

Uso potencial de un equipo portátil NIR para el control de la trazabilidad del jamón Ibérico en el marco de la Norma de Calidad

Potential use of portable NIR device for traceability control of Iberian ham within the framework of the Quality Standard

Lucía León, Alberto Ortiz* y David Tejerina

Área de Calidad de Carne. Centro de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de Extremadura (CICYTEX-La Orden). Junta de Extremadura, Ctra A-V, Km 272, 06187 Guadajira, Badajoz.

RESUMEN

El presente estudio tuvo como finalidad evaluar la capacidad de la Espectroscopía de Reflectancia en el Infrarrojo Cercano combinada con el algoritmo de mínimos cuadrados parciales (PLS-DA) para clasificar el jamón ibérico envasado al vacío según las categorías comerciales contempladas en la Norma de Calidad del Ibérico (*Negra, Roja, Verde y Blanca*). Para ello, se utilizaron 290 envases (60 pertenecientes a las categorías *Roja, Verde y Blanca* y 110 pertenecientes a la etiqueta *Negra*) y se tomó un espectro por envase con el equipo portátil MicroNIR™ 1700 OnSite-W mediante contacto directo de éste con la superficie del envase sin abrir, es decir, de forma no destructiva. El modelo predictivo alcanzó coeficientes de determinación en validación cruzada comprendidos entre 0,56 y 0,78, clasificando correctamente el 78 % de las muestras en validación externa, a pesar de que la Etiqueta *Verde* presentó una baja sensibilidad (16,67 %). Los resultados sugieren por tanto la capacidad de esta tecnología para trazar la categoría comercial a la que pertenece el jamón Ibérico, especialmente para las categorías distintas a la *Verde*.

Palabras clave: trazabilidad, PLS-DA, montanera, etiqueta *Verde*.

ABSTRACT

The purpose of this study was to evaluate the ability of near-infrared reflectance spectroscopy combined with the partial least squares algorithm (PLS-DA) to classify vacuum-packed Iberian ham according to the commercial categories established in the Iberian Quality Standard (*Black, Red, Green, and White*). To this end, 290 packages were used (60 belonging to the *Red, Green, and White* categories and 110 pertaining to the *Black* category), and one spectrum per package was taken with the MicroNIR™ 1700 OnSite-W portable device, by placing it in direct contact with the surface of the unopened package, i.e., in a non-destructive manner. The predictive model achieved coefficients of determination in cross-validation from 0.56 to 0.78, classifying the 78 % of the samples correctly in external validation. Even the *Green* category showed low sensitivity (16.67 %). Therefore, the results suggest the ability of this technology to trace the commercial category to which Iberian ham pertains, especially for other categories than Green.

Keywords: traceability, PLS-DA, montanera, *green* commercial category.

*Autor para correspondencia: alberto.ortiz@juntaex.es

Recibido: 10/09/2025 Aceptado: 18/12/2025 1ª publicación online: 19/03/2026 Publicación en Vol.: 19/03/2026

Cita del artículo: León L., Ortiz A., Tejerina D. (2026). Uso potencial de un equipo portátil NIR para el control de la trazabilidad del jamón Ibérico en el marco de la Norma de Calidad. ITEA-Información Técnica Económica Agraria 122(1): 37-48. <https://doi.org/10.12706/itea.2025.016>.



Copyright: © 2026 de los autores. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY NC SA 4.0)

INTRODUCCIÓN

La Norma de Calidad del Ibérico (Real Decreto 4/2014), establece los requisitos mínimos a nivel productivo e industrial para que los productos puedan acogerse a cada una de las categorías, con el fin de garantizar su homogeneidad y autenticidad dentro de cada una de ellas. Concretamente, la norma contempla cuatro categorías comercialmente etiquetadas con diferentes colores para los productos procedentes de la canal que se comercializan en fresco, así como para el jamón, paleta y lomo curado. Las etiquetas *Negra* y *Roja* engloban a los productos procedentes de los animales de raza Pura Ibérica y entre 50 % y 75 % de raza Ibérica, respectivamente, ambos engordados en el sistema de Montanera, a base de bellota y pasto. La etiqueta *Verde* recoge los productos de animales de al menos 50 % de raza Ibérica criados en explotaciones extensivas o intensivas al aire libre y alimentados a base de pienso sin perjuicio del aprovechamiento de bellota y pasto. Mientras que, la etiqueta *Blanca* recoge los productos procedentes de animales de al menos 50 % de raza Ibérica alimentados exclusivamente a base de pienso y criados en sistemas intensivos.

