las principales ventajas de NIRS, como su capacidad para realizar análisis rápidos, no destructivos y sin contacto. También se destacaron las limitaciones, como la necesidad de calibraciones específicas para cada tipo de carne y la dependencia de la calidad de los equipos y métodos de calibración.

2. Discusión de resultados

3.1. NIRS

La industria cárnica ha enfrentado desafíos continuos en la evaluación de la calidad y seguridad de sus productos a lo largo de los años. Los métodos de análisis tradicionales, como la evaluación sensorial y las diversas técnicas de calidad, suelen ser costosos, lentos y destructivos. Estos métodos presentan limitaciones en la monitorización en tiempo real y en la gestión de grandes volúmenes de producción (Furtado et al, 2019). En este contexto, la espectroscopia de infrarrojo cercano (NIRS) emerge como una técnica prometedora para una evaluación rápida, no destructiva y de alta precisión de las propiedades de los productos cárnicos (Kademi et al., 2019).

La NIRS se ha utilizado en la industria alimenticia durante años debido a sus ventajas como herramienta rápida, limpia y precisa (Squeo et al, 2024). En la industria agroalimentaria, NIRS se ha ido consolidando en la medición de la composición química de materias primas (Jia et al, 2024), en productos de alta demanda como la leche y sus derivados (Castro-Reigía et al, 2024). También, encuentra aplicación en las industrias de granos (Shi et al, 2024) y piensos (Liang et al 2024) que hacen parte de la cadena productiva de los productos cárnicos. Los primeros análisis de carne por NIRS se direccionaron hacia la capacidad para predecir características de calidad como la textura y la terneza, con resultados inconsistentes (Prieto et al 2009). Sin embargo, en la última década se han realizado avances sustanciales para determinar las características químicas y físicas de la carne, como la humedad (Matsumoto et al 2024), las proteínas (Cruz-Tirado et al 2024), contenido de grasa (Veloso-Trópia et al 2024), entre otros. NIRS permite medir rápidamente y de forma no destructiva importantes atributos de calidad de los productos cárnicos, lo que facilita el control de calidad y la clasificación en la industria alimentaria. (Wang et al., 2017).

La NIRS en la detección de cárnicos trabaja con absorción de electromagnética, que incluye las longitudes de onda de 750 a 2500 nm, se mide mediante espectroscopia del infrarrojo cercano. Las bandas anchas en los espectros NIR son el resultado de absorciones en longitudes de onda superpuestas (Barbon et al., 2018). Las absorciones medidas por espectroscopia NIR suelen ser sobretonos y combinaciones de modos vibracionales que involucran los enlaces químicos C-H, O-H y N-H. (Li et al, 2024). Los avances de la tecnología de espectroscopia NIR ha incluido el cable de fibra

óptica en instrumentos portátiles, con aplicaciones diversas para evaluar la calidad de la carne, la grasa y los productos procesados cárnicos. Con esta técnica se han analizado la autenticación de carne vacuna (Veloso et al, 2024), pollo (Niu et al, 2024), alpaca (Cruz et al. 2024), caprino (cozzolino et al, 2024), cordero (Stewart et al, 2024), pescado (Zhong et al, 2024), cangrejo (Wold et al, 2024), entre otros.

La creciente demanda de alimentos saludables y seguros plantea un desafío significativo en la detección de adulteraciones en productos cárnicos. La adulteración, que puede involucrar el reemplazo no declarado de componentes alimentarios, a menudo escapa a las técnicas analíticas convencionales debido a su enfoque específico. La autenticidad de los productos cárnicos también puede verse comprometida por fraudes relacionados con especies no declaradas. Las técnicas espectroscópicas, particularmente NIRS, ofrecen una solución prometedora al proporcionar información cualitativa y cuantitativa sobre la composición de los alimentos de manera rápida y no destructiva, abordando así estos retos analíticos (Parastar et al., 2020).

Los instrumentos NIRS también han mejorado sus cualidades tanto en la resolución de los espectros como en la portabilidad de estos. Las ventajas clave de los sistemas NIRS portátiles y en miniatura son su movilidad para inspección en línea, control en tiempo real y la posibilidad de establecer protocolos rápidos para un control de calidad riguroso a lo largo de la cadena logística de alimentos. Sin embargo, sus alcances son aún objeto de validación para diferentes parámetros (Kadami et al, 2018). Las tecnologías de diagnóstico alimentario basadas en smartphones tienen el potencial de revolucionar el sector alimentario al permitir un análisis rápido, in situ y económico de alimentos y productos alimenticios (Kartakoullis et al., 2019).

La hiperespectral se ha acoplado a los espectrómetros NIRS, las ventajas de esta técnica que combina resultados espectroscópicos e imagen proporcionan una visión completa de los productos cárnicos y de los microorganismos (Matenda et al 2024). Esta tecnología permite analizar cada píxel de una imagen para obtener un espectro completo de información, integrando datos de múltiples longitudes de onda. La hiperespectral facilita la evaluación detallada de las características físicas y químicas de productos complejos, permitiendo una clasificación precisa y eficiente. A diferencia de la espectroscopía convencional, la hiperespectral ofrece una evaluación más completa y detallada, porque está constituida por varias bandas, cada una con información sobre un rango particular de longitudes de onda, las cuales al unir las en información decodificada permite valorar parámetros que en la industria alimenticia se escala al aseguramiento de la calidad y autenticidad de los productos en el mercado (Tejasree et al 2024).

A pesar de las ventajas de NIRS, su implementación en la industria cárnica enfrenta varios desafíos. La calibración de los equipos y la interpretación de los datos espectrales son complicadas, especialmente debido a la amplia variabilidad de los productos cárnicos que puede ser influenciada por factores como la raza, la alimentación del animal, la edad y el manejo post-mortem (Roberts et al., 2017). Estos factores pueden afectar la precisión y reproducibilidad de las mediciones espectroscópicas. Además, la interpretación de los datos requiere modelos de calibración robustos y específicos para cada tipo de producto y parámetro de calidad, lo que implica una inversión significativa en tiempo y recursos (Hashem et al., 2022). Sin embargo, si se aplica correctamente, con operarios capacitados y una base de datos sólida de espectros y calibraciones, NIRS puede ofrecer muchas ventajas, como una reducción de costos y una mayor eficiencia en la industria (Dixit et al., 2017).

En los siguientes apartados se puede observar las singularidades de la espectroscopía de infrarrojo cercano (NIRS) al ofrecer una alternativa rápida, confiable y económica para analizar la composición química y física de la carne, mostrando un gran potencial para mejorar la evaluación de parámetros de calidad en diferentes productos cárnicos.

3.1. Carnes frescas

La carne de vacuno es ampliamente consumida y valorada por su atractivo sensorial y sus beneficios nutricionales. Las tasas de crecimiento del consumo de carne varían entre regiones debido a diferencias en la población y los ingresos en cada región. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación (FAO) las estimaciones establecen que entre 2023-2032 seguirán incrementándose (OECD/FAO, 2023). Los consumidores esperan una calidad constante y una experiencia uniforme, lo que requiere un seguimiento riguroso de sus propiedades a lo largo de la cadena de producción. Dado que los factores intrínsecos y extrínsecos afectan estas propiedades, obtener datos analíticos sobre la calidad de la carne puede resultar costoso y laborioso. La espectroscopia de infrarrojo cercano (NIRS) ofrece una solución eficaz y rentable, permitiendo un análisis rápido, no destructivo y respetuoso con el medio ambiente de múltiples características de la carne, facilitando el control de calidad y la optimización en la industria (Patel et al., 2021). En la Tabla 1 se exhibe algunas referencias asociadas con el estudio de propiedades de calidad de diferentes tipos de carnes frescas.

La NIRS es la técnica más utilizada para determinar la calidad de las carnes crudas de bovinos (Patel et al, 2021), (Savoia et al, 2021), porcinos (Kucha et al, 2020), (Fernández (2021), (Rodríguez et al, 2023) ovinos (Stewart et al, 2024), caprinos (Cozzolino, D. et al, 2023), pollo (Parastar et al, 2020), (Wold et al 2020), (Hashem et al, 2022), (Niu et al, 2024), cangrejo (Wold et al, 2024) y canes exóticas como alpaca (Tirado et al, 2023) y de caza (Dumalisile et al, 2020), (Edwards et al, 2020), las cuales que incluyen espectrómetros portátiles (Veloso et al, 2023) y de mesa. Sin embargo, se ha ido integrando otras técnicas como la Espectroscopía visible a infrarrojo cercano (Vis-NIR) (Peyvasteh et al, 2020) e hiperespectral. Por lo general, esta última presenta valores agregados en comparación con la NIRS, al permitir hacer estudios multivariantes y multiparámetros.

Los reportes asociados con las técnicas asociadas con NIRS han incorporado métodos matemáticos y estadísticos para hacer las calibraciones y validaciones con respecto a técnicas primarias de análisis. Entre ellos se resaltan los modelos análisis de componentes principales (PCA). Análisis discriminante de mínimos cuadrados parciales (PLS-DA). Análisis discriminante lineal (LDA), Modelado independiente suave por analogía de clase (SIMCA). K -vecino más cercano (KNN). Análisis Mahalanobis (MDA), Análisis cuadrático (QDA). Error cuadrático medio de calibración (RMSEC), Error cuadrático medio de validación cruzada (RMSECV), Coeficiente de calibración (R^2C). Coeficiente de validación cruzada (R^2CV). Validación cruzada de dejar uno fuera (LOOCV). Variación normal estándar (SNV), Corrección de dispersión multiplicativa (MSC), Error cuadrático medio (RMSE), Desviación de predicción residual (RPD). Razón de error de rango (RER).

La carne, especialmente la roja, desempeña un papel crucial en la dieta humana debido a su alto contenido de proteínas digeribles, ácidos grasos esenciales y otros micronutrientes beneficiosos para la salud. Con un volumen de producción global significativo y una creciente demanda de carne segura y de alta calidad con propiedades nutricionales mejoradas, la industria cárnica se enfrenta a la necesidad de métodos eficientes para evaluar estos aspectos. La espectroscopia de infrarrojo cercano (NIRS) ofrece una solución valiosa al permitir una evaluación rápida y precisa de los atributos de calidad y seguridad en los productos cárnicos, contribuyendo a satisfacer las demandas del mercado y mejorar la salud pública (Wang et al., 2018). Estos estudios se encaminaron hacia la correlación de parámetros fisicoquímicos de calidad previamente aceptados como son materia seca, proteínas, lípidos, pH, pérdida de cocción color, entre otros; los cuales fueron contrarrestados con las técnicas primarias.

Tabla 1. Algunos alcances analíticos de la NIRS en carnes crudas

| Técnica | Muestra | Condiciones NIR | Análisis | Alcances | Comparación | Referencia |
|---|--|--|--|--|--|----------------------|
| NIRS Hiperespectral Imaging (NIR-HSI) | Alpaca pura y adulterada con cerdo, pollo y carne de res (0 – 50% w/w) | Espectrómetro portátil NIR-S-G1 (InnoSpectra, Taiwán) 900 a 1700 nm NIR-HSI 1003B-00,572 (Headwall Photonics) 953 a 1710 nm Uso de análisis PCA, DD-SIMCA, y PLSR | Detección de adulteración (autenticidad), concentración de adulterante | La PLSR basada en NIR-HSI superó al espectrómetro NIR portátil para predecir la concentración de adulterantes en la carne de alpaca. | Comparación entre NIR portátil y NIR-HSI; NIR-HSI demostró mejor rendimiento en la predicción de la concentración de adulterante | Tirado, J. P. (2023) |
| NIRS | Bovino Músculo Longissimus thoracis de carne de res | Comparación de tres instrumentos NIR: Espectrómetro transportable (Vis-NIRS) (350 nm a 1830 nm) Espectrómetro (NIRS) (950–1650 nm). Espectrómetro industrial portátil | Materia seca, proteínas, lípidos, pH, pérdida por cocción, color | Todos NIR predijeron materia seca, proteína y lípidos con R ² entre 0,23 a 0,70; pH y pérdida de cocción R ² entre 0,19 a 0,25; y color R ² entre 0,35 a 0,77. | Comparación entre diferentes instrumentos NIR (Vis-NIRS, NIRS, Micro-NIRS) | Patel (2021) |
| NIRS | Bovino Muestras de músculo buey del ojo de bife | Portable NIR Vis-NIRS: LabSpec 2500 (ASD Inc) 350 to 1830 nm Micro-NIRS: Micro NIR Pro. 905 a 1,649 nm) | pH, color, capacidad de retención de agua, ternura | Evaluación de atributos de calidad de la carne color (R ² de 0,52 a 0,80), bajos para el pH y las pérdidas por purga (R ² alrededor de 0,30), y muy pobres para las pérdidas por cocción y la ternura (R ² por debajo de 0,20). | Métodos de laboratorio tradicionales (análisis de referencia/gold standard) | Savoia (2021) |
| Portable near-NIRS | Bovino Secciones de la 9ª a 11ª costilla de toros Nellore y vacas de descarte | NIR portátil (ITPhotonics Srl, modelo poliSPECNIR 900–1700, 884,9 y 1702,9 nm, Espectroscopio NIR portátil Calibración: PLS. Validación cruzada con exclusión de uno. La calidad de los modelos con RMSECV y CV | Extracto etéreo, proteína cruda, materia seca, minerales | Predicción de la composición química de la carne y grasa, huesos en el canal y de la carne. utilizado en dos puntos de medición: P1 (centro del músculo Longissimus) y P2 (capa de grasa subcutánea). | NP | Veloso (2023) |

| Técnica | Muestra | Condiciones NIR | Análisis | Alcances | Comparación | Referencia |
|--|---|---|---|---|--|-----------------------|
| Imágenes hiperespectrales (VNIR) modo de reflectancia difusa | Bovino, Pato Carne de res adulterada con carne de pato | Sistema HSI VNIR de barrido lineal 380 a 1012 nm Análisis de espectros extraídos con métodos de preprocesamiento. (PLSR) y (PCR). | Detección de adulteración, | Adulteración de carnes Se adulteró carne de res picada con carne de pato en un rango de 0 a 100 % (p / p) en incrementos del 10 % El modelo basado en longitudes de onda competentes seleccionadas de cargas de PC resultó en un buen desempeño de $R^2 = 0,96$, RMSEP = 6,58 % y RPD = 4,86 con un límite de detección (LOD) de 7,59 %. | Variación de porcentajes de adulteración. | Jiang (2023) |
| NIRS | Cabra Cortes de carne de cabra (rack y loin) | NIR portátil 8Micro-NIR 1700. Viavi, 950 y 1600 nm. Modelos PCA análisis PLS-DA | Identificación del origen de animales individuales | Identificación, trazabilidad, autenticación. clasifican correctamente el 82% y el 79% de las muestras de cabras individuales utilizando muestras de cortes de costillar o lomo de cabra, respectivamente. | Clasificación correcta acorde al corte de carne. | Cozzolino, D. (2023) |
| NIRS | Patas de cangrejo rojo vivo | Prototipo NIRS 761-1081 nm La distancia objetivo 20 cm Las calibraciones PLSR | Proteína | Clasificación de cangrejos en contenido bajo (<80 %) y alto de carne. Los espectros revelan un cambio aparente en el pico de 980 nm hacia longitudes de onda más cortas con una cantidad reducida de carne. | La carne se evaluó visualmente después de la cocción y el enfriamiento. El contenido de agua en el músculo: gravimétricamente. Las dimensiones físicas de las patas, longitud y diámetro | Wold (2024) |
| NIRS | Carne de caza Longissimus thoracis et lumborum (LTL) de especies de caza (impala, blesbok, springbok, eland, ñus negros, cebra) | Espectrofotómetro NIR portátil MicroNIR™ OnSite 908 a 1700 nm; Análisis PCA Clasificación LDA, modelado SIMCA y PLS-DA. | Discriminación y clasificación de especies de carne de caza | Autenticación, análisis LDA precisiones de clasificación entre 68 y 100% PLS-DA entre 70 y 96% con tratamiento de espectros SNV-Detrend y Savitzky-Golay 2da derivada. SIMCA precisión entre 67% (springbok) y 100% (impala y eland). | El contenido de humedad (AOAC 934.01.30), proteína (AOAC 992.15) y grasa de los filetes de carne de caza se determinó por métodos fisicoquímicos con extracción con cloroformo. | Dumalisile, P. (2020) |

| Técnica | Muestra | Condiciones NIR | Análisis | Alcances | Comparación | Referencia |
|------------------|---|--|---|--|--|-----------------|
| NIRS | Carne de caza Músculo de diferentes especies de caza (ostrich, zebra, springbok) | Espectrofotómetro portátil MicroNIR OnSite (MN1700) 908–1676 nm. Modelado SIMCA, KNN, análisis LDA, MDA, QDA y PLS-DA | Diferenciación de especies, determinación de estado (fresco o previamente congelado), diferenciación de tipo de músculo | Diferenciar entre especies (89,8% y el 93,2%). Distinción entre carne fresca y previamente congelada (90%–100%). Distinguir cortes: músculos de avestruz (100%), cuartos delanteros y traseros de los músculos de cebra (90,3%) y antílope saltarín (97,9%). | Comparación con respecto al corte y tipo de carne | Edwards (2020) |
| NIRS | Ovino Carne de cordero australiano | NIR portátil (S-7090, SOMA optics, 885–1015 nm. egresión de mínimos cuadrados parciales (PLS) | Grasa intramuscular (IMF) | Grasa intramuscular (IMF) impacto del tiempo de despique en la medición del IMF% del dispositivo NIR. El modelo de calibración final se basó en 1318 observaciones y tuvo una precisión moderada ($R^2 = 0,77$, RMSE CV = 0,75). | Evaluación de precisión y exactitud del dispositivo NIR | Stewart (2024) |
| NIRS | Pollo Filetes de pollo | MicroNIR Pro NIR (Viavi Solutions, Milpitas, 908–1676 nm. Modelo de clasificación predictiva (PLS-DA, CP-ANN, SVM y RSDE) y validación cruzada (CV). | Autenticidad, condición de frescura y origen del pollo | Autenticación, calidad, análisis | Se comparó contra métodos de clasificación comunes como análisis discriminante de mínimos cuadrados parciales (PLS-DA), red neuronal artificial (ANN) y máquina de vectores de soporte (SVM). | Parastar (2020) |
| HIS-NIRS NIRS | Pollo Filete de pechuga de pollo (con las miopatías "wooden breast" y "spaghetti meat", y filets normales) | Espectrómetro NIR QVision500 (TOMRA Sorting Solutions). Prototipo NIR para grasas. Calibración imágenes hiperespectrales o en píxeles individuales para obtener imágenes químicas. Análisis LDA Validación cruzada completa dejando una muestra afuera. | Humedad, proteínas, propiedades de retención de agua | Separación menos efectiva para spaghetti meat debido a la superposición de propiedades medidas. NIRS en línea para detectar y clasificar filetes de pechuga de pollo con las miopatías pechuga de madera y carne de espagueti de los filetes normales | Los dos instrumentos NIRS bastante similares funcionaron de manera diferente, lo que enfatiza la importancia de optimizar la instrumentación, el muestreo y el proceso (por ejemplo, la estabilidad de la temperatura) para un rendimiento óptimo de las aplicaciones. | Wold (2020) |

| Técnica | Muestra | Condiciones NIR | Análisis | Alcances | Comparación | Referencia |
|---|---|--|--|---|--|------------------|
| NIRS | Pollo Productos cárnicos (albóndigas de pollo) | Espectros obtenidos usando DLP NIR scan Nano Software. 900-1700 nm Calibración se evaluaron RMSEC, RMSECV, R ² C y R ² CV | Color pH, proteína cruda (PC), humedad, materia seca (DM), grasa(EE), ceniza | R ² CV para las predicciones: Luminosidad (L*), (0,84) Enrojecimiento (a*), (0,72) Amarilleamiento (b*), (0,77) pH (0,78) PC, (0,73) EE (0,83) Humedad (0,72) DM (0,72) Ceniza. (0,74). Desviaciones que no superan 2,41. | Métodos convencionales de análisis químico (AOAC, 1995). Proteína bruta (PB) por Kjeldahl. Extracto etéreo por Soxhlet utilizando éter dietílico. Humedad y cenizas por métodos térmicos. | Hashem (2022) |
| NIRS | Pollo Músculo liofilizado de pollo nativo chino | Espectrómetro IRPrestige-21 (Shimadzu), 1000 a 2502 nm. Calibración: PLS. Validación LOOCV. Análisis PCA Eliminación muestras atípicas: MCCV | Proteína | Cuantificación R ² C 0.95, Error estándar de validación cruzada 1,18, Predicción (R ² P) de 0,95, Relación entre la desviación estándar de la validación y la calibración (RPDP) 4,62. | Proteína cruda: Kjeldahl lípidos de muestras liofilizadas | Niu (2024) |
| NIRS | Porcino Carne de cerdo picada | Espectrómetro JDSU MicroNIR 2200 1100–2200 nm. Datos pretratados SNV, MSC y derivada primera de Savitzky-Golay (FD). | TBARS (ácido tiobarbitúrico), indicador de oxidación lipídica | Evaluación de frescura, análisis de calidad. Los modelos de regresión basados en diferentes técnicas de preprocesamiento (MSC, FD, SNV) produjeron un R ² p más alto y un RMSEp más bajo en comparación con los modelos basados en los espectros sin procesar (NP). (R ² p y RMSEp de 0,844 y 0,088). | Métodos espectrofotométricos convencionales. | Kucha (2020) |
| Espectroscopía visible a infrarrojo cercano (Vis-NIR) | Porcino Muestras de carne de cerdo | Se utilizaron sondas ópticas de fibra y esfera de integración para medir la frescura de las muestras a temperatura ambiente. | Mioglobina, oximioglobina, grasa, agua, colágeno análisis de frescura. | Calidad, análisis | Comparación con análisis convencional de espectros de reflectancia | Peyvasteh (2020) |

| Técnica | Muestra | Condiciones NIR | Análisis | Alcances | Comparación | Referencia |
|---------|--|--|--|---|---|------------------|
| NIRS | Porcino Carne intacta y carne picada (Longissimus thoracis et lumborum de cerdo ibérico) | FT-NIRS (Antaris™ II, Thermo Fisher Scientific) 1000–2500 nm Coeficiente de determinación (R^2), RMSE, RPD y RER). | Color mioglobina, pérdida de agua, fuerza de corte, perfil de textura (dureza, cohesión, elasticidad, masticabilidad). | Los coeficientes de determinación más altos (R^2_p) en muestras de lomo intacto se lograron para dureza, enrojecimiento (a^*) y amarillez (b^*) ($0,7 < R^2_p < 0,8$), Muestras picadas, los parámetros de luminosidad (L^*), contenido de mioglobina y textura se obtuvieron siempre con $R^2_p > 0,7$. | Color: colorímetro Analizador de textura Fuerza de corte: prueba de Warner-Bratzler. Dureza, cohesión, elasticidad y masticabilidad mediante parámetros reológicos. Hemoglobina por espectroscopia. | Fernández (2021) |
| NIRS | Porcino, caprino, bovino Ganado vacuno lechero (mastitis y tuberculosis) | Aplicación de NIRS en combinación con cromatografía de gases acoplada a espectrometría de movilidad iónica (GC-IMS) para resolver problemas específicos en la producción animal. | Autenticación, diagnóstico y tratamiento de enfermedades | Diagnóstico y tratamiento de enfermedades (mastitis y tuberculosis bovina) | Cromatografía de gases acoplada a espectrometría de movilidad iónica (GC-IMS) | Rodríguez (2023) |

Espectroscopia de infrarrojo cercano (NIRS). Imágenes hiperespectrales visibles e infrarrojas cercanas (VNIR), Regresión por mínimos cuadrados parciales (PLSR). Regresión por componentes principales (PCR). Modelos análisis de componentes principales (PCA). Análisis discriminante de mínimos cuadrados parciales (PLS-DA). Análisis discriminante lineal (LDA), Modelado independiente suave por analogía de clase (SIMCA). K-vecino más cercano (KNN). Análisis Mahalanobis (MDA), Análisis cuadrático (QDA). Error cuadrático medio de calibración (RMSEC), Error cuadrático medio de validación cruzada (RMSECV), Coeficiente de calibración (R^2_C). Coeficiente de validación cruzada (R^2_{CV}). Validación cruzada de dejar uno fuera (LOOCV). Variación normal estándar (SNV), corrección de dispersión multiplicativa (MSC), Error cuadrático medio (RMSE), desviación de predicción residual (RPD). Razón de error de rango (RER).

Robert, (2017). evaluó la viabilidad de utilizar espectroscopia de infrarrojo cercano (NIRS) para detectar y analizar músculos que se arrastran a través de la piel de animales vivos. Los resultados muestran que NIRS tiene el potencial de monitorear de forma no invasiva las características relacionadas con la grasa o los músculos. Los modelos discriminantes se desarrollaron utilizando regresión de análisis de mínimos cuadrados parciales (PLS-DA) y se establece que se deben hacer más pruebas antes de recomendar su uso en la industria cárnica

Sevoia 2021, examina la posibilidad de utilizar espectrómetros NIR portátiles para evaluar las características de calidad de la carne en los mataderos y mejorar genéticamente la calidad de la carne. Los parámetros cualitativos (pH, color, capacidad de retención de agua, ternura) se evaluaron en muestras de músculo ocular bovino utilizando métodos de laboratorio tradicionales y se predijeron basándose en espectroscopía NIR. Los resultados muestran que las predicciones NIR de pérdida de color, pH y pelado pueden ser útiles como indicadores indirectos de selección genética, mientras que las predicciones de pérdida de color y ternura cocida son menos efectivas. También establece que el parámetro más fácilmente escalable es el color ($R^2 > 0,52 < 0,8$), especialmente con técnicas V-NIRS. El pH presentó algunos inconvenientes que estuvieron asociados con el tipo de corte, y el tiempo de empaque y las pérdidas por purga (R^2 alrededor de 0,30), y muy pobres para las pérdidas por cocción y la ternura (R^2 por debajo de 0,20). Sin embargo, mejora la precisión del pronóstico de métricas de calidad que son difíciles de medir directamente.

Por otro lado, Veloso, (2023), mejora la precisión del modelo aumentando el tamaño de la muestra. El objetivo del estudio fue determinar las características de la canal y la calidad de la carne, así como la composición química de las secciones 9-11 de las costillas de ganado vacuno mediante espectroscopía NIR portátil. Los modelos evaluaron con precisión las características de la canal y la calidad de la carne, así como la composición química, aunque la precisión puede variar según el modelo y el punto de medición y deben ser criterios de caracterización y validación.

Entre los parámetros de calidad que se resaltan está el color de la carne de bovino y el tejido adiposo es crucial para la industria cárnica, ya que influye en la decisión de compra de los consumidores. Sin embargo, factores como la genética y la nutrición afectan significativamente estos atributos. En los mercados de carne de Europa del Sur, se prefieren tejidos de color más claro, lo que subraya la necesidad de métodos de análisis precisos. Algunas bandas de absorción son claramente visibles en el espectro promedio de la carne de res y pueden identificarse mediante inspección visual. Los picos de absorción local en el rango visible alrededor de 415, 540, 580, 762 nm debida al OH- pueden estar relacionados con el contenido de mioglobina y oximioglobina en la carne, que contribuyen a su color (Cozzolino et al., 2024). En carne de cerdo se aplicando PLS se encontró predicción de color para los parámetros L^* , a^* y b^* , de R^2 y la desviación de predicción residual (RPD) de 0,67/1,7, 0,86/2 y 0,76/1, respectivamente (Furtado, et al, 2018).

Un área de creciente interés es la detección de la oxidación de lípidos en la carne, ya que el contenido de malondialdehído, un indicador de oxidación es bajo y los métodos tradicionales son lentos y generan subproductos no deseados. Ripoll y colaboradores (2018) evaluó la eficacia de la espectroscopia de infrarrojo cercano (NIRS) para predecir la oxidación de lípidos en la carne de cordero y distinguir la dieta de las ovejas maternas de la dieta de los corderos lactantes (alfalfa, alfalfa o dieta mixta). NIRS fue útil para detectar la oxidación de lípidos en concentraciones de ppm y distinguir la dieta materna, proporcionando una alternativa rápida y libre de químicos al sistema TBARS tradicional. Así mismo, Kucha (2020), entre los análisis de carne de porcino realizó la determinación de la oxidación de lípidos, obtiene un monitoreo rápido y portátil de los valores de sustancias reactivas con ácido tiobarbitúrico (TBARS) para evaluar la frescura de la carne de cerdo picada; usó un modelo simplificado (RC-PLSR) con R^2p de 0.830 y RMSE de 0.068 mg MDA/kg de carne.

