

Control *in situ* en la línea de faenado de canales de cerdo ibérico mediante sensores portátiles de infrarrojo cercano

Este trabajo resume el avance en el conocimiento alcanzado sobre el análisis *in situ* de canales de cerdo ibérico en la línea de faenado mediante el uso de un sensor MEMS-NIRS portátil. Se abordan dos aproximaciones: una cualitativa referente a la clasificación de canales según su régimen alimenticio y otra cuantitativa en relación a la predicción del perfil de ácidos grasos mayoritarios, ambas comparadas con las usadas tradicionalmente en laboratorios e industrias.

Introducción

El incremento en la complejidad de la cadena alimentaria y las recientes crisis alimentarias han provocado el que los consumidores deseen obtener más información acerca de los productos que consumen y en los diferentes eslabones de la cadena productiva, esto es, producción (ej. calidad y procedencia de las materias primas, sistema de producción, propiedades nutritivas, saludables, etc.), transformación (ej. tipo de procesamiento térmico, aditivos, etc.) y distribución (ej. vida útil, tipo de transporte, etc.). Muchos estudios de investigación han mostrado que los consumidores quieren pagar por la trazabilidad de los productos que consumen, pero también que éstos pagarían más si dicho coste también lleva asociado una mayor y mejor información sobre atributos de calidad, es decir, sobre propiedades nutricionales, dietéticas, medicinales, de sistemas de producción típicos o locales, de bienestar animal, de buenas prácticas agroganaderas, etc. Sin embargo, los métodos de producción de productos agroganaderos, y sobre todo los de productos de alta calidad, como los derivados del cerdo ibérico (producción al aire libre, alimentación con recursos naturales,

Garrido Varo, A.,* Zamora Rojas, E., Pérez Marin, D.C.,

Guerrero Ginel, J.E., De Pedro Sanz, E.

Ingeniería de Sistemas de Producción Agroganaderos, E. T. S. de Ingeniería Agronómica y de Montes, Universidad de Córdoba, Campus de Excelencia Internacional Agroalimentario, Carretera Nacional IV Km. 396. C.P. 14014. Córdoba. Edificio Producción Animal.

*pa1gavaa@uco.es

preservación de paisaje, etc.) son muy costosos y difíciles, si no imposible, de demostrar. Este hecho es conocido tanto por industriales como por consumidores. Por tal razón, ambos están faltos de motivación e incentivos para que, de una parte, los industriales implementen métodos novedosos de control y aseguramiento de la calidad y, de otra, los consumidores estén dispuestos a pagar el coste adicional que conlleva el poner en práctica métodos y programas para obtención de la información que demandan, sobre todo en productos de alta calidad y elevado precio (Garrido y De Pedro, 2007).

La tecnología de Espectroscopía de Infrarrojo Cercano (*NIRS*, *Near Infrared Reflectance Spectroscopy*) ha demostrado que es capaz de responder a las necesidades de innovación en el control de calidad, con numerosas ventajas frente a otras técnicas como son: su alta velocidad de análisis (fracciones de segundos), el ser no destructiva, el no utilizar reactivos ni por tanto producir residuos químicos, su versatilidad, ya que es una tecnología multiparámetro y multiproducto, la posibilidad de ser miniaturizable y portátil y, lo que es más importante, los nuevos diseños de instrumentación permiten el análisis masivo de piezas individuales

a las velocidades de las líneas de producción. Desde finales de la década de los 70 hasta la actualidad, miles de artículos científicos, