

# Uso potencial de la Espectroscopia de Infrarrojo Cercano para la autenticación del *lomito* ibérico de acuerdo a las categorías definidas por la Norma de Calidad del ibérico

Alberto Ortiz, Miriam Sánchez\*, Lucía León 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 372, 06187 Guadajira, Badajoz, España

## Resumen

El presente estudio evalúa la viabilidad de la tecnología espectroscópica de reflectancia en el infrarrojo cercano en combinación con el análisis discriminante de mínimos cuadrados parciales para la clasificación del *lomito* ibérico de acuerdo a las categorías comerciales (definidas por la combinación de pureza racial, sistema productivo y alimentación del animal), de la carne fresca (músculo *Serratus ventralis*) utilizada para su elaboración, recogidas en la actual Norma de Calidad del ibérico. La información espectral fue tomada en pieza entera curada con tripa, producto loncheado, y producto loncheado y envasado al vacío con un plástico de bajo gramaje sin abrir el envase. La mayor capacidad predictiva se consiguió con el modelo realizado a partir de los espectros recogidos en la pieza entera, que fue capaz de clasificar correctamente 92,11 % del conjunto de muestras pertenecientes a la validación externa. Este valor descendió hasta el 79,23 % para el modelo obtenido a partir del producto envasado. Estos resultados sugieren que la tecnología espectroscópica de reflectancia en el infrarrojo cercano podría ser utilizada para el control de la trazabilidad de las categorías comerciales en el *lomito* ibérico, incluso cuando el producto ha sido loncheado y envasado, sin necesidad de abrir el envase.

**Palabras clave:** *Serratus ventralis*, trazabilidad, clasificación, Norma de Calidad, NIRS, PLS-DA.

## Potential use of Near Infrared Spectroscopy for the Iberian dry-cured *lomito* authentication according to the categories defined by the Spanish Iberian Quality Standard

### Abstract

This study evaluates the feasibility of near-infrared reflectance spectroscopic technology in combination with Partial Least Squares Discriminant Analysis for the classification of Iberian dry-cured *lomito* according to the commercial categories (defined by a combination of genotype, production system and feeding regime), of the fresh meat (*Serratus ventralis* muscle) used for its production as compiled by the current Spanish Iberian Quality Standard. Spectra were obtained scanning the whole piece (with casing), the sliced product, and the sliced and vacuum-packed product with low grammage plastic without opening the package. The highest predictive ability was achieved from the whole piece model, which was able to correctly classify 92.11 % of external validation samples. This value dropped to 79.23 % when measuring on the

---

\* Autor para correspondencia: miriam.sanchezo@juntaex.es

Cita del artículo: Ortiz A, Sánchez M, León L, Tejerina D (2023). Uso potencial de la Espectroscopia de Infrarrojo Cercano para la autenticación del *lomito* 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>

sliced and vacuum packaged format. These results suggest the feasibility of near-infrared reflectance spectroscopic technology to control the traceability of commercial categories in Iberian dry-cured *lomo*, even when the product has been sliced and packaged, without the need to open the packaging.

**Keywords:** *Serratus ventralis*, traceability, classification, Quality Standard, NIRS, PLS-DA.

## Introducción

El sector del porcino ibérico goza de gran aceptación social y comercial a nivel nacional así como en otros mercados europeos (Pugliese y Sirtori, 2012) y de otros países tales como Japón y Estados Unidos (Lorido, 2016). Esto es reflejado en los datos de exportación de productos tales como jamones y paletas ibéricas, los cuales muestran un crecimiento de más del 140 % en los últimos diez años (ICEX, 2019), probablemente explicado por sus apreciadas cualidades organolépticas y nutricionales (Pugliese y Sirtori, 2012).

La carne y productos cárnicos procedentes de cerdos ibéricos producidos en régimen extensivo y alimentados a base de bellotas y hierba en la *dehesa*, lo que es conocido como *Montanera* alcanzan la máxima calidad (Díaz-Caro et al., 2019). Sin embargo, las limitaciones geográficas de la *dehesa* y estacionalidad de sus recursos naturales han llevado a una diversificación del sistema productivo de la raza ibérica hacia su intensificación y alimentación basada en piensos comerciales, para así satisfacer la creciente demanda de sus productos. Esta diversidad da lugar a diferencias en la calidad nutricional y sensorial de la carne (Tejerina et al., 2012) y productos cárnicos derivados (Contador et al., 2021; Ramírez et al., 2021) y, por tanto, a productos finales diferenciados. La actual Norma de Calidad del ibérico; 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 (BOE, 2014), entró en vigor en 2014 pretendiendo clarificar y dar transparencia al sector, así como proporcionar una percepción más sencilla de los pro-

ductos comercializados y sus diferentes estándares de calidad, agrupándolos bajo un nuevo sistema de etiquetado. Así, cuatro categorías son definidas en esta Norma; *Negra* (para productos procedentes de cerdos ibéricos puros terminados en *Montanera*), *Roja* (cerdos ibéricos cruzados con Duroc con porcentaje racial de entre 50 % y el 75 % ibérico, terminados en *Montanera*), *Verde* (cerdos con al menos 50 % de raza ibérica criados en sistemas extensivos o intensivos al aire libre y alimentados con piensos comerciales y/o bellotas y hierba) y *Blanca* (cerdos con al menos 50 % de raza ibérica criados en intensivos y alimentados exclusivamente con piensos comerciales).

Estudios recientes han demostrado la utilidad de los atributos de certificación de la actual Norma de Calidad establecida para los productos ibéricos en la percepción de los mismos por los consumidores (García-Gudiño et al., 2021). Esto, junto con los diferentes costes de producción de cada categoría comercial hace necesario que los esfuerzos actuales se centren en el control de la trazabilidad de la materia prima, y por tanto de la autenticidad del producto final a través de herramientas rápidas y no destructivas. Esto permitiría a las industrias implicadas optimizar el tiempo, la mano de obra y los recursos económicos necesarios para implantar los mayores niveles de control exigidos por los consumidores. En este sentido, la tecnología espectroscópica en el infrarrojo cercano, por sus siglas en inglés conocida como tecnología NIRS, ha obtenido buenos resultados en la clasificación de animales vivos, canales, y carne fresca (Horcada et al., 2020) de acuerdo a las categorías de calidad contempladas en

el actual marco normativo (BOE, 2014). Sin embargo, los estudios de viabilidad de esta tecnología para el control de la trazabilidad en producto curado son escasos. Recientemente, Tejerina et al. (2021a) estudiaron su capacidad para la clasificación del lomo ibérico curado en formato loncheado y envasado en atmósfera modificada. Futuros trabajos deben llevarse a cabo en otros formatos de envasado, que generen además un menor impacto ambiental, lo que podría ser conseguido utilizando plástico de bajo gramaje, y considerando otras formas de presentación del producto tales como pieza entera, donde para nuestro conocimiento no existen estudios científicos, así como en otros productos ibéricos.

El *lomito* ibérico es el nombre comercial por el que se conoce a la presa ibérica (músculo *Serratus ventralis*) tras su proceso tecnológico de curación, para el cual los estudios de calidad son muy escasos (Tejerina et al., 2021b), y que no está amparado por las anteriormente mencionadas categorías de calidad (BOE, 2014). La posibilidad de clasificar este producto de acuerdo a la categoría comercial del corte del que procede aportaría información sobre su dimensión de calidad, además de garantizar la trazabilidad del mismo, dando sentido al sistema de etiquetado. Además, podría sentar las bases para ser reconocido comercialmente como un producto clasificado y autenticado en futuros marcos normativos.

Así, el objetivo del presente estudio fue evaluar la capacidad de la tecnología NIRS para la clasificación del *lomito* ibérico de acuerdo a las varias categorías comerciales de la carne fresca utilizada para su elaboración recogidas en la actual Norma de Calidad del ibérico (*Negra*, *Roja*, *Verde* y *Blanca*), teniendo además en cuenta varias formas de presentación del producto y por tanto de toma de los espectros; pieza entera curada con tripa, producto loncheado, y producto loncheado y envasado al vacío con un plástico de bajo gramaje.

## Material y métodos

### *Obtención de lomito ibérico y diseño experimental*

Para realizar este estudio se partió de 88 *lomitos* ibéricos procedentes de los cortes comerciales de *presa* Ibérica (músculo *Serratus ventralis*) adquiridos en una industria cárnica del sector; Señorío de Montanera S.L., Badajoz, las cuales procedían de diferentes categorías comerciales: *Negra* (n = 24) (procedentes de cerdos de raza ibérica pura acabados en el sistema de *Montanera*, con un tiempo en *Montanera* de al menos 60 días, una edad al sacrificio de al menos 14 meses y un peso de la canal de al menos 108 kg), *Roja* (n = 24) (cerdos con un porcentaje de raza ibérica de entre el 50 % y 75 % acabados en *Montanera* con un tiempo en *Montanera* de al menos 60 días, una edad al sacrificio de al menos 14 meses y un peso de la canal de al menos 115 kg), *Verde* (n = 24) (cerdos con al menos 50 % de raza ibérica criados en sistemas extensivos o intensivos al aire libre y alimentados con piensos comerciales y/o bellotas y hierba, con una edad al sacrificio de al menos 12 meses y un peso de la canal de al menos 115 kg) y *Blanca* (n = 16) (cerdos con al menos 50 % de raza ibérica criados en intensivos y alimentados exclusivamente con piensos comerciales, con una edad al sacrificio de al menos 10 meses y un peso de la canal de al menos 115 kg) (Tabla 1) de acuerdo a la actual Norma de Calidad del ibérico (BOE, 2014). Las piezas cárnica de cada una de las categorías comerciales anteriormente mencionadas procedían de un mismo lote de animales y explotación.

El proceso tecnológico de curación fue llevado a cabo en la industria anteriormente citada, de acuerdo a las prácticas habituales del sector y similar para las cuatro categorías comerciales; los cortes de *presa* ibérica se condimentaron con una mezcla de sal (2,5 %), especias, conser-

Tabla 1. Distribución de muestras del *lomito* ibérico de acuerdo a la forma de presentación del producto y categorías comerciales de la carne fresca utilizada para su elaboración (músculo *Serratus ventralis*).  
 Table 1. Distribution of samples of Iberian lomito according to the format of the product and commercial categories of the fresh meat used for its manufacture (*Serratus ventralis* muscle).

Formato producto	Total de muestras		Categoría comercial															
			Negra				Roja				Verde				Blanca			
	n	Cal.	n	Cal.	Val.	n	Cal.	Val.	n	Cal.	Val.	n	Cal.	Val.	n	Cal.		
Pieza entera con piel	88	69	19	24	19	5	24	19	5	24	19	5	24	19	5	16	12	4
Loncheado sin envase	184	147	37	44	35	9	50	40	10	50	40	10	50	40	10	40	32	8
Loncheado con envase	184	147	37	44	35	9	50	40	10	50	40	10	50	40	10	40	32	8

n = número de muestras; Cal. = Calibración; Val. = Validación.

vantes y estabilizadores autorizados (0,9 %); E-250 (nitrito de sodio), E-252 (nitrato de potasio), y E-320 (Butilhidroxianisol), E-321 (Butilhidroxitoluol) y E-301 (ascorbato de sodio). Posteriormente se almacenaron a 4 °C durante 48 h en oscuridad para que la mezcla de condimentos penetrara en la carne. Seguidamente se embutieron en tripas de colágeno de 10 cm de diámetro y se sometieron al proceso tecnológico de curación que consistió en dos etapas; durante los primeros 30 días se mantuvieron a 4 °C y una humedad relativa superior al 75 %, mientras que el resto del tiempo la temperatura se incrementó progresivamente de 10 °C a 16 °C y la humedad relativa osciló entre el 60 % y el 65 %. La duración total del proceso fue de 64 días. El peso medio fue de 280,62 ± 47,97; 307,93 ± 31,84; 331,50 ± 23,31 y 334,15 ± 42,49 para los *lomitos* curados procedentes de las presas de las categorías *Negra*, *Roja*, *Verde* y *Blanca*, respectivamente.

A continuación, los *lomitos* fueron loncheados en lonchas de 1 mm de grosor (EDENOX Tipo CGSP-300/2017), distribuidas homogéneamente por categoría en bandejas de 100 g y envasados al vacío (EGARVAC, mod. MAXI. Vacarisse-Barcelona, España), utilizando film de polietileno (PE) laminado (permeabilidad al O<sub>2</sub>, 9,3 ml O<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>/24 h a 4 °C) de bajo gramaje; 46 g/m<sup>2</sup> (Cryovac® ©Sealed Air 2018 – ®™ ODP4005 BAG). Un total de 184 envases fueron obtenidos (*Negra*, n = 44; *Roja*, n = 50; *Verde*, n = 50 y *Blanca*, n = 40) (Tabla 1).

### Adquisición de datos espectrales

Los espectros NIRS se tomaron con el espectrofotómetro LabSpec 2500 (ASD Inc., EE.UU.) equipado con una sonda de contacto de fibra óptica ASD (diámetro de ventana de 21 mm), en varias formas de presentación del producto; pieza entera curada con tripa, producto loncheado y producto loncheado y en-

vasado al vacío con un plástico de bajo gramaje (Figura 1). Para el caso de pieza entera, el instrumento se calibró tomando un espectro de referencia sobre una placa de cerámica cubierta con la misma tripa con la que los *lomitos* fueron embuchados como referencia (blanco) antes de la adquisición de los espectros. De igual forma, para la toma de los espectros en el producto loncheado y envasado, la placa de cerámica fue cubierta con el mismo plástico que el utilizado para el

envase, ya que en este caso el objetivo fue predecir la categoría comercial en envase sin abrir. En cambio, para la toma de los espectros en el loncheado sin envasar, el blanco fue realizado directamente sobre la placa de cerámica. Se adquirió un espectro (que fue una media de 50 scans) en el rango de 1000 nm a 1800 nm (resolución espectral de 1 nm) por muestra mediante contacto directo de la sonda de fibra óptica ASD con la muestra (Figura 1) (pieza entera curada con tripa,

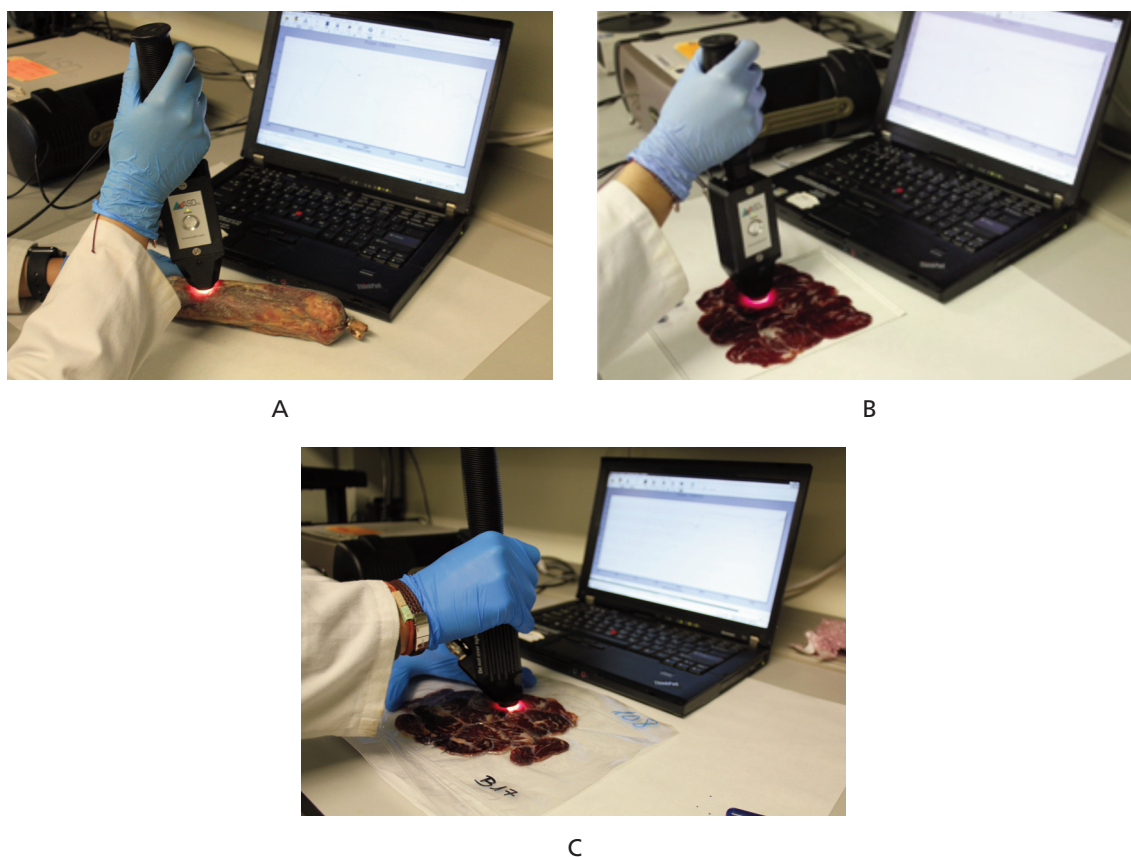


Figura 1. Toma de espectro NIR con el instrumento Labspec 2500 (ASD Inc., EE.UU) equipado con fibra óptica de contacto ASD (21 mm de diámetro) en pieza entera con tripa (A), producto loncheado (B) y producto loncheado y envasado al vacío en plástico de bajo gramaje (C).

Figure 1. NIR spectra acquisition using the Labspec 2500 instrument (ASD Inc., EE.UU) equipped with ASD contact fibre optics (21 mm diameter) on whole piece with casing (A), sliced product (B) and sliced and vacuum-packed product with low grammage plastic (C).

producto loncheado o producto loncheado y envasado al vacío con un plástico de bajo gramaje). Dicho rango es donde se encuentra la información más útil (mayor relación señal/ruido), tal y como señalan otros estudios en productos cárnicos similares realizados con el mismo espectrofotómetro (Ortiz et al., 2021a; Tejerina et al., 2021a) o con otro equipo como el MicroNIR™ 1700 (Cáceres-Nevado et al., 2021). Para el caso de la pieza entera, el espectro fue tomado haciendo un barrido por toda la superficie del *lomito* (limpia y sin restos de moho de la curación), mientras que en el caso de la muestra loncheada sin y con envase, el espectro se tomó haciendo zigzag sobre la superficie de la muestra. En todos los casos el objetivo fue recoger la máxima variabilidad y minimizar el error de muestreo. La información espectral fue recogida como reflectancia. La monitorización del instrumento y la manipulación espectral inicial se llevaron a cabo con el paquete de software Indico™ Pro (Analytical Spectral Device-ASD Inc., Boulder, CO).