El sistema de producción del cerdo ibérico, caracterizado por el engorde en condiciones eco

amigable influye significativamente en la calidad organoléptica de la carne. Esta calidad está influenciada por factores genéticos y el sistema de cría, distinguiéndose por un mayor porcentaje de ácidos grasos mono insaturados. La evaluación tradicional de la calidad de la carne suele ser costosa y destructiva, lo que limita su aplicabilidad en tiempo real. La espectroscopia de infrarrojo cercano (NIRS) surge como una técnica prometedora para la determinación rápida y no destructiva de parámetros de calidad en productos cárnicos. Las bandas importantes de análisis debidas a las grasas que están asociadas al gran pico de absorción alrededor de 1200 nm y las de menor absorción en 1400 y 1450 nm representadas por vibración de estiramiento del CH en ácidos grasos. Por otro lado, las bandas de combinación N–H, entre 2020 y 2170 nm, lo que podría deberse a la composición de proteína. Una relación de estas bandas se asocia con la ternura de la carne. Fernández y colaboradores en 2023 establecieron modelos de calibración a partir de mediciones químicas instrumentales y datos espectrales NIRS utilizando regresión de mínimos cuadrados (PLS). Las muestras se dividen en dos conjuntos de datos aleatorios (80% en el conjunto de entrenamiento, 20% en el conjunto de validación externa). En el procedimiento de validación externa, el mayor coeficiente de determinación (R^2_p) en muestras de lomo intacto se alcanzó para firmeza, enrojecimiento (a^*) y amarillez (b^*) ($0,7 < R^2_p < 0,8$). Así, la NIRS permite la evaluación de características como la capacidad de retención de agua, el contenido de mioglobina y los parámetros de color y textura, ofreciendo una alternativa eficiente y menos invasiva para la industria cárnica. (Fernández et al., 2021)

La carne de pollo se ha analizado en diferentes presentaciones tales como filetes, albóndigas de pollo (Hashem et al, 2022) con altos valores de Músculo liofilizado de pollo nativo chino (Niu et al, 2024) R^2_{CV} de luminosidad (0,84), Enrojecimiento (a^*), (0,72), Amarilleamiento (b^*), (0,77), pH (0,78), PC (0,73), Extracto etéreo E (0,83), Humedad (0,72), Materia seca (0,72), Ceniza. (0,74) y desviaciones que no superaron el 2.41. Igualmente, Niu (2024) obtiene un método para predecir el contenido de proteína en muestras de músculo liofilizado de pollo nativo chino. El mejor modelo se obtuvo usando transformación de variable normal estándar y derivada primera. El modelo mostró alta precisión con R^2_C y R^2_P de 0.95, SECV de 1.18, y RPDP de 4.62.

Dada la gran cantidad de opciones de cortes de carne y la posible adulteración o fraude la NIRS se ha utilizado para distinguir la variabilidad entre ellas. Mediante NIRS fue posible distinguir la carne de seis especies de caza de diferentes tamaños, obtenidas de diferentes granjas en Sudáfrica. Los filetes de músculo de *Longissimus thoracis et lumborum* se analizaron con un espectrofotómetro NIR portátil en el rango espectral de 908-1700 nm. Los datos espectrales se pre procesaron con combinaciones de técnicas como suavizado y normalización y se analizaron utilizando técnicas de clasificación como LDA y PLS-DA. Los modelos mostraron una alta precisión de clasificación, aunque se sugiere ampliar el conjunto de muestras para mejorar la precisión y cubrir las variaciones estacionales y geográficas. LDA presentó precisiones de clasificación que oscilaron entre 68 y 100%, independientemente de la combinación de pre procesamiento utilizada. PLS-DA generó precisiones entre 70 y 96% cuando los espectros se trataron con SNV-Detrend y Savitzky-Golay 2nd derived. Los resultados de predicción obtenidos con SIMCA, pre procesados con suavizado y SNV-Detrend, oscilaron entre 67% (springbok) y 100% (impala y eland) (Dumalisile et al., 2020). Así mismo, Edwards y colaboradores en 2020, Distinguen cortes: músculos de avestruz (100%), cuartos delanteros y traseros de los músculos de cebrá (90,3%) y antílope saltarín (97,9%). Discierne entre carne fresca y previamente congelada (90-100%). Cozzolino, y colaboradores (2023) clasificó entre un 82 % y el 79% de las muestras individuales de carne de cabra basándose en muestras de rib eye o lomo de cabra, usando un NIR potable y un rango espectral entre 900-1600 nm. Así mismo, Tirado y colaboradores (2023) pudieron establecer la pureza de carne de Alpaca pura y/o adulterada con cerdo, pollo y carne de res (0 – 50% w/w) usando Hiperespectral Imaging (NIR-HSI), y análisis PCA, DD-SIMCA, y PLSR. Jiang y colaboradores en 2023 realizan un estudio de detección de adulteración de

carne de res con carne de pato de 0 a 100% (p/p) en adiciones de 10%. El modelo basado en las longitudes de onda de carga de PC adecuadas seleccionadas presento resultados con $R^2_p = 0,96$, $RMSEP = 6,58 \%$ y $RPD = 4,86$ con un límite de detección (LOD) de $7,59 \%$.

3.2. Carnes curtidas.

Los productos cárnicos como salchichas, hamburguesas y albóndigas son ampliamente consumidos por su sabor, valor nutricional y vida útil. La carne es una fuente importante de proteínas, vitaminas y minerales y su calidad afecta directamente la elección del consumidor. Factores como las condiciones de transporte, almacenamiento y temperatura pueden influir en características como el color, la textura y el sabor. Las técnicas tradicionales para evaluar la calidad de la carne, como el análisis sensorial y químico, suelen ser destructivas, tediosas y poco prácticas para un análisis rápido y en tiempo real. Por esta razón, se busca la aplicación de tecnologías no destructivas y de respuesta rápida, como la espectroscopia de infrarrojo cercano (NIRS), que ofrece una alternativa precisa y eficiente para el control de calidad en la industria cárnica. (Hashem et al., 2022). En la tabla 2 se pueden observar algunos alcances de la tecnología NIS para el análisis de productos cárnicos procesados.

Los productos procesados como las carnes curtidas o fermentadas son de gran aceptabilidad en diferentes mercados. Ellas suelen estar acompañadas de etiquetados para ofrecer a los consumidores información precisa sobre la composición y los riesgos asociados a los productos que consumen. En los productos cárnicos procesados, el cloruro de sodio (NaCl) es un ingrediente económico que influye en diversas características como la textura, el color, el sabor, la retención de agua y la vida útil. En el caso de productos cárnicos curados, como el jamón, el contenido de sal es un factor crítico debido a su impacto en la salud como la hipertensión y las enfermedades cardiovasculares. Los reguladores han presionado a la industria alimentaria para reducir los niveles de sal, lo que requiere métodos de análisis rápidos y precisos. Tradicionalmente, la evaluación química del contenido de sal en estos productos se realiza mediante métodos costosos, lentos y generadores de residuos. La espectroscopia de infrarrojo cercano (NIRS) emerge como una alternativa eficiente, no destructiva y precisa, que facilita el análisis de múltiples propiedades de la carne en tiempo real, mejorando así el control de calidad y la optimización de la producción (Campos et al., 2017).

Campos y colaboradores (2016) utilizaron la NIRS entre 830 a 2500 nm para predecir en Rodajas de jamón curado envasado al vacío la cualificación de sodio para el control de calidad y etiquetado preciso. Se observaron $\%R^2$ entre 86,2 y 90,2%. La capacidad de predicción de validación externa fue de 3,63 y un error de predicción: 0,12% Na. Los datos se compararon con el método de Espectrofotometría de emisión atómica de plasma acoplado inductivamente (ICP). Por otro lado, De Marchi y colaboradores (2016) hicieron análisis de sodio en Carne procesada (tanto enteras como molidas en espectrómetro de transmitancia NIRS en rango espectral entre 850 y 1050nm, la cuantificación del contenido de sodio también se comparó con ICP. Durante la validación cruzada se obtuvo alta correlación tanto para las carnes enteras procesadas. ($R^2 CV = 0,93$) y molidas ($R^2 CV = 0,95$). Así, la espectroscopia de infrarrojo cercano (NIRS) ofrece una solución prometedora al permitir la determinación precisa del contenido de sodio de forma no destructiva y en tiempo real, facilitando el cumplimiento normativo y mejorando el control de calidad (De Marchi et al., 2017).

Tabla 2. Resumen de alcances analíticos de la NIRS en carnes curadas o procesadas

| Técnica | Muestra | Condiciones NIR | Análisis | Alcances | Comparación | Referencia |
|--|---|--|--|--|---|----------------------|
| NIRS | Rodajas de jamón curado envasado al vacío | Espectrómetro NIR de Transformada de Fourier (FT) modelo Matrix-F emission (Bruker Optik GmbH. Sonda de medición remota Q-412/AF 830–2500 nm Modelos PLS y PCA | Sodio | Cuantificación del contenido de sodio para el control de calidad y etiquetado preciso. %R ² =86,2-90,2%. Capacidad de predicción validación externa: 3,63, Error de predicción: 0,12% Na. | Espectrofotometría de emisión atómica de plasma acoplado inductivamente (ICP-AES) | Campos, M. (2016) |
| Near Infrared Transmittance (NIT) spectroscopy | Carne procesada (tanto enteras como molidas) | Espectrometro NIR FoodScan, 850-1050 nm algoritmos aplicados para la corrección: (D), (SNV), (SNV + D) y (MSC). | Sodio | Cuantificación del contenido de sodio. validación cruzada (R ² CV = 0,93) y molidas (R ² CV = 0,95) | Comparación con el método de espectrometría de plasma acoplado inductivamente (ICP-OES) | De Marchi, M. (2016) |
| NIRS | Jamón curado Especies de moho (productoras y no productoras de OTA) | Espectrómetro portátil MicroNIR OnSite, VIAVI, Rango: 945 a 1500 nm Tiempo de integración: 6,5 μs 100 escaneos. Algoritmo SVM, C-SVC | Discriminación de especies productoras y no productoras de OTA | Calidad, autenticación, análisis de especies de moho. sensibilidad del 85% y especificidad del 86% en la predicción, con un 95% de sensibilidad y especificidad en la diferenciación de especies no productoras de OTA | Microbiología mohos ocratoxigénicos | Cebrián, E. (2021) |
| Hiperespectral NIR | Salchichas Cantonés (intactas y rebanadas) | Espectrógrafo de imágenes (ImSpector N17E; Spectral Imaging Ltd. Hiperespectral imaging 874-1734 nm. Se utilizaron métodos quimiométricos, (SVM) y (RF). | Clasificación de calidad (top, first, second grades) | Ambos modelos para salchichas intactas funcionaron mejor que los de salchichas en rodajas, con una precisión de clasificación del conjunto de calibración y predicción de más del 90% | La precisión de la clasificación se define como el porcentaje de muestras correctamente clasificadas en todas las muestras. | Gong (2017) |
| NIRS | Jamón curado (razas ibérica e ibérica x Duroc) | Foss NIRSystem 500, sonda de fibra óptica. 1100–2000 nm. ANN de alimentación MLP se utilizó para procesar los valores de absorbancia | Parámetros sensoriales | Correlación instrumental entre la Calidad y predicción de características sensoriales | Evaluación 28 parámetros sensoriales analizados por un panel entrenado para el análisis del perfil sensorial por un panel de cata entrenado | Hernández (2020) |

| Técnica | Muestra | Condiciones NIR | Análisis | Alcances | Comparación | Referencia |
|---------|---|--|--|---|--|----------------|
| NIRS | Lomito curado de Iberico (muslo Serratus ventralis) | Espectrómetro NIRS LabSpec 2500 (ASD Inc)) con sonda de contacto de fibra óptica. 1000–2500 nm. Modelo comparación PLS-DA y SIMCA | Discriminación del proceso de congelación previa al curado | Autenticación de producto curado, control del proceso de congelación previa al curado. PLS-DA sensibilidad y especificidad superiores al 85%. | Comparación entre PLS-DA y SIMCA. | León (2022) |
| NIRS | Cecina (carne de res curada) | Foss NIR System 5000 (Foss, Hillerod sonda de fibra óptica de reflectancia remota. 1100 y 2000 nm (ANN) para la predicción tipo retropropagación con perceptrón multicapa de tipo feedforward.. ANOVA, SIMCA mediante PCA. | Parámetros sensoriales (atributos organolépticos) | Predicción precisa de atributos sensoriales, distinción entre muestras PGI y no-PGI, Optimización de la arquitectura de la red neuronal artificial (ANN) ($R^2 > 0,8$ excepto para la intensidad del olor). El MSEP de valores predichos y de referencia es posible predecir con precisión 23 de los 24 parámetros sensoriales | Análisis sensorial tradicional Apariencia: veteado, color de la grasa, intensidad del color, exudado y puntos blancos. Sabor: intensidad del olor, olor a curado, olor rancio, intensidad del sabor, sabor a curado, salinidad, dulzura, rancidez y regusto. Finalmente. Textura: dureza, jugosidad, fibrosidad, masticabilidad y gomosidad. | Revilla (2020) |

Ocratoxina A (OTA). C- Regresión vectorial con soporte manual (C-SVC). Eliminación de tendencia (D). Variable normal estándar (SNV), Variable normal estándar y eliminación de tendencia (SNV + D). Corrección de dispersión multiplicativa (MSC). Máquina de vectores soporte (SVM). Bosques aleatorios (RF). Red neuronal artificial (ANN). Perceptrón multicapa (MLP). Análisis Discriminante de Mínimos Cuadrados (PLS-DA). Modelos Independientes de Clasificación Análoga (SIMCA). Análisis de la varianza (ANOVA). Análisis de componentes principales (PCA). Error cuadrático medio de predicción (MSEP).

Durante el proceso de curado de carnes secas, las condiciones ambientales favorecen el crecimiento de hongos en la superficie, los cuales juegan un papel beneficioso en la reducción de la rancidez y la producción de compuestos volátiles deseables. Sin embargo, el crecimiento descontrolado de estos hongos puede suponer riesgos para la salud, especialmente debido a la producción de micotoxinas como la ocratoxina A (OTA), que es nefrotóxica, neurotóxica y potencialmente cancerígena. Tradicionalmente, la detección de hongos y micotoxinas ha sido costosa y laboriosa, requiriendo métodos invasivos. Cebrian y colaboradores 2021, utilizaron un espectrómetro portátil MicroNIR y la presentan una alternativa prometedora para la detección rápida y no destructiva de hongos productores de OTA en productos cárnicos en rangos espectrales entre 945 y 1500 nm, permitiendo el monitoreo en tiempo real y la evaluación eficiente durante el procesamiento de carnes curadas. El análisis de especies de mohos, evidenciaron aplicando algoritmos de regresión vectorial con soporte manual (C-SVC) y vectores de soporte de maquina (SVM), sensibilidad del 85% y especificidad del 86% en la predicción, con un 95% de sensibilidad y especificidad en la diferenciación de especies no productoras de OTA. (Cebrián et al., 2021)

La NIRS ha demostrado ser una herramienta prometedora para la discriminación de carnes curadas en el proceso de pre congelación. En el caso del solomillo ibérico de Montanera, la tecnología NIRS, combinada con el análisis de discriminación por mínimos cuadrados parciales (PLS-DA), demostró una alta capacidad de discriminación, con una sensibilidad y especificidad superiores al 85%. Aunque los modelos SIMCA (Soft Independent Modeling of Class Analogies) mostraron una disminución en la especificidad, estos resultados sugieren que la NIRS podría ser útil para controlar la práctica de la pre congelación en productos cárnicos curados. (León et al., 2022).

La implementación de Hiperespectral NIR en rangos de 874 y 1734 nm han permitido clasificar en un 90% de predicción usando métodos quimiométricos, (SVM) y (RF), Salchichas Cantonés (intactas y rebanadas) en aspectos de calidad top, primer y segundo grado. (Gong et al., 2017). Así mismo, Revilla y colaboradores (2022) realizan predicción de atributos sensoriales mediante la optimización de la arquitectura de la red neuronal artificial (ANN) con alta correlación ($R^2 > 0,8$) excepto para la intensidad del olor. El MSEP de valores predichos y de referencia es posible predecir con precisión 23 de los 24 parámetros sensoriales entre los cuales se tienen la apariencia (veteado, color de la grasa, intensidad del color, exudado y puntos blancos), sabor: (intensidad del olor, olor a curado, olor rancio, intensidad del sabor, sabor a curado, salinidad, dulzura, rancidez y regusto) y textura: dureza, jugosidad, fibrosidad, masticabilidad y gomosidad.

3.3. Avances tecnológicos de NIRS en cárnicos

La creciente preocupación por la calidad y los efectos sobre la salud del consumo de carne ha llevado a la necesidad de métodos de control de calidad más eficientes y sostenibles en la producción de carne. Las técnicas analíticas tradicionales son caras, requieren mucho tiempo y utilizan disolventes tóxicos, lo que destaca la necesidad de métodos alternativos. La espectroscopia de infrarrojo cercano (NIRS) ofrece una solución rápida, rentable y no invasiva para evaluar la calidad de la carne, proporcionando un análisis preciso a través de la absorción de radiación electromagnética en el rango de 750 a 2500 nm. Esta tecnología representa una opción válida para satisfacer las demandas modernas de calidad y autenticidad de los productos cárnicos (Prieto et al., 2017).

La inspección y el control de los alimentos han evolucionado hacia técnicas analíticas rápidas, portátiles, rentables y accesibles, especialmente en el sector cárnico. La espectroscopia de infrarrojo cercano (NIRS) cumple estos requisitos y ha demostrado ser eficaz para evaluar la frescura y la calidad de la carne de cerdo. Superando las limitaciones de los equipos de laboratorio grandes y costosos, los dispositivos NIRS portátiles permiten una evaluación precisa y no destructiva de los atributos de calidad.

En particular, el uso de NIRS en productos cárnicos como la carne picada, que es susceptible a la oxidación de lípidos y la pérdida de frescura, ofrece una solución valiosa para mantener la calidad y la seguridad de los alimentos (Kucha & Ngadi, 2020).