Las distintas calidades y costes de producción asociados a cada categoría hacen necesario un control de la trazabilidad, especialmente cuando los productos se presentan en formatos loncheados y envasados, ya que no disponen del marchamo como garantía de esta categoría comercial que sí se puede encontrar en piezas enteras. En este contexto, varios estudios han evaluado el potencial de la tecnología espectroscópica en el infrarrojo cercano, por sus siglas en inglés conocida como tecnología NIRS para desarrollar modelos de clasificación de categorías comerciales en productos ibéricos, como el lomo curado (Tejerina et al., 2021) y embutidos como salchichón (Ortiz et al., 2021a) o chorizo (Ortiz et al., 2021b), en formato loncheado y envasado bajo condiciones de atmósfera modificada. Estos trabajos han mostrado un alto poder discriminante, aunque ninguno incluyó la Etiqueta *Verde*, debido a la elevada variabilidad asociada a esta categoría, originada por la falta de uniformidad en los factores productivos de los animales de los que proceden las piezas (Real Decreto 4/2014). Hasta la fecha, únicamente Ortiz et al. (2022a) abordaron esta etiqueta en la clasificación del lomito de acuerdo con las categorías comerciales de la carne fresca (músculo *serratus ventralis*) utilizada para su elaboración, ya que al igual que ocurre con el caso de los embutidos, el lomito ibérico no está amparado por el actual marco normativo del Ibérico, lo que impide hablar de categorías comerciales en su versión curada. Ante esta situación, se requieren estudios que incorporen la Etiqueta *Verde* para avanzar hacia una trazabilidad integral dentro del marco normativo vigente. Asimismo, resultaría de gran interés evaluar el potencial de la tecnología NIRS como técnica rápida, no destructiva y aplicable en la industria para la clasificación del jamón ibérico, dado que se trata del producto de mayor valor económico y con mayor relevancia estratégica para el sector, aunque también el que plantea mayores desafíos tecnológicos debido a su complejidad estructural y composicional derivada de la presencia de varios músculos con características diferenciadas, lo que podría afectar a la robustez de los modelos predictivos.

En este contexto, el presente estudio tuvo como finalidad estudiar la viabilidad de la tecnología NIRS para la clasificación del jamón ibérico atendiendo a las categorías comerciales definidas en la vigente Norma de Calidad (*Negra*, *Roja*, *Verde* y *Blanca*), a partir de la información espectral obtenida en el envase sin abrir, es decir, de forma no destructiva. Para llevar a cabo este objetivo, se planteó la utilización del dispositivo portátil MicroNIR™ 1700 OnSite-W, por su facilidad de uso y potencial aplicabilidad.

MATERIAL Y MÉTODOS

Obtención de muestras de jamón ibérico y diseño experimental

Para llevar a cabo el presente estudio se utilizaron 290 muestras correspondientes a envases comerciales de jamón ibérico loncheado y envasado al vacío, adquiridos directamente en el mercado (film de polietileno (PE) laminado con una permeabilidad al oxígeno de $9,3 \text{ cm}^3 \text{ O}_2/\text{m}^2/24 \text{ h a } 4 \text{ }^\circ\text{C}$) en formatos de 100 g. Para recoger la variabilidad propia de este producto derivada de las variaciones tanto a nivel productivo como debidas al proceso tecnológico de curación, se utilizaron jamones procedentes de distintas empresas.

Concretamente, se emplearon 110 envases de jamón Etiqueta *Negra* (Real Decreto 4/2014). De estos 110 envases, 20 de ellos pertenecían a D.O.P. "Dehesa de Extremadura." (Pliego de Condiciones D.O.P. Dehesa Extremadura, 2022), 20 envases pertenecían a la D.O.P. "Los Pedroches" (Pliego de condiciones D.O.P. Los Pedroches, 2023), 20 envases pertenecían a la D.O.P. "Guijuelo" (Pliego de condiciones D.O.P. Guijuelo, 2017), otros 20 a la D.O.P. "Jabugo" (Pliego de condiciones D.O.P. Jabugo, 2022) y los 30 envases restantes pertenecían a la etiqueta *Negra* sin estar acogidos a las D.O.P anteriores. Los envases pertenecientes a esta categoría procedían de las empresas: Centeno Paz, Montanera Real, Barón de ley, Alta Expresión, Don Eusebio y MICSA. Con respecto al resto de etiquetas, 60 envases pertenecían a la Etiqueta *Roja* (Real Decreto 4/2014) procedente de tres empresas: Jabu Jabugo, Centeno Paz y Don Ibérico. 60 envases pertenecientes a la Etiqueta *Verde* (Real Decreto 4/2014) procedente de tres empresas: Centeno Paz, Capa *Negra* y Montesano, y por último. Los 60 envases restantes pertenecían a la Etiqueta *Blanca* (Real Decreto 4/2014) procedente de las empresas: Marcos, Maestro Paz y Monteibérico.

Información espectral

Para cada muestra (envase) se registró un espectro NIR, obtenido como promedio de 500 espectros, empleando el prototipo MicroNIR™ 1700 OnSite-W (VIAMI Solutions, Inc., San Jose, California, EE. UU.), el cual posee una ventana de lectura de 215 mm^2 y un rango operativo que abarca desde 908,1 a 1676,2 nm, con un tiempo de integración de 10 ms y una resolución espectral $<1,25 \%$ de la longitud de onda central. La adquisición de los espectros fue llevada a cabo manualmente, desplazando el equipo en un patrón de zigzag sobre la superficie del envase sin abrir (de forma no destructiva) para capturar la mayor variabilidad posible y, así, reducir el error de muestreo al mínimo. Los datos espectrales se registraron en Absorbancia ($\text{Log}(1/R)$, siendo R la reflectancia). Previo a la adquisición de la información espectral de las muestras, se calibró el equipo con la referencia oscura, realizando una medida a un punto fijo de la sala. Por otra parte, dado que el objetivo de este estudio era desarrollar modelos predictivos sin abrir los envases, la calibración con el patrón con un 99 % de reflectancia se realizó cubriendo la placa de cerámica (Spectralon™) con el mismo material film laminado utilizado en el envase del producto. Tanto la calibración del prototipo como el registro de datos se realizaron mediante el software MicroNir Pro v2.2 (VIAMI Solutions, Inc., San Jose, California, EE. UU.).

Por último, los datos espectrales, se exportaron desde el software MicroNIR Pro v2.2 al programa Unscrambler X v10.5 (CAMO®, Trondheim, Noruega) para su procesamiento posterior.

Desarrollo de modelos cualitativos

El conjunto de muestras fue dividido de forma manual en un conjunto de calibración con el objetivo de construir el modelo (70 % de las muestras) y un conjunto de validación destinado a validar el modelo con el 30 % restante de las muestras. En cada uno de los conjuntos existían muestras pertenecientes a todas las categorías en proporciones similares (Tabla 1).

Tabla 1. Distribución del número de muestras de jamón ibérico envasado al vacío según su clasificación comercial y conjuntos utilizados para calibrar y validar los modelos cualitativos.

Table 1. Distribution of the number of vacuum-packed Iberian ham samples according to their commercial classification and the sets used to calibrate and validate the qualitative models.

| Categoría comercial | D.O.P. | Calibración | Validación externa | Total |
|---------------------|-----------------------|-------------|--------------------|-------|
| <i>Negra</i> | Dehesa de Extremadura | 14 | 6 | 20 |
| | Guijuelo | 14 | 6 | 20 |
| | Jabugo | 14 | 6 | 20 |
| | Los Pedroches | 14 | 6 | 20 |
| | No D.O.P. | 21 | 9 | 30 |
| <i>Roja</i> | | 42 | 18 | 60 |
| <i>Verde</i> | | 42 | 18 | 60 |
| <i>Blanca</i> | | 42 | 18 | 60 |
| Total | | 203 | 87 | 290 |

El modelo predictivo se abordó mediante el método supervisado de mínimos cuadrados parciales, conocido por sus siglas en inglés como PLS-DA. Este método relaciona las variaciones espectrales con las clases predefinidas con el objetivo de maximizar la covarianza entre estas clases. La base teórica del modelo está ampliamente descrita por Ortiz *et al.* (2022b). El modelo fue desarrollado en el rango espectral completo cubierto por el equipo —de 908,1 a 1676,2 nm— y sobre distintos preprocesamientos de la información espectral. Concretamente, se utilizaron los datos en bruto (absorbancia), así como la Variable Normal Estándar (SNV) en combinación con Desviación de la tendencia (DE) para la corrección de fenómenos dispersivos (Barnes *et al.*, 1989) y una derivada de primer orden con 4 puntos de suavizado núcleo simétrico, y primer orden polinómico (1,4,4,1) de Savitzky-Golay como tratamiento matemático (Savitzky y Golay, 1964).

Durante el desarrollo de los modelos, se descartaron los valores atípicos —outliers— detectados mediante la representación espectral en un diagrama de puntuaciones bidimensional (2-D score plot) del modelo PLS-DA. Se consideraron fuera de rango aquellos con un apalancamiento (medida de la influencia de un punto sobre el modelo) mayor a tres veces el apalancamiento promedio (Faber, 1999).

El mejor modelo fue seleccionado considerando el valor más alto del coeficiente de determinación de la validación cruzada (1-VR), el menor número de variables latentes (LVs) y un menor nivel de preprocesamiento de la información espectral. Posteriormente, el modelo se-

leccionado fue validado mediante el conjunto de muestras de validación. Esta validación externa fue evaluada con los siguientes estadísticos:

- Sensibilidad (SE): entendida como porcentaje de muestras pertenecientes a una categoría específica que el modelo clasifica correctamente dentro de dicha categoría y obtenida mediante la siguiente fórmula a (Oliveri et al., 2018):

$$SE (\%) = \frac{VP}{VP + FN} \quad [1]$$

- Especificidad (SP): definida como la proporción de muestras que no pertenecen a la categoría objetivo y que el modelo rechaza correctamente (Oliveri et al., 2018):

$$SP (\%) = \frac{VN}{VN + FP} \quad [2]$$

- Precisión de la clasificación (Oliveri et al., 2018):

$$\text{Precisión (\%)} = \frac{VN + VP}{VN + VP + FN + FP} \quad [3]$$

- Coeficiente de correlación de Matthews (MCC), para el cual, un valor de 1 indica una predicción perfecta; -1 representa un desacuerdo total entre la predicción y los valores reales; y 0 significa "no mejor que una predicción aleatoria" (Matthews, 1975). Este estadístico es adecuado para valorar el rendimiento del modelo cuando el número de muestras en las distintas clases no es el mismo, como es el caso del presente estudio, ya que su rendimiento queda ligado a los resultados en todas las categorías (Boughorbel et al., 2017; Cáceres-Nevado et al., 2021):

$$MCC = \frac{(VP \times VN - FP \times FN)}{\sqrt{(VP + FN)(VP + FP)(VN + FN)(VN + FP)}} \quad [4]$$

donde VP = verdaderos positivos, VN = verdaderos negativos, FP = falsos positivos y FN = falsos negativos obtenidos en validación