Del total de las 88 piezas de *lomito* ibérico, un 80 % aproximadamente fueron seleccionados aleatoriamente y utilizados para la construcción de los modelos de clasificación –set de calibración– (n = 69), mientras que el resto de las piezas fue utilizada posteriormente para la validación de los modelos –set de validación externa– (n = 19). Ambos conjuntos de muestras fueron loncheados y envasados por separado para mantener la independencia de ambos sets en las formas de presentación del producto de loncheado y loncheado y envasado al vacío con un plástico de bajo gramaje (Tabla 1).

El análisis de componentes principales (ACP) de los espectros pertenecientes al set de calibración de cada grupo de muestras (pieza entera con tripa, loncheado y loncheado con envase) reveló gráficamente los casos que mostraron un comportamiento anómalo. El criterio de eliminación de éstos fue la distan-

cia de la muestra al centro de la población espectral mayor que tres veces la distancia media (Shenk y Westerhaus, 1995).

### **Desarrollo de los modelos de clasificación**

El análisis quimiométrico y desarrollo de los modelos de clasificación de los *lomitos* ibéricos de acuerdo a las categorías comerciales de la carne fresca utilizada para su elaboración (*Negra, Roja, Verde y Blanca*) y en las distintas formas de presentación (pieza entera curada con tripa, producto loncheado, y producto loncheado y envasado al vacío con un plástico de bajo gramaje), se realizó con el software Unscrambler X vs 10.5 (CAMO® Trondheim, Noruega) sobre el conjunto de muestras de calibración a partir del algoritmo de mínimos cuadrados parciales (PLS-DA). Se trata de un método de clasificación supervisado que trata de correlacionar las variaciones espectrales con las clases definidas; categorías comerciales *Negra, Roja, Verde y Blanca*, tratando de maximizar la covarianza entre ellas. En este enfoque, las variables dependientes (categorías de calidad) actúan como variables “ficticias” (Naes et al., 2002) ya que no son continuas, como en el análisis cuantitativo. Así, se asigna el valor de 1 a las muestras que pertenecen a la categoría objetivo que hay que discriminar del resto de categorías que toman el valor 0. Esto por tanto permite utilizar el algoritmo de mínimos cuadrados parciales en casos cualitativos. Las variables latentes (LVs) se eligieron en función del menor error de la validación cruzada mediante el método “leave-one-out”.

Los modelos fueron desarrollados utilizando los datos espectrales originales (reflectancia) así como tras determinados pretratamientos espectrales de forma individual o bien en combinación. Así, para la corrección de fenómenos de dispersión se utilizó la Variable Normal Estándar (SNV) y la Desviación de la tenden-

cia (DE). Éstos se basan en un análisis de regresión haciendo uso de un polinomio de segundo grado, tomando como variables dependientes los valores espectrales mientras que las independientes vienen dadas por las longitudes de onda, corrigiendo los efectos debidos a la curvatura de la línea de base (Barnes et al., 1989). Además, como tratamientos matemáticos se probaron dos derivadas de Savitzky-Golay; una primera derivada con 4 puntos de suavizado en los lados izquierdo y derecho (núcleo simétrico), y primer orden polinómico (1,4,4,1), y una segunda derivada con 5 puntos de suavizado en ambos lados, y segundo orden polinómico (2,5,5,2) (Savitzky y Golay, 1964).

Posteriormente, los mejores modelos, elegidos sobre la base del valor más alto del coeficiente de determinación de validación cruzada (1-VR), menor error cuadrático medio tras la validación cruzada (RMSECV) y menor número de LVs, así como menor grado de pretratamiento de la información espectral, se validaron en los conjuntos de muestras pertenecientes a los sets de validación externa. Estas validaciones fueron evaluadas través de los siguientes parámetros:

- Sensibilidad (SE), definida como la proporción de las muestras de una categoría determinada que el modelo atribuye correctamente a dicha categoría (Oliveri et al., 2018);

$$SE (\%) = \frac{VP}{VP + FN}$$

- Especificidad (SP), definida como la proporción de las muestras que no pertenecen a la categoría objetivo y son correctamente rechazadas (Oliveri et al., 2018);

$$SP (\%) = \frac{VN}{VN + FP}$$

- Precisión en la clasificación (Precisión), definida como el porcentaje de muestras correctamente clasificadas durante en la validación externa (Cáceres-Nevedo et al., 2021);

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

- Coeficiente de correlación de Matthews (MCC) (Matthews, 1975);