Inicialmente, se menciona que la espectroscopía de imágenes hiperespectrales (HSI) ha demostrado ser eficaz para detectar y visualizar la adulteración de carne de res con carne de pato. En estudios recientes, se adulteró carne de res molida con carne de pato en diferentes porcentajes y se utilizaron imágenes hiperespectrales visibles e infrarrojas cercanas (VNIR) para el análisis. Los métodos de regresión como la regresión por mínimos cuadrados parciales (PLSR) y la regresión por componentes principales (PCR) mostraron que el modelo basado en los espectros brutos obtenía mejores resultados. Este enfoque permitió una visualización espacial precisa de los niveles de adulteración, evidenciando el potencial de HSI para la detección de adulteraciones en productos cárnicos. (Jiang et al., 2019)

Por otra parte, para el estudio sobre el uso de espectrómetros infrarrojos portátiles para la evaluación de la calidad de la carne en la cadena de producción demostró su utilidad en el mejoramiento genético del ganado. Los rasgos de calidad de la carne, como el pH, el color, la capacidad de retención de agua y la ternura, se evaluaron mediante análisis de laboratorio y predicciones basadas en espectros obtenidos en el matadero. Los resultados mostraron que las predicciones de color, pH y pérdidas por sangrado fueron útiles para la selección genética indirecta, aunque la precisión para las pérdidas por cocción y ternura fue menor. La tecnología de espectroscopia infrarroja puede facilitar la selección genética en rasgos de calidad que son difíciles de evaluar directamente. (Savoia et al., 2021)

Por otra parte, se dice que la espectroscopia de infrarrojo cercano (NIRS) ha emergido como una técnica eficiente para el análisis de alimentos sólidos, incluyendo los productos cárnicos. Utilizando el principio de reflexión de la luz en el espectro no visible, la NIRS permite la determinación del contenido porcentual de proteína, grasa y humedad en muestras. La tecnología basada en NIRS utiliza radiación electromagnética que interactúa con los enlaces atómicos de los alimentos, permitiendo la cuantificación precisa de sus componentes. El desarrollo de prototipos de bajo costo utilizando hardware y software asequibles, como sensores NIR, microcontroladores y sistemas de análisis de datos en plataformas como Python y Raspberry Pi, ha facilitado la implementación de esta técnica en el análisis de productos cárnicos. (Geovanni, 2018)

Por último, se menciona que, en el ámbito de la producción animal, la implementación de nuevas tecnologías es esencial para abordar diversos problemas y desafíos. La espectroscopia de infrarrojo cercano (NIRS) se ha convertido en una herramienta clave para mejorar la evaluación y autenticación de productos animales. Su capacidad para analizar rápidamente atributos como la calidad y la composición nutricional se ha aplicado con éxito en la producción de cerdo ibérico, la ganadería extensiva y el diagnóstico de enfermedades en el ganado lechero. Estos avances ponen de relieve la importancia de la NIRS en la optimización de procesos, el control de calidad y el aseguramiento de la autenticidad en la industria cárnica. (Rodríguez & Lourdes, 2023)

3.4. Autenticidad

El aumento significativo en la demanda de proteínas animales ha generado preocupaciones sobre la contaminación y la adulteración, así como los riesgos asociados para la salud. Aunque existen métodos convencionales para evaluar la calidad de la carne, estos suelen ser invasivos y costosos. La espectroscopia de infrarrojo cercano (NIRS) representa una alternativa prometedora, ya que es una técnica no invasiva, rápida, rentable y respetuosa con el medio ambiente. En la Tabla 3 se resumen algunos de los alcances analíticos y de control de autenticidad de proteínas animales por la NIRS, que complementan a los reportes establecidos en las tablas 1 y 2.

La autenticidad de los productos cárnicos se refiere a la garantía de que un producto cumple con

las especificaciones de calidad y origen declaradas, sin adulteraciones ni falsificaciones. Con el aumento de los casos de adulteración de la carne, garantizar la autenticidad se ha vuelto fundamental para la percepción del consumidor y la integridad del mercado. La espectroscopia de infrarrojo cercano (NIRS) se ha identificado como una herramienta eficaz para detectar la adulteración y evaluar la calidad de la carne, ofreciendo una alternativa rápida, no destructiva y precisa a los métodos de prueba tradicionales. Esta técnica facilita el control de la autenticidad y la calidad en la industria cárnica. (Dixit et al., 2017). Por otro lado, la certificación es el proceso mediante el cual se asegura que un producto cumple con ciertos estándares o normas establecidas, garantizando su calidad y autenticidad, como en el caso de la Indicación Geográfica Protegida (PGI) para la cecina de León. (Revilla et al., 2020)

La quimiometría como herramienta estadística y matemática se ha utilizado para interpretar datos obtenidos mediante métodos analíticos, como NIRS. Permite manejar la complejidad de los datos espectrales, facilitando la correlación entre perfiles químicos y características sensoriales de los productos, como la textura y el color, sin necesidad de análisis sensoriales extensos. Esta técnica ayuda a mejorar el control de calidad y la clasificación de productos cárnicos. (Hernández et al., 2020)

La creciente demanda de productos cárnicos orgánicos y libres de aditivos ha subrayado la necesidad de métodos eficaces para garantizar la autenticidad y calidad de estos productos. En particular, el mercado de carne de caza ha revelado la falta de estándares y la posibilidad de sustituciones o etiquetados incorrectos, lo que destaca la necesidad de una solución robusta y no destructiva. En este contexto, la espectroscopia de infrarrojo cercano (NIRS) se presenta como una herramienta prometedora, ya que ofrece una técnica rápida, precisa y económica para la autenticación de carne, superando las limitaciones de los métodos analíticos convencionales y proporcionando un control de calidad fiable (Edwards et al., 2020).

La autenticidad de la carne y la detección de fraudes plantean desafíos importantes para los científicos, la industria, las agencias reguladoras y los consumidores. La autenticidad es fundamental para abordar problemas sociales y de salud como las dietas religiosas y las alergias alimentarias. Los métodos de autenticación tradicionales, como la PCR, la cromatografía, la espectrometría de masas y los métodos basados en inmunoensayos son limitados en términos de tiempo, costo, complejidad y la necesidad de técnicos altamente capacitados. La espectroscopia de infrarrojo cercano (NIRS) está surgiendo como una alternativa prometedora debido a su velocidad, precisión y capacidades de análisis no destructivo. Además, técnicas como la obtención de imágenes hiperespectrales han atraído la atención por su capacidad para proporcionar información física y química sobre los productos cárnicos, lo que mejora la detección de adulteraciones y la autenticidad en los procesos de fabricación de alimentos. Dashti y colaboradores (2023), realizan comparación de alcances de dos espectrómetros NIRS con imagen hiperespectral, obteniendo para el Vis-NIR-HSI, (R^2p) 0,99, 0,88 y 0,99 con (RMSEP) de 9, 24 y 4 (% p/p) para carne de cerdo en vacuno, carne de cerdo en cordero y carne de cerdo en pollo, respectivamente. En el SWIR-HSI, los R^2p obtenidos con mejor rendimiento fueron 0,86, 0,77 y 0,89 con RMSEP de 16, 23 y 15 (% p/p) para carne de cerdo en res, carne de cerdo en cordero y carne de cerdo en pollo. (Dashti et al., 2023)

Aplicando NIR con reflectancia difusa y rangos espectrales entre 908–1676 nm se estableció autenticación de filetes de pollo aplicando modelos de modelo de clasificación predictiva (PLS-DA, CP-ANN, SVM y RSDE) y validación cruzada (CV). Parámetros como condición de frescura y origen del pollo presentaron alta precisión en la clasificación evidencian correlaciones superiores al 95%, se caracterizó por ser un método no destructivo, rápido y útil para autenticidad y control de origen en carne de pollo, los cuales se compararon contra métodos de clasificación comunes (Parastar et al, 2020)

TABLA 3.

| Técnica | Muestra | Condiciones NIR | Alcances | Comparación | Referencia |
|--|--|---|--|---|--------------------------|
| <p>Vis-NIR hyperspectral imaging</p> <p>SWIR hyperspectral imaging</p> | <p>Carne de cerdo, res, cordero, pollo (para adulteración)</p> | <p>Vis-NIR-HSI: Cámara portátil de barrido lineal hiperespectral Specim IQ con tecnología push-broom (Specim, Spectral Imaging ltd) 400 a 1000 nm.</p> <p>SWIR : cámara hiperespectrales Snapscan SWIR IMEC 1116–1670 nm.</p> <p>Métodos de análisis: SVM, ANN-BPN, y otros métodos multivariados</p> | <p>Vis-NIR-HSI, (R² p) 0,99, 0,88 y 0,99 con (RMSEP) de 9, 24 y 4 (% p/p) para carne de cerdo en vacuno, carne de cerdo en cordero y carne de cerdo en pollo, respectivamente.</p> <p>En SWIR-HSI, los R²p obtenidos con mejor rendimiento fueron 0,86, 0,77 y 0,89 con RMSEP de 16, 23 y 15 (% p/p) para carne de cerdo en res, carne de cerdo en cordero y carne de cerdo en pollo.</p> | <p>Comparación entre Vis-NIR-HSI y SWIR-HSI</p> | <p>Dashti, A. (2023)</p> |
| <p>NIRS</p> | <p>Filetes de pollo</p> | <p>MicroNIR Pro NIR (Viavi Solutions, Milpitas) modo de reflectancia difusa 908–1676 nm .</p> <p>modelo de clasificación predictiva (PLS-DA, CP-ANN, SVM y RSDE) y se validó mediante validación cruzada (CV).</p> | <p>Autenticidad, condición de frescura y origen del pollo. Alta precisión en la clasificación (>95%), método no destructivo, rápido y útil para autenticidad y control de origen en carne de pollo.</p> | <p>Se comparó contra métodos de clasificación comunes</p> | <p>Parastar (2020)</p> |

La calidad de la carne, que es fundamental para la satisfacción del consumidor, se evalúa a través de atributos como la ternura, el contenido de grasa y el color. La ternura es particularmente importante, ya que los consumidores están dispuestos a pagar más por productos que brinden una textura superior. El contenido de grasa influye en el sabor, la jugosidad y la textura de la carne, mientras que el color es un determinante visual en las decisiones de compra. Los métodos tradicionales para analizar estos parámetros, como la resistencia al corte de Warner-Bratzler para la ternura o la puntuación de marmoleado para el contenido de grasa, son costosos y destructivos. La espectroscopia de infrarrojo cercano (NIRS) ofrece una alternativa prometedora al proporcionar mediciones rápidas, no destructivas y rentables utilizando espectrómetros en la región del infrarrojo cercano, lo que permite la predicción de estos atributos sin la necesidad de un análisis de laboratorio en profundidad. (Magalhães et al., 2018)

3. Conclusiones

La espectroscopia de infrarrojo cercano (NIRS) está demostrando ser una herramienta prometedora en este contexto, ya que proporciona una alternativa rápida, precisa y rentable a los métodos analíticos tradicionales. NIRS no sólo supera las limitaciones de los métodos tradicionales en términos de velocidad y costo, sino que también proporciona el control de calidad confiable y no destructivo necesario para mantener la integridad de los productos cárnicos durante un mercado cada vez más exigente.