Los modelos PLS-DA desarrollados son modelos globales, construidos simultáneamente con las cuatro categorías comerciales (*Negra, Roja, Verde y Blanca*). No obstante, cada categoría se modela y evalúa de forma independiente (clase objetivo = 1; resto = 0). Por este motivo, los estadísticos en validación cruzada de 1-VR y RMSECV así como la sensibilidad y especificidad en validación externa se calculan individualmente para cada clase, mientras que la precisión y el coeficiente MCC se presentan como métricas del rendimiento global del modelo, ya que son indicadores que integran simultáneamente la clasificación de todas las categorías.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Información espectral

La **Figura 1** muestra los espectros promedio, en absorbancia, correspondientes al conjunto de muestras utilizadas para el desarrollo de los modelos predictivos —conjunto de calibración—, según las distintas categorías comerciales. Los espectros promedio obtenidos en este estudio mostraron valores de absorbancia y morfología similares a otros productos curados, como los reportados por Tejerina *et al.* (2021) para lomo ibérico. Por otra parte, los espectros mostraron una morfología similar para las distintas categorías comerciales, aunque con pequeñas variaciones en la intensidad de absorbancia, si bien el espectro promedio perteneciente a la Etiqueta *Blanca* tuvo un leve cambio de tendencia en torno a los 1100 nm, lo que condujo a que se cruzase con el espectro promedio de la Etiqueta *Roja*, para situarse entre éste y el espectro promedio de la Etiqueta *Verde*. Es decir, la Etiqueta *Blanca* refleja una tendencia distinta al resto, lo que podría reflejar la mayor distancia de esta al resto de etiquetas, ya que elimina cualquier grado de extensividad y de aprovechamiento de recursos naturales, vinculando el engorde de los animales de los que proceden sus productos únicamente al sistema intensivo y a la alimentación con pienso comercial.

Los mayores picos de absorción con independencia de la categoría comercial tuvieron lugar alrededor de los 1200 nm y 1400 nm.

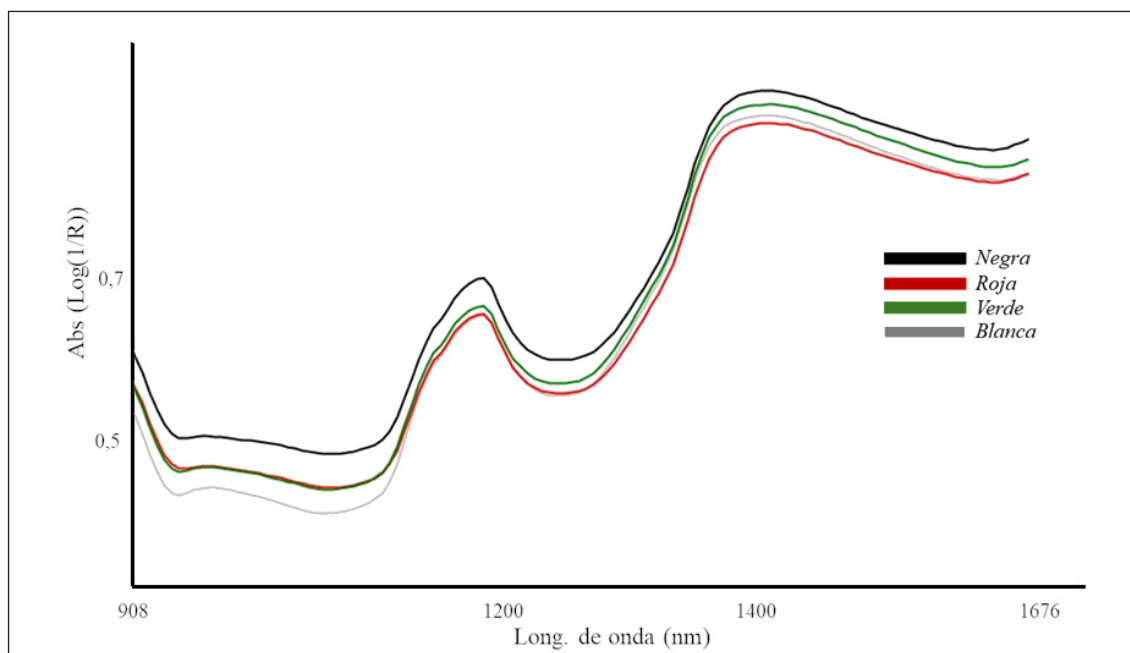


Figura 1. Promedios de los espectros NIR (Absorbancia) del set de calibración del jamón ibérico envasado al vacío, según su clasificación comercial.

Figure 1. Averages of the NIR spectra (Absorbance) from the calibration set of vacuum-packed Iberian ham, grouped by commercial classification.