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

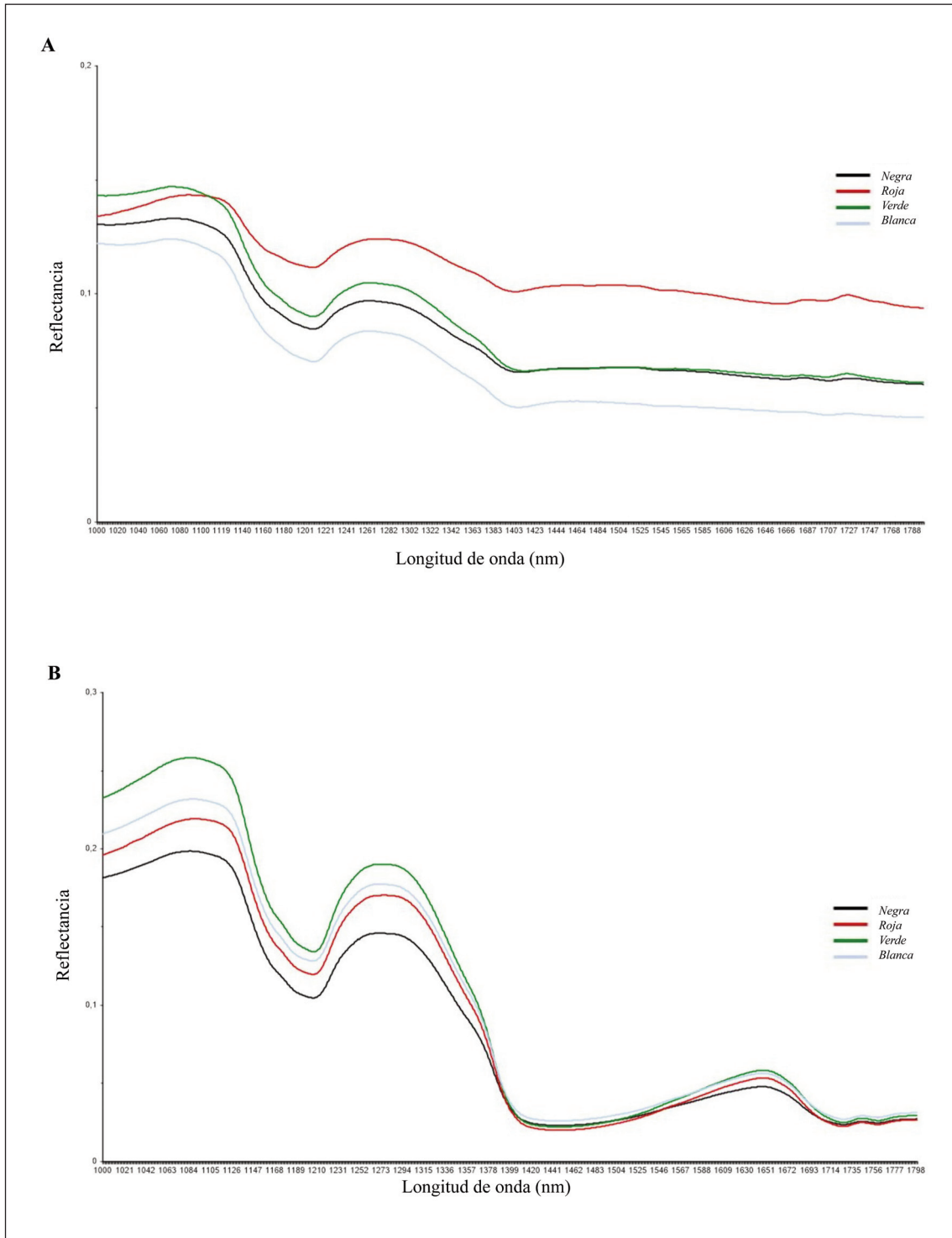
donde VP = verdaderos positivos, VN = verdaderos negativos, FP = falsos positivos y FN = falsos negativos obtenidos en validación.

Respecto al estadístico MCC, 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" (Boughorbel et al., 2017; Cáceres-Nevedo et al., 2021).

## Resultados y discusión

### Información espectral

Los espectros medios en reflectancia del conjunto de muestras del set de calibración agrupados de acuerdo a las varias categorías comerciales de la carne fresca utilizada para su elaboración (Negra, Roja, Verde y Blanca) en el rango comprendido entre 1000 nm y 1800 nm están representados en la Figura 2. La obtención de espectros de alta calidad es esencial para la construcción de modelos discriminativos fiables que permitan clasificar las muestras en función de las distintas categorías comerciales. En el rango espectral representado en la Figura 2 se puede observar una elevada relación entre señal/ruido, lo que permitiría obtener información espectral útil para la construcción de modelos predictivos.





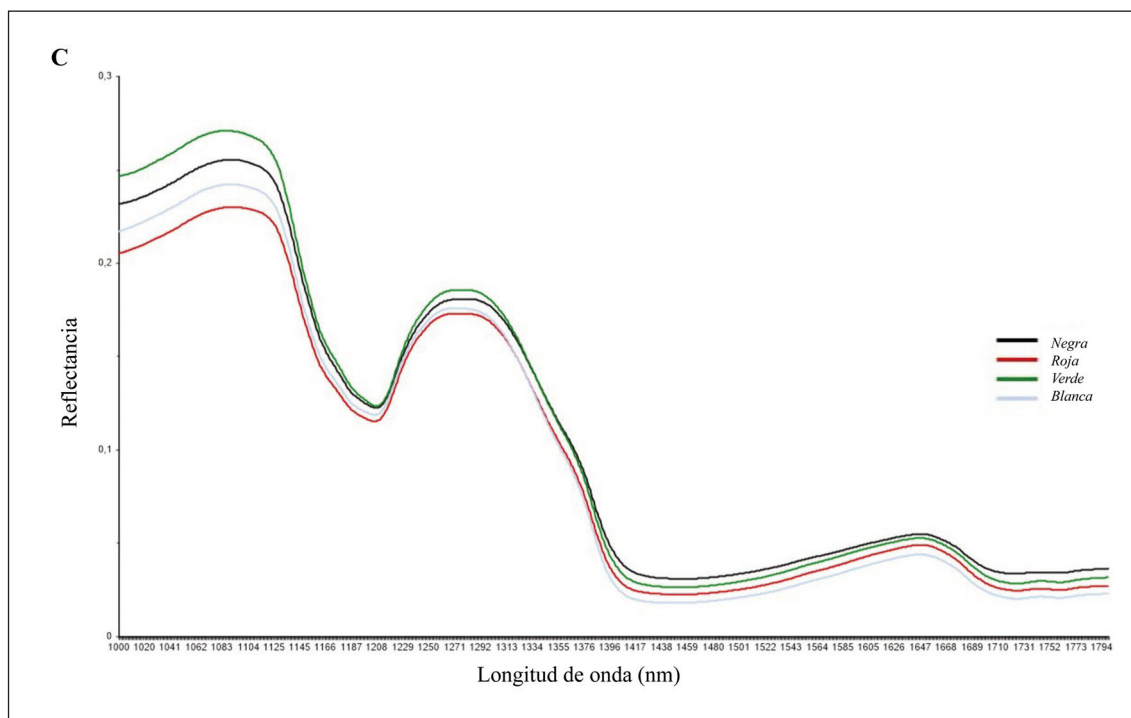


Figura 2. Espectros NIR medios (reflectancia) del set de calibración agrupados de acuerdo a las categorías comerciales de la carne fresca utilizada para su elaboración (músculo *Serratus ventralis*): Negra, Roja, Verde y Blanca tomados en pieza entera (A), producto loncheado (B) y producto loncheado y envasado al vacío en plástico de bajo gramaje (C), en el rango comprendido entre 1000 nm y 1800 nm.