NIRS es eficaz para evaluar parámetros fisicoquímicos de calidad de productos cárnicos, como la humedad, la grasa, proteínas, color, pH, entre otros. Este método permite identificar y clasificar estos parámetros con alta precisión y eficiencia, ayudando a optimizar la producción y cumplir con los estándares regulatorios. La capacidad de NIRS para proporcionar resultados en tiempo real y sin la necesidad de una preparación extensa de muestras es una ventaja significativa sobre los métodos tradicionales, HPLC e ICP, que son más costosos y requieren personal más cualificado.

La comparación de NIRS con otros métodos analíticos muestra tanto sus ventajas como sus limitaciones. Si bien NIRS es superior por su velocidad, naturaleza no destructiva y menor necesidad de preparación de muestras, también presenta desafíos, como la necesidad de una calibración específica de la carne y la dependencia de la calidad de los equipos y los métodos de calibración. Es necesario abordar estas limitaciones para mejorar la eficacia del NIRS en diversas aplicaciones de la industria cárnica, desde la detección de contaminación hasta la autenticación de la calidad de la carne.

El análisis de datos y la comparación de métodos resaltan la importancia de desarrollar métodos y análisis de calibración y estandarización más sólidos. La integración de NIRS en el entorno de procesamiento de carne y su capacidad para realizar análisis en línea en tiempo real proporciona una solución valiosa para mejorar la eficiencia y confiabilidad en la industria cárnica. Sin embargo, es importante realizar más investigaciones y mejorar los métodos de calibración y validación para superar las variaciones y limitaciones actuales. El uso de NIRS en productos cárnicos proporciona una solución innovadora y eficaz a los problemas de calidad y autenticidad en este sector.

La tecnología NIRS se considera una herramienta valiosa que podría transformar el control de calidad en la industria cárnica, permitiendo una evaluación de productos más rápida, precisa y sostenible. A medida que se desarrollan nuevos métodos y enfoques para la calibración e integración del NIRS, este método tiene el potencial de convertirse en el estándar en el análisis de productos cárnicos, contribuyendo a mejoras continuas en la calidad y la seguridad de los alimentos.

4. Referencias

- Barbon, S., Da Costa Barbon, A. P. A., Mantovani, R. G., & Barbin, D. F. (2018). Machine Learning Applied to Near-Infrared Spectra for Chicken Meat Classification. *Journal Of Spectroscopy*, 2018, 1-12. <https://doi.org/10.1155/2018/8949741>
- Campos, M. I., Mussons, M. L., Antolin, G., Debán, L., & Pardo, R. (2017). On-line prediction of sodium content in vacuum packed dry-cured ham slices by non-invasive near infrared spectroscopy. *Meat Science*, 126, 29-35. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2016.12.005>
- Castro-Reigía, D., Ezenarro, J., Azkune, M., Ayesta, I., Ostra, M., Amigo, J. M., ... & Ortiz, M. C. (2024). Yoghurt standardization using real-time NIR prediction of milk fat and protein content. *Journal of Food Composition and Analysis*, 128. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2024.106015>
- Cebrián, E., Núñez, F., Rodríguez, M., Grassi, S., & González-Mohino, A. (2021). Potential of Near Infrared Spectroscopy as a Rapid Method to Discriminate OTA and Non-OTA-Producing Mould Species in a Dry-Cured Ham Model System. *Toxins*, 13(9), 620. <https://doi.org/10.3390/toxins13090620>
- Cozzolino, D., Zhang, S., Khole, A., Yang, Z., Ingle, P., Beya, M., ... & Hoffman, L. C. (2024). Identification of individual goat animals by means of near infrared spectroscopy and chemometrics analysis of commercial meat cuts. *Journal of Food Science and Technology*, 61(5), 950-957. <https://doi.org/10.1007/s13197-023-05890-1>
- Cruz-Tirado, J. P., dos Santos Vieira, M. S., Correa, O. O. V., Delgado, D. R., Angulo-Tisoc, J. M., Barbin, D. F., & Siche, R. (2024). Detection of adulteration of Alpaca (*Vicugna pacos*) meat using a portable NIR spectrometer and NIR-hyperspectral imaging. *Journal of Food Composition and Analysis*, 126. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2023.105901>
- Dashti, A., Müller-Maatsch, J., Roetgerink, E., Wijtten, M., Weesepeel, Y., Parastar, H., & Yazdanpanah, H. (2023). Comparison of a portable Vis-NIR hyperspectral imaging and a snapscan SWIR hyperspectral imaging for evaluation of meat authenticity. *Food Chemistry X*, 18, 100667. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2023.100667>
- De Marchi, M., Manuelian, C. L., Ton, S., Manfrin, D., Meneghesso, M., Cassandro, M., & Penasa, M. (2017). Prediction of sodium content in commercial processed meat products using near infrared spectroscopy. *Meat Science*, 125, 61-65. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2016.11.014>
- Dixit, Y., Casado-Gavaldá, M. P., Cama-Moncunill, R., Cama-Moncunill, X., Markiewicz-Keszycka, M., Cullen, P. J., & Sullivan, C. (2017). Developments and challenges in online NIR spectroscopy for meat processing. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 16(6), 1172-1187. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12295>
- Dixit, Y., Casado-Gavaldá, M. P., Cama-Moncunill, R., Cama-Moncunill, X., Markiewicz-Keszycka, M., Cullen, P. J., & Sullivan, C. (2017). Developments and Challenges in Online NIR Spectroscopy for Meat Processing. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 16(6), 1172-1187. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12295>
- Dumalisile, P., Manley, M., Hoffman, L., & Williams, P. J. (2020). Near-Infrared (NIR) Spectroscopy to Differentiate Longissimus thoracis et lumborum (LTL) Muscles of Game Species. *Food Analytical Methods*, 13(5), 1220-1233. <https://doi.org/10.1007/s12161-020-01739-x>
- Dunne, P. G., Keane, M. G., O'Mara, F. P., Monahan, F. J., & Moloney, A. P. (2004). Colour of subcutaneous adipose tissue and M. longissimus dorsi of high index dairy and beefxdairy cattle slaughtered at two liveweights as bulls and steers. *Meat Science*, 68(1), 97-106. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2004.02.010>
- Edwards, K., Manley, M., Hoffman, L. C., Beganovic, A., Kirchler, C. G., Huck, C. W., & Williams, P. J. (2020). Differentiation of South African Game Meat Using Near-Infrared (NIR) Spectroscopy and Hierarchical Modelling. *Molecules*, 25(8), 1845. <https://doi.org/10.3390/molecules25081845>
- Fernández-Barroso, M. Á., Parrini, S., Muñoz, M., Palma-Granados, P., Matos, G., Ramírez, L., Crovetti, A., García-Casco, J. M., & Bozzi, R. (2021). Use of NIRS for the assessment of meat quality traits in open-air free-range Iberian pigs. *Journal Of Food Composition and Analysis*, 102,

104018. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2021.104018>
- Furtado, E. J. G., Bridi, A. M., Barbin, D. F., Barata, C. C. P., Peres, L. M., Barbon, A. P. A. D. C., ... & Batista, J. P. (2018). Prediction of pH and color in pork meat using VIS-NIR near-infrared spectroscopy (NIRS). *Food Science and Technology*, 39, 88-92. <https://doi.org/10.1590/fst.27417>
- Geovanni, G. C. M. (2018). Prototipo para análisis de alimentos sólidos usando espectroscopía de infrarrojo cercano. <https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/28110>
- Gong, A., Zhu, S., He, Y., & Zhang, C. (2017). Grading of Chinese Cantonese Sausage Using Hyperspectral Imaging Combined with Chemometric Methods. *Sensors*, 17(8), 1706. <https://doi.org/10.3390/s17081706>
- Gou, P., Tsenkova, E., & Van Loey, A. M. (2004). Near infrared spectroscopy for the prediction of water content and water activity in dry fermented sausages. *Meat Science*, 66(3), 669-675. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2003.09.012>
- Hashem, M. A., Morshed, M. M., Khan, M., Rahman, M. M., Al Noman, M. A., Mustari, A., & Goswami, P. K. (2022). Prediction of chicken meatball quality through NIR spectroscopy and multivariate analysis. *Meat Research*, 2(5) 34. <https://doi.org/10.55002/mr.2.5.34>
- Hashem, M., Morshed, M., Khan, M., Rahman, M., Noman, M. A., Mustari, A., & Goswami, P. (2022). Prediction of chicken meatball quality through NIR spectroscopy and multivariate analysis. *Meat Research | ISSN (Online Version) 2790-1971*, 2(5). <https://doi.org/10.55002/mr.2.5.34>
- Hernández-Ramos, P., Vivar-Quintana, A. M., Revilla, I., González-Martín, M. I., Hernández-Jiménez, M., & Martínez-Martín, I. (2020). Prediction of Sensory Parameters of Cured Ham: A Study of the Viability of the Use of NIR Spectroscopy and Artificial Neural Networks. *Sensors*, 20(19), 5624. <https://doi.org/10.3390/s20195624>
- Huang, H. J., Chen, H. M., & Sun, D. W. (2010). Application of near infrared spectroscopy to monitor the quality changes of beef during storage. *Meat Science*, 84(2), 287-293. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2009.09.013>
- Jia, W., Georgouli, K., Martinez-Del Rincon, J., & Koidis, A. (2024). Challenges in the Use of AI-Driven Non-Destructive Spectroscopic Tools for Rapid Food Analysis. *Foods*, 13(6), 846. <https://doi.org/10.3390/foods13060846>
- Jiang, H., Wang, W., Zhuang, H., Yoon, S., Yang, Y., & Zhao, X. (2019). Hyperspectral imaging for a rapid detection and visualization of duck meat adulteration in beef. *Food Analytical Methods*, 12(10), 2205-2215. <https://doi.org/10.1007/s12161-019-01577-6>
- Kademi, H. I., Ulusoy, B. H., & Hecer, C. (2019). Applications of miniaturized and portable near infrared spectroscopy (NIRS) for inspection and control of meat and meat products. *Food Reviews International*, 35(3), 201-220 Inc. <https://doi.org/10.1080/87559129.2018.1514624>
- Kartakoullis, A., Comaposada, J., Cruz-Carrión, A., Serra, X., & Gou, P. (2019). Feasibility study of smartphone-based Near Infrared Spectroscopy (NIRS) for salted minced meat composition diagnostics at different temperatures. *Food Chemistry*, 278, 314-321. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.11.054>
- Kucha, C. T., & Ngadi, M. O. (2020). Rapid assessment of pork freshness using miniaturized NIR spectroscopy. *Journal Of Food Measurement & Characterization*, 14(2), 1105-1115. <https://doi.org/10.1007/s11694-019-00360-9>
- León, L., Ortiz, A., & Tejerina, D. (2022). Near infrared spectroscopy for the pre-cure freezing discrimination of Montanera Iberian dry-cured lomo. *Journal Of Food Science and Technology*, 59(11), 4499-4509. <https://doi.org/10.1007/s13197-022-05530-0>
- Li, Y., Wang, H., Yang, Z., Wang, X., Wang, W., & Hui, T. (2024). Rapid Non-Destructive Detection Technology in the Field of Meat Tenderness: A Review. *Foods*, 13(10). <https://doi.org/10.3390/foods13101512>
- Liang, J., Wang, B., Xu, X., & Xu, J. (2024). Integrating portable NIR spectrometry with deep learning for accurate Estimation of crude protein in corn feed. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and*