Desarrollo y validación del modelo predictivo

Los resultados de los modelos predictivos de la clasificación comercial del jamón ibérico de acuerdo con los distintos pre-tratamientos se muestran en la Tabla M1 del material complementario, mientras que el modelo predictivo finalista junto con los resultados de la validación externa se recoge en la [Tabla 2](#).

Tabla 2. Valores estadísticos del modelo de mayor rendimiento obtenido mediante PLS-DA y de su validación externa para diferenciar el jamón ibérico envasado al vacío según su clasificación comercial. **Table 2.** Statistical values of the highest-performing model obtained by means of PLS-DA and results of its external validation for differentiating vacuum-packed Iberian ham according to its commercial classification.

| Categoría comercial | Pre-tratamiento | Variables latentes | Validación cruzada | | | Validación externa | | | | |
|---------------------|-----------------|--------------------|--------------------|------|--------|--------------------|--------|--------|---------------|------|
| | | | n | 1-VR | RMSECV | n | SE (%) | SP (%) | Precisión (%) | MCC |
| Negra | | | | 0,72 | 0,257 | | 66,67 | 75,93 | | |
| Roja | | | | 0,61 | 0,257 | | 94,44 | 73,91 | | |
| Verde | Abs | 19 | 190 | 0,56 | 0,270 | 87 | 16,67 | 88,06 | 78,03 | 0,46 |
| Blanca | | | | 0,78 | 0,188 | | 100,00 | 85,51 | | |

n: número de muestras; 1-VR: coeficiente de determinación en validación cruzada; RMSECV: error cuadrático medio tras la validación cruzada; SE: sensibilidad; SP: especificidad; MCC: coeficiente de correlación de Mathews.

El mejor modelo predictivo fue obtenido con los datos en bruto, es decir, utilizando los datos de absorbancia, si bien la utilización de pre-tratamientos para la corrección de fenómenos dispersivos y el tratamiento matemático no supuso una mejora significativa en el rendimiento del modelo (Tabla M1, material complementario). Concretamente, el modelo PLS-DA finalista alcanzó coeficientes de determinación comprendidos entre 0,56 y 0,78 y RMSECV entre 0,188 y 0,270; siendo el valor más bajo de 1-VR (0,56) correspondiente a la categoría *Verde*, indicativo de una capacidad de predicción limitada para esta categoría, mientras que, para el resto, la capacidad de clasificación fue adecuada. El desempeño clasificatorio del modelo también se evidenció en el gráfico bidimensional a partir de las dos primeras variables latentes (2-D score plot) del modelo PLS-DA, donde se observaron agrupamientos diferenciados. Este explicó más del 95 % de la variabilidad de la información espectral, y la separación más marcada correspondió a las categorías etiqueta *Negra* y *Roja* frente a la *Blanca*, situándose la Etiqueta *Verde* en una posición intermedia ([Figura 2](#)).