Figure 2. Average NIR spectra (reflectance) of the calibration set grouped according to the commercial categories of the raw meat used for its manufacture (*Serratus ventralis* muscle): Black, Red, Green and White taken in whole piece (A), sliced product (B) and sliced and vacuum-packed product with low gram-mage plastic (C), in the range between 1000 nm and 1800 nm.

En términos generales, los espectros medidos en el producto loncheado sin y con envase se ajustaron a una forma similar con independencia de la categoría comercial, presentando los mismos picos, los cuales se situaron en torno a las longitudes de onda de 1080 nm, 1260 nm y 1650 nm (Figuras 2B y 2C). Además, se observaron diferencias en la intensidad de reflectancia entre los espectros medios de las distintas categorías comerciales principalmente a estas longitudes de onda. Los espectros obtenidos en este estudio a partir del *lomo* ibérico fueron similares, en forma y valores de reflectancia, a los obteni-

dos en lomo ibérico curado en formato loncheado y envasado (en atmósfera modificada con una proporción de gases de 70 %  $N_2$  y 30 %  $CO_2$  (Ortiz et al., 2021a). En cuanto a los espectros medios por categorías tomados en la pieza entera con tripa, se observó un ligero cambio de tendencia entre los espectros medios de las categorías Verde y Roja en torno a los 1100 nm, donde llegan a cruzarse. Por otra parte, también se observaron unos picos en torno a los 1080 nm y 1260 nm (Figura 2A), aunque menos definidos que en los espectros obtenidos a partir del producto loncheado (sin y con envase).

### **Desarrollo y validación de los modelos PLS-DA para la clasificación del lomo ibérico de acuerdo a las categorías comerciales**

Los estadísticos de calibración de los mejores modelos de calibración desarrollados para la clasificación del *lomo* ibérico de acuerdo a las varias categorías comerciales de la carne fresca utilizada para su elaboración (*Negra, Roja, Verde y Blanca*), junto con los resultados de clasificación de sus validaciones están recogidos en la Tabla 2.

En primer lugar, el mejor modelo en el formato de pieza entera con tripa fue obtenido con los espectros en bruto, es decir; en reflectancia. Este modelo obtuvo valores de 1-VR comprendidos entre 0,717 y 0,881. Cuando este modelo fue validado, la SE fue del 100 % para todas las categorías comerciales, mientras que la SP se mantuvo con valores por encima del 78 %, dando lugar a los mejores resultados en la predicción de la categoría comercial, con más del 92 % de las muestras en el set de validación externa correctamente clasificadas. Además, también se utilizó el estadístico MCC para valorar el rendimiento del modelo, el cual es más acertado cuando el número de muestras en las distintas clases no es el mismo (Boughorbel et al., 2017; Cáceres-Nevado et al., 2021). Este índice tiene un buen rendimiento cuando el modelo predictivo obtiene buenos resultados en todas las categorías. Así el MCC para el mejor modelo obtenido en pieza entera fue de 0,82 (Tabla 2), lo que sugiere una elevada capacidad predictiva del modelo (Boughorbel et al., 2017; Cáceres-Nevado et al., 2021). Por otra parte, los pretratamientos SNV seguido de DE en combinación con la primera derivada (SNV-DE SG 1,4,4,1) y SG 1,4,4,1 fueron necesarios para obtener los mejores modelos clasificatorios en el producto loncheado sin y con envase, respectivamente (Tabla 2). Tras el loncheado sin y con envase al vacío con el plástico de bajo gramaje, los modelos mantuvieron los índices estadísticos en calibración

(1-VR, RMSECV) sin cambios sustanciales con respecto al modelo obtenido a partir de la pieza entera. Tras la validación, estos modelos obtuvieron un menor porcentaje de muestras correctamente clasificadas, especialmente el obtenido en el producto loncheado y envasado, con un 79,23 %. También en éste se observó un descenso marcado del índice MCC, explicado por el bajo valor de SE en los envases de etiqueta *Blanca* (37,50 %). No obstante, el valor de SP fue elevado para todas las categorías comerciales y en todas las formas de presentación del producto. El poder discriminar correctamente muestras que no pertenecen a una determinada categoría es de especial relevancia desde el punto de vista comercial, principalmente para las categorías *Negra* y *Roja*. Los productos procedentes de animales acabados en *Montanera*, y por tanto comercializados bajo estas dos categorías, son los más apreciados por los consumidores (Díaz-Caro et al., 2019) y alcanzan los precios más altos del mercado. En consecuencia, estas categorías podrían estar más expuestas a prácticas fraudulentas, especialmente una vez que son loncheados. Los resultados de este estudio podrían proveer las bases para garantizar la trazabilidad de los productos ibéricos, incluso cuando el producto ya está loncheado y envasado.

La capacidad para clasificar el *lomo* ibérico de acuerdo a la categoría comercial podría estar asociada a las diferencias observadas en la intensidad de absorción, especialmente en los principales picos anteriormente mencionados; alrededor de los 1080 nm, 1260 nm y 1650 nm de longitud de onda, los cuales estuvieron principalmente definidos en los espectros tomados en el producto loncheado (Figura 2). Estas longitudes de onda han sido asociadas a combinaciones del tercer, segundo y primer sobretono de los enlaces carbono e hidrógeno, respectivamente (Murray y Williams, 1987; Barbin et al., 2014), que son la base de las cadenas de hidrocarburos de los ácidos grasos, así como de compuestos

Tabla 2. Índices estadísticos del mejor modelo obtenido mediante PLS-DA para la clasificación del lomo de acuerdo a las categorías comerciales de la carne fresca utilizada para su elaboración (músculo *Serratus ventralis*).  
 Table 2. PLS-DA results of the best prediction model obtained for the classification of Iberian lomo according to the commercial categories of the fresh meat used for its manufacture (*Serratus ventralis muscle*).

Toma del espectro NIR	Pre-tratamiento	n	Variables latentes (LV)	Categorías comerciales	Validación cruzada			Validación externa		
					1-VR	RMSECV	SE (%)	SP (%)	Precisión (%)	MCC
Pieza entera con piel	Reflectancia	69	10	Negra	0,792	0,207	100,00	100,00	92,11	0,82
				Roja	0,881	0,156	100,00	78,57		
				Verde	0,717	0,241	100,00	78,57		
				Blanca	0,812	0,167	100,00	100,00		
Loncheado sin envase	SNV-DE SG 1,4,4,1	147	12	Negra	0,864	0,172	77,78	82,14	90,54	0,74
				Roja	0,907	0,146	90,00	100,00		
				Verde	0,816	0,208	90,00	85,19		
				Blanca	0,618	0,150	100,00	96,55		
Loncheado con envase	SG 1,4,4,1	147	12	Negra	0,730	0,222	77,78	82,14	79,23	0,47
				Roja	0,698	0,246	70,00	88,89		
				Verde	0,728	0,234	80,00	88,89		
				Blanca	0,588	0,267	37,50	75,86		

n = número de muestras; SNV = Variable Normal Estándar; DE = Desviación de la tendencia; SG = derivadas de Savitzky-Golay; una primera derivada con 4 puntos de suavizado en los lados izquierdo y derecho (núcleo simétrico) y primer orden polinómico; 1-VR = coeficiente de determinación; RMSECV = error cuadrático medio tras la validación cruzada; SE = sensibilidad; SP = especificidad; MCC = coeficiente de correlación de Mathews.

antioxidantes lipídicos como el alfa y gamma tocoferol. Por tanto, las diferencias en absorción de energía en dichas longitudes de onda (Figura 2) podrían ser reflejo de las variaciones en el perfil lipídico y antioxidante del *lomito* entre las categorías estudiadas, puestas de manifiesto en estudios recientes en productos ibéricos curados tales como el lomo (García-Torres et al., 2021), jamón (Ramírez et al., 2021) y chorizo (García-Torres et al., 2021). Fernández-Cabanás et al. (2011) utilizaron bandas localizadas alrededor de 1210 nm para determinar el perfil de ácidos grasos de salchichón y chorizo ibéricos mediante tecnología NIRS. Posteriormente, Pérez-Marín et al. (2021) reportaron que regiones características de las bandas de absorción de los enlaces carbono e hidrógeno, permitirían discriminar entre canales de cerdo ibérico de acuerdo al régimen alimenticio del animal (bellota vs. pienso). Por lo tanto, la capacidad de clasificación entre categorías (la cual es una combinación de la pureza racial, manejo y régimen alimenticio del animal), podría atribuirse a diferencias espectrales, especialmente en las longitudes de onda donde se encuentran las mayores diferencias en la intensidad de la reflectancia.

En cuanto a la literatura científica relativa a la obtención de modelos cualitativos a partir de la tecnología NIRS para discriminar entre las categorías comerciales definidas por la actual Norma de Calidad del ibérico o bien de acuerdo a otras designaciones comerciales recogidas en anteriores marcos normativos es inexistente en producto curado y en formato de pieza entera. No obstante, Horcada et al. (2020) obtuvieron una elevada capacidad predictiva de la categoría comercial (*Negra, Roja, Verde y Blanca*) en carne fresca (músculo *psaos major*), con más de un 60 % de precisión en la clasificación tras la validación del mejor modelo de predicción. La menor precisión en la clasificación obtenida en el trabajo anterior con respecto a los resultados obtenidos para el *lomito* ibérico en el pre-

sente trabajo (Tabla 2) podría ser explicada por varios factores. En primer lugar, la mayor homogeneidad de los espectros en producto curado debido a la menor interferencia del agua en éste con respecto a la carne fresca. En segundo lugar, Horcada et al. (2020) utilizaron un número de muestras superior al del presente trabajo, recogiendo éstas además una mayor variabilidad de la población al proceder de animales de distintos lotes de sacrificio, años productivos y mataderos. Esta mayor variabilidad dentro de cada categoría podría haber conducido a un descenso en la capacidad discriminante.

Por otra parte, recientes estudios han aplicado la tecnología NIRS en combinación con PLS-DA a embutidos tales como salchichón y chorizo ibéricos, en formatos loncheados y envasados en atmósfera modificada (70 % N<sub>2</sub> 30 % CO<sub>2</sub>), para clasificarlo de acuerdo a varias categorías comerciales del magro y grasa utilizados para su elaboración (*Negra, Roja y Blanca*) (Ortiz et al., 2021a,b). Estos autores obtuvieron tras la validación de dichos modelos valores de SE inferiores pero similares de SP a los obtenidos en el presente estudio. En esta misma línea, Tejerina et al. (2021a) también demostraron la posibilidad de garantizar la autenticidad de la categoría comercial (*Negra, Roja y Blanca*) del lomo ibérico curado, también en formato loncheado y envasado en atmósfera modificada (70 % N<sub>2</sub> 30 % CO<sub>2</sub>), a través de la tecnología NIRS en combinación con PLS-DA. El presente estudio incorpora la posibilidad de clasificar un nuevo producto, como es el *lomito*, en otro tipo de envase y material plástico, demostrando que éstos últimos no constituyen una limitación para la aplicación de la tecnología NIRS al control de la trazabilidad de los productos ibéricos curados en formatos loncheados y envasados. Además, este estudio aborda por primera vez la posibilidad de autenticación-clasificación de productos curados bajo el amparo de la categoría *Verde*. Esta categoría no había sido considerada

hasta el momento, debido a la gran variabilidad en las características físico químicas y nutricionales que presentan los productos (Díaz-Caro *et al.*, 2019), resultado de la variabilidad en las condiciones de producción a la que están sujetos los animales de los que proceden (BOE, 2014). Esto supone por tanto un reto tecnológico y un avance para el sector ibérico, en cuanto a herramientas rápidas y no destructivas para el control de calidad de los productos curados.