- Biomolecular Spectroscopy*, 314, 124203. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2024.124203>
- Magalhães, A. F. B., De Almeida Teixeira, G. H., Ríos, A. C. H., Silva, D. B. D. S., Mota, L. F. M., Muniz, M. M. M., De Lelis Medeiros de Moraes, C., De Lima, K. M. G., Júnior, L. C. C., Baldi, F., Carneiro, R., De Oliveira, H. N., Chardulo, L. A. L., & De Albuquerque, L. G. (2018). Prediction of meat quality traits in Nelore cattle by near-infrared reflectance spectroscopy1. *Journal Of Animal Science*, 96(10), 4229-4237. <https://doi.org/10.1093/jas/sky284>
- Matenda, R. T., Rip, D., Marais, J., & Williams, P. J. (2024). Exploring the potential of hyperspectral imaging for microbial assessment of meat: A review. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2024.124261>
- Matsumoto, K., Okumura, T., Kohira, K., & Irie, M. (2024). Relationship among intramuscular fat, crude protein, and moisture in porcine longissimus thoracis muscle and their prediction by a handheld fiber-optic near-infrared spectrometer. *Journal of Food Composition and Analysis*. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2024.106535>
- Niu, G., Zhang, T., & Tao, L. (2024). Development and validation of a near-infrared spectroscopy model for the prediction of muscle protein in Chinese native chickens. *Poultry Science*, 103(4). <https://doi.org/10.1016/j.psj.2024.103532>
- OECD/FAO (2023), *OECD-FAO Agricultural Outlook 2023-2032*, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/08801ab7-en>.
- Parastar, H., Van Kollenburg, G., Weesepeel, Y., Van Den Doel, A., Buydens, L., & Jansen, J. (2020). Integration of handheld NIR and machine learning to “Measure & Monitor” chicken meat authenticity. *Food Control*, 112, 107149. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107149>.
- Patel, N., Toledo-Alvarado, H., & Bittante, G. (2021). Performance of different portable and hand-held near-infrared spectrometers for predicting beef composition and quality characteristics in the abattoir without meat sampling. *Meat Science*, 178, 108518. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2021.108518>
- Peyvasteh, M., Popov, A., Bykov, A., & Meglinski, I. (2020). Meat freshness revealed by visible to near-infrared spectroscopy and principal component analysis. *Journal Of Physics Communications*, 4(9), 095011. <https://doi.org/10.1088/2399-6528/abb322>
- Prieto N, Roehe R, Lavin P, Batten G, Andres S (2009) Application of near infrared reflectance spectroscopy to predict meat and meat products quality: a review. *Meat Sci* 83:175–186. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2009.04.016>
- Prieto, N., Pawluczyk, O., Dugan, M. E. R., & Aalhus, J. L. (2017). A Review of the Principles and Applications of Near-Infrared Spectroscopy to Characterize Meat, Fat, and Meat Products. *Applied Spectroscopy*, 71(7), 1403-1426. <https://doi.org/10.1177/0003702817709299>
- Pérez-Alonso, C., Escuredo, O., & Meurens, M. (2018). Near-infrared spectroscopy for meat quality assessment: A review. *Meat Science*, 137, 101-113. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2017.11.006>
- Revilla, I., Vivar-Quintana, A. M., González-Martín, M. I., Hernández-Jiménez, M., Martínez-Martín, I., & Hernández-Ramos, P. (2020). NIR Spectroscopy for Discriminating and Predicting the Sensory Profile of Dry-Cured Beef “Cecina”. *Sensors*, 20(23), 6892. <https://doi.org/10.3390/s20236892>
- Ripoll, G., Lobón, S., & Joy, M. (2018). Use of visible and near infrared reflectance spectra to predict lipid peroxidation of light lamb meat and discriminate dam’s feeding systems. *Meat Science*, 143, 24-29. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2018.04.006>
- Roberts, J. J., Motin, J. C., Swain, D., & Cozzolino, D. (2017). A Feasibility Study on the Potential Use of Near Infrared Reflectance Spectroscopy to Analyze Meat in Live Animals: Discrimination of Muscles. *Journal Of Spectroscopy*, 2017, 1-7. <https://doi.org/10.1155/2017/3948708>
- Rodríguez-Estévez, V., & Lourdes, A. J. (2023). Resolución de problemas del ámbito de la Producción Animal mediante el uso de -espectrometría de movilidad iónica y espectroscopía de infrarrojo cercano. <https://helvia.uco.es/handle/10396/26418>
- Savoia, S., Albera, A., Brugiapaglia, A., Di Stasio, L., Cecchinato, A., & Bittante, G. (2021). Prediction of

- meat quality traits in the abattoir using portable near-infrared spectrometers: heritability of predicted traits and genetic correlations with laboratory-measured traits. *Journal Of Animal Science and Biotechnology/Journal of Animal Science and Biotechnology*, 12(1). <https://doi.org/10.1186/s40104-021-00555-5>
- Savoia, S., Albera, A., Brugiapaglia, A., Di Stasio, L., Ferragina, A., Cecchinato, A., & Bittante, G. (2020). Prediction of meat quality traits in the abattoir using portable and hand-held near-infrared spectrometers. *Meat Science*, 161, 108017. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2019.108017>
- Serrano-Niño, J. C., Vega-Granados, F., & Pérez-Alonso, C. (2016). Near-infrared spectroscopy for food fraud detection: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 51, 114-125. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.01.003>
- Shi, T., Gao, Y., Song, J., Ao, M., Hu, X., Yang, W., ... & Feng, H. (2024). Using VIS-NIR hyperspectral imaging and deep learning for non-destructive high-throughput quantification and visualization of nutrients in wheat grains. *Food Chemistry*. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.140651>
- Stewart, S. M., Corlett, M. T., Gardner, G. E., Ura, A., Nishiyama, K., Shibuya, T., ... & Furuya, A. (2024). Validation of a handheld near-infrared spectrophotometer for measurement of chemical intramuscular fat in Australian lamb. *Meat science*, 214. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2024.109517>
- 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*. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2024.101203>
- Tejasree, G., & Agilandeeswari, L. (2024). An extensive review of hyperspectral image classification and prediction: techniques and challenges. *Multimedia Tools and Applications*, 1-98. <https://doi.org/10.1007/s11042-024-18562-9>
- Veloso Trópia, N., Reis Vilela, R. S., de Sales Silva, F. A., Andrade, D. R., Costa, A. C., Cidrini, F. A. A., ... & Filho, S. D. C. V. (2024). Regression models from portable NIR spectra for predicting the carcass traits and meat quality of beef cattle. *Plos one*, 19(5). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0303946>
- Wang, J., Fan, L., Wang, H., Zhao, P., Li, H., Wang, Z., & Huang, L. (2017). Determination of the moisture content of fresh meat using visible and near infrared spatially resolved reflectance spectroscopy. *Biosystems Engineering*, 162, 40-56. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.07.004>
- Wang, W., Peng, Y., Sun, H., Zheng, X., & Wei, W. (2018). Spectral Detection Techniques for Non-Destructively Monitoring the Quality, Safety, and Classification of Fresh Red Meat. *Food Analytical Methods*, 11(10), 2707-2730. <https://doi.org/10.1007/s12161-018-1256-4>
- Wold, J. P., & Løvland, A. (2020). NIR Spectroscopic Techniques for Quality and Process Control in the Meat Industry. *Meat And Muscle Biology*, 4(2). <https://doi.org/10.22175/mmb.10020>
- Wold, J. P., O'Farrell, M., Tschudi, J., & Lorentzen, G. (2024). Rapid and non-destructive quantification of meat content in the legs of live red king crab (*Camtschaticus paralithodes*) by near-infrared spectroscopy. *LWT*, 201. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.116246>
- Zhong, K., Li, Y., Hu, X., Li, Y., Tang, L., Sun, X., ... & Li, J. (2024). A colorimetric and NIR fluorescent probe for ultrafast detecting bisulfite and organic amines and its applications in food, imaging, and monitoring fish freshness. *Food Chemistry*. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137987>