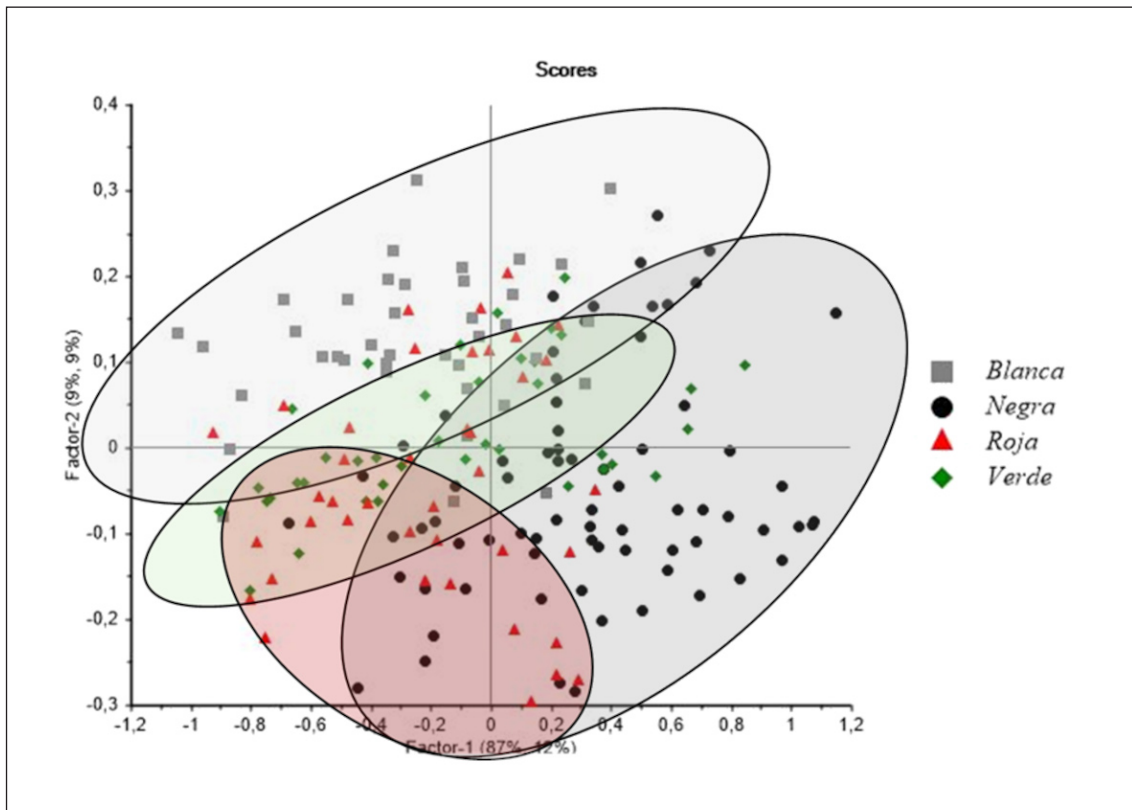


Figura 2. Diagrama de dispersión bidimensional obtenido a partir del modelo PLS-DA de las puntuaciones de las muestras de jamón ibérico envasado al vacío del set de calibración, según su clasificación comercial.

Figure 2. 2-D scatter plot from PLS-DA model of the scores of vacuum-packed Iberian ham grouped by commercial classification.

La capacidad del modelo para discriminar el jamón ibérico según su clasificación comercial podría atribuirse a las variaciones en la composición nutricional entre las distintas categorías (Contador *et al.*, 2021; Ramírez *et al.*, 2021), debidas a la influencia del sistema productivo al que los animales están sujetos, especialmente, en el perfil lipídico y contenido en antioxidantes (Tejerina *et al.*, 2012). De hecho, las bandas que obtuvieron un mayor peso en el modelo fueron, en términos generales, las longitudes alrededor de los 940 nm, de los 1200 nm y los 1400 nm, que mostraron los coeficientes de regresión más altos (Figura 3). Estas longitudes han sido relacionadas previamente con enlaces Carbono-Hidrógeno (Murray y Williams, 1987; Barbin *et al.*, 2014), que constituyen la base estructural de las cadenas hidrocarbonadas de los ácidos grasos, así como de compuestos antioxidantes. Estos resultados estarían en consonancia con Pérez-Marín *et al.* (2021), los cuales se basaron en bandas de absorción específicas de los enlaces carbono-hidrógeno para diferenciar canales de cerdo ibérico según su régimen alimenticio (bellota vs. pienso).

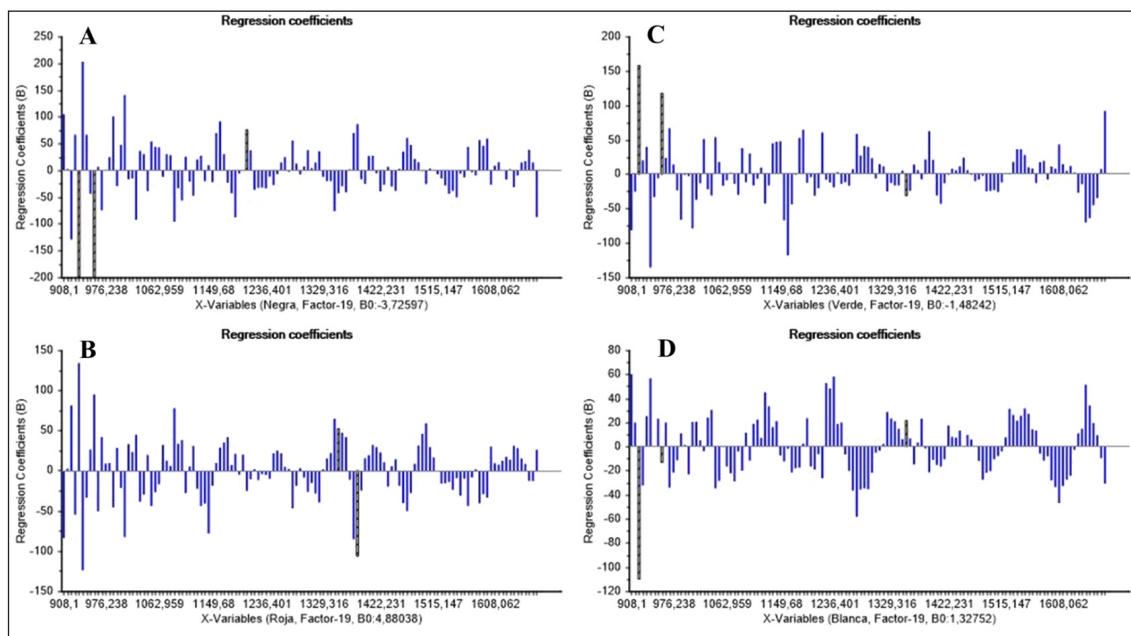


Figura 3. Representación gráfica de los coeficientes de regresión obtenidos del análisis PLS-DA del jamón ibérico envasado al vacío según su clasificación comercial (A: Negra; B: Roja; C: Verde y D: Blanca). **Figure 3.** Graphical representation of regression coefficients off from PLS-DA analysis of vacuum-packed Iberian ham, grouped by commercial classification (A: Black; B: Red; C: Green and D: White).