### Conclusiones

Los resultados obtenidos en el presente estudio sugieren que la tecnología NIRS en combinación con PLS-DA podría ser una herramienta rápida y fiable para clasificar el *lomo* ibérico de acuerdo a las categorías comerciales de la carne fresca (músculo *Serratus ventralis*) utilizada para su elaboración definidas en el actual marco normativo del ibérico. Respecto a los varios formatos de presentación del producto, el formato de pieza entera es especialmente recomendado para conseguir la mejor capacidad predictiva de la categoría comercial.

Estos resultados comprenden las últimas aplicaciones de la tecnología NIRS en nuevos productos cárnicos curados y tipos de envases, pudiendo servir de base para la generación de conocimientos sobre modelos quimiométricos cualitativos en este tipo de productos y para los potenciales usuarios de la tecnología NIRS. Sin embargo, estos resultados deben entenderse como un estudio preliminar, y en el que sería necesario ampliar la población muestral, con piezas procedentes de animales de distintas explotaciones, y elaboradas en distintas campañas e industrias. Esto proporcionaría la variabilidad suficiente para garantizar la robustez de los modelos obtenidos antes de su aplicación para asegurar la trazabilidad a nivel de industria y canales de distribución.

### Agradecimientos

Esta investigación ha sido apoyada por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER), subvención número CCESTRIBER03.

### Referencias bibliográficas

- Barbin DF, Felicio ALSM, Sun DW, Nixdorf SL, Hirooka EY (2014). Application of infrared spectral techniques on quality and compositional attributes of coffee: An overview. *Food Research International* 61: 23-32. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.01.005>.
- Barnes RJ, Dhanoa MS, Lister SJ (1989). Standard normal variate transformation and de-trending of near-infrared diffuse reflectance spectra. *Applied Spectroscopy* 43(5): 772-777. <https://doi.org/10.1366/0003702894202201>.
- BOE (2014). 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, 16 pp.
- 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 JM, Garrido-Varo A, De Pedro-Sanz E, Tejerina-Barrado D, Pérez-Marín DC (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 MR, García-Torres S, López-Parra MM, Tejerina D (2021). Physicochemical 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>.
- Díaz-Caro C, García-Torres S, Elghannam A, Tejerina D, Mesias FJ, Ortiz A (2019). Is production system a relevant attribute in consumers' food

- preferences? The case of Iberian dry-cured ham in Spain. *Meat Science* 158: 107908. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2019.107908>.
- Fernández-Cabanás VM, Polvillo O, Rodríguez-Acuña R, Botella B, Horcada A (2011). Rapid determination of the fatty acid profile in pork dry-cured sausages by NIR spectroscopy. *Food Chemistry* 124(1): 373-378. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.06.031>.
- García-Gudiño J, Blanco-Penedo I, Gispert M, Brun A, Perea J, Font-i-Furnols M (2021). Understanding consumers' perceptions towards Iberian pig production and animal welfare. *Meat Science* 172: 108317. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2020.108317>.
- García-Torres S, Contador R, Ortiz A, Ramírez R, López-Parra M, Tejerina D (2021). Physico-chemical and sensory characterization of sliced Iberian *chorizo* from raw material of three commercial categories and stability during refrigerated storage packaged under vacuum and modified atmospheres. *Food Chemistry* 354: 129490. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129490>.
- Horcada A, Valera M, Juárez M, Fernández-Cabanás VM (2020). Authentication of Iberian pork official quality categories using a portable near infrared spectroscopy (NIRS) instrument. *Food Chemistry* 318: 126471. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126471>.
- ICEX (2019). España Exportación e Inversiones. Madrid, España. Ministerio de Industria, Comercio y Turismo. Disponible en: <https://www.icex.es/icex/es/index.html>. (Consultado: 27 de abril 2022).
- Lorido L (2016). Evaluación sensorial de productos cárnicos derivados del cerdo ibérico: aplicación de técnicas dinámicas y descriptivas rápidas. Tesis doctoral. Universidad de Extremadura.
- Matthews BW (1975). Comparison on 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, Williams PC (1987). Chemical principles of near-infrared technology. En: *Near-Infrared Technology in the Agricultural and Food Industries* (Eds. Williams, P. C. and Norris, K.) pp. 17-34, American Association of Cereal Chemists Inc., St. Paul, MN.
- Naes T, Isaksson T, Fearn T, Davies T (2002). A user-friendly guide to multivariate calibration and classification. NIR publications, Chichester, UK.
- Oliveri P, Malegori C, Casale M (2018). Multivariate Classification Techniques. En: *Encyclopedia of Analytical Science* 3rd ed. (Ed. Worsfold P, Townshend A, Poole C, Miro M), pp. 481-486, Elsevier, Amsterdam. <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). Potential 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>.
- 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>.
- Pugliese C, Sirtori F (2012). Quality of meat and meat products produced from southern European pig breeds. *Meat Science* 90: 511-518. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2011.09.019>.
- Ramírez R, Contador R, Ortiz A, García-Torres S, López-Parra MM, 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>.
- Savitzky A, Golay MJE (1964). Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. *Analytical Chemistry* 36(8): 1627-1639. <https://doi.org/10.1021/ac60214a047>.

- Shenk JS, Westerhaus MO (1995). Routine operation, calibration, development and network system management manual. NIRSystems, Inc., 12101 Tech Road, Silver Spring, MD 20904, PN IS-0119.
- Tejerina D, García-Torres S, Cabeza De Vaca M, Vázquez FM, Cava R (2012). Effect of production system on physical-chemical, antioxidant and fatty acids composition of *Longissimus dorsi* and *Serratus 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 (2021a). 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>.
- Tejerina D, León L, García-Torres S, Sánchez M, Ortiz A (2021b). Quality traits of *montanera* Iberian dry-cured *lomo* as affected by pre-cure freezing practice. Foods 10(7): 1511. <https://doi.org/10.3390/foods10071511>.
- (Aceptado para publicación el 27 de abril de 2022)