En validación, el modelo clasificó correctamente el 78 % de las muestras de acuerdo con la clasificación comercial a la que pertenecían (*Negra*, *Roja*, *Verde* y *Blanca*). Sin embargo, cabe destacar el bajo valor de sensibilidad que se obtuvo para las muestras pertenecientes a la etiqueta *Verde* (16,67 %) con respecto al resto, que llegó hasta el 100 % en el caso de la etiqueta *Blanca*. De hecho, probablemente el bajo valor de SE para la Etiqueta *Verde* haya conducido al bajo valor en el índice MCC (Tabla 2; Boughorbel et al., 2017).

En cuanto a la literatura científica existente relacionada con el desarrollo de modelos predictivos en productos ibéricos para discriminar las diversas categorías comerciales recogidas en el marco normativo actual, la mayoría de los estudios excluyen la Etiqueta *Verde* (Ortiz et al., 2021a y 2021b; Tejerina et al., 2021). Esto es debido a la elevada variabilidad en la composición de los productos, atribuible a las diferencias en las condiciones de producción de los animales de origen contempladas en el actual marco normativo (Real Decreto 4/2014). Para nuestro conocimiento, tan solo Ortiz et al. (2022a) abordaron la viabilidad de la clasificación del lomo ibérico de acuerdo con todas las categorías comerciales (*Negra*, *Roja*, *Verde* y *Blanca*) de la carne fresca (músculo *serratus ventralis*) utilizada para su elaboración. En dicho estudio, a partir de espectros recogidos en la pieza entera, se alcanzó una precisión del 92,11 % en el conjunto de muestras de validación externa, mientras que este valor descendió hasta 79,23 % cuando el modelo se construyó a partir del producto envasado al vacío, lo que refleja un rendimiento ligeramente superior al obtenido en el presente estudio. Este

descenso en el poder de clasificación podría ser explicado a la heterogeneidad implícita del jamón ibérico, puesto que está compuesto por varios músculos (biceps femoris, semitendinosus y semimembranosus), en comparación con el lomo que procede de la curación de un único músculo (*serratus ventralis*).

Este estudio representa un desafío tecnológico y, al mismo tiempo, un avance significativo para el sector, en primer lugar, por la incorporación de la Etiqueta Verde, lo que implica abordar la complejidad asociada a la trazabilidad de una categoría caracterizada por una elevada heterogeneidad en las propiedades nutricionales de los productos que la integran. En segundo lugar, en este estudio se aborda la viabilidad en el control de la trazabilidad y por tanto la protección del valor añadido derivado de las diferentes condiciones de producción del jamón ibérico, producto amparado por la Norma de Calidad de mayor valor económico, lo que subraya la importancia de establecer mecanismos de verificación robustos y fiables.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en el presente estudio sugieren que la tecnología NIRS en combinación con el enfoque quimiométrico PLS-DA podría ser una herramienta viable para la clasificación individualizada del jamón ibérico en formato loncheado y envasado al vacío en función de las categorías comerciales establecidas en la Norma de Calidad. El modelo mostró un desempeño satisfactorio en la discriminación de las categorías Negra, Roja y Blanca, alcanzando valores de sensibilidad y especificidad que avalan su aplicabilidad potencial en entornos industriales. Sin embargo, el modelo obtuvo una baja sensibilidad para la Etiqueta Verde, lo que podría limitar la robustez del modelo predictivo. En conjunto, este trabajo constituye un avance en el control, de manera no destructiva, de la trazabilidad del jamón ibérico envasado al vacío. La inclusión de la Etiqueta Verde representa un paso decisivo hacia la implementación de modelos más completos y robustos, capaces de abarcar la totalidad de las categorías comerciales contempladas en la normativa vigente. Además, la utilización del instrumento NIR portátil (MicroNIR™ 1700 OnSite-W) podría favorecer su potencial aplicación práctica en entornos industriales.

DECLARACIÓN DE CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

- Lucía León: Análisis formal, redacción.
- Alberto Ortiz: Conceptualización, Análisis formal, Investigación, metodología, redacción.
- David Tejerina: Investigación, Administración del proyecto, Supervisión

AGRADECIMIENTOS

Este estudio se ha realizado en el marco del proyecto «Tecnologías avanzadas, innovadoras y digitales para el sector agroalimentario de la EUROACE (0100_TID4AGRO_4_E)», cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) a través del Programa INTERREG VI-A España-Portugal (POCTEP) 2021-2027 de la Comisión Europea. Lucía León agradece al Ministerio de Ciencia e Innovación la subvención PTA2021-021189-I.

MATERIAL COMPLEMENTARIO

El material complementario de este artículo se puede consultar en la URL <https://doi.org/10.12706/itea.2025.016>.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barbin D.F., Felicio A.L. de S.M., Sun D.W., Nixdorf S.L., Hirooka E.Y. (2014). Application of infrared spectral techniques on quality and compositional attributes of coffee: An overview. *Food Research International* 61(3): 23-32. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.01.005>.
- Barnes R.J., Dhanoa M.S., Lister S.J. (1989). Standard normal variate transformation and de-trending of near infrared diffuse reflectance spectra. *Applied Spectroscopy* 43: 772-777. <https://doi.org/10.1366/0003702894202201>.
- Boughorbel S., Jarray F., El-Anbari M. (2017). Optimal classifier for imbalanced data using Matthews Correlation Coefficient metric. *PLOS One* 12(6): e0177678. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0177678>.
- Cáceres-Nevado J.M., Garrido-Varo A., De Pedro-Sanz E., Tejerina-Barrado D., Pérez-Marín D.C. (2021). Non-destructive Near Infrared Spectroscopy for the labelling of frozen Iberian pork loins. *Meat Science* 175: 108440. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2021.108440>.
- Contador R., Ortiz A., Ramírez M.R., García-Torres S., López-Parra M.M., Tejerina D. (2021). Physico-chemical and sensory qualities of Iberian sliced dry-cured loins from various commercial categories and the effects of the type of packaging and refrigeration time. *LWT* 141: 110876. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.110876>.
- Faber K. (1999). A closer look at the bias-variance trade-off in multivariate calibration. *Journal of Chemometrics* 13(2): 185-192.
- Matthews B.W. (1975). Comparison of the predicted and observed secondary structure of T4 phage lysozyme. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Protein Structure* 405(2): 442-451. [https://doi.org/10.1016/0005-2795\(75\)90109-9](https://doi.org/10.1016/0005-2795(75)90109-9).
- Murray I., Willian P.C. (1987). Chemical principles of near-infrared technology. En: *Near Infrared technology in the Agricultural and Food Industries* (Eds. Williams P.C., Norris K.), St. Paul, Minnesota, USA: American Association of Cereal Chemists Inc.
- Oliveri P., Malegori C., Casale M. (2018). Chemometrics and Statistics - Multivariate Classification Techniques. En *Encyclopedia of Analytical Science Third Edition* (Ed. Worsfold P., Poole C., Townshend A., Miró M.) pp. 481-486. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409547-2.14239-8>.
- Ortiz A., León L., Contador R., Tejerina D. (2021a). Near-Infrared Spectroscopy (NIRS) as a tool for classification of pre-sliced Iberian salchichón, modified atmosphere packaged (MAP) According to the official commercial categories of raw meat. *Foods* 10(8): 1865. <https://doi.org/10.3390/foods10081865>.
- Ortiz A., León L., Contador R., Tejerina D. (2021b). Potencial use of Near Infrared Spectroscopy (NIRS) to categorise chorizo sausages from Iberian pigs according to several quality standards. *Applied Sciences* 11(23): 11379. <https://doi.org/10.3390/app112311379>.

- Ortiz A., Sánchez M., León L., Tejerina D. (2022a). Uso potencial de la Espectroscopia de Infrarrojo Cercano para la autenticación del lomo ibérico de acuerdo a las categorías definidas por la Norma de Calidad del ibérico. *ITEA-Información Técnica Económica Agraria* 119(2): 124-138. <https://doi.org/10.12706/itea.2022.011>.
- Ortiz A., Sánchez M., García-Torres S., León L., López-Parra M.M., Barraso C., Martín-Mateos M.J., Tejerina D. (2022b). Feasibility of near infrared spectroscopy to classify lamb hamburgers according to the presence and percentage of cherry as a natural ingredient. *Applied Food Research* 2(1): 100069. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2022.100069>.
- Pérez-Marín D., Fearn T., Riccioli C., De Pedro E., Garrido A. (2021). Probabilistic classification models for the in situ authentication of iberian pig carcasses using near infrared spectroscopy. *Talanta* 222: 121511. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2020.121511>.
- Pliego de Condiciones D.O.P. Dehesa Extremadura (2022). Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.
- Pliego de condiciones D.O.P. Guijuelo (2017). Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.
- Pliego de condiciones D.O.P. Jabugo (2022). Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.
- Pliego de Condiciones D.O.P. Los Pedroches (2023). Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.
- Ramírez R., Contador R., Ortiz A., García-Torres S., López-Parra M.M., Tejerina D. (2021). Effect of breed purity and rearing systems on the stability of sliced Iberian dry-cured ham stored in modified atmosphere and vacuum packaging. *Foods* 10(4): 730. <https://doi.org/10.3390/foods10040730>.
- Real Decreto 4/2014, de 10 de enero, por el que se aprueba la norma de calidad para la carne, el jamón, la paleta y la caña de lomo ibérico. *Boletín Oficial del Estado*, núm 10, de 11 de enero de 2014, pp. 1-16.
- Savitzky, A., Golay M.J.E. (1964). smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. *Analytical Chemistry* 36(8): 1627-1639. <https://doi.org/10.1021/ac60214a047>.
- Tejerina D., García-Torres S., Cabeza De Vaca M., Vázquez F.M., Cava R. (2012). Effect of production system on physical-chemical, antioxidant and fatty acids composition of Longissimus dorsi and Semiratus ventralis muscles from Iberian pig. *Food Chemistry* 133: 293-299. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.01.025>.
- Tejerina D., Contador R., Ortiz A. (2021). Near infrared spectroscopy (NIRS) as tool for classification into official commercial categories and shelf-life storage times of pre-sliced modified atmosphere packaged Iberian dry-cured loin. *Food Chemistry* 356: 129733. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129733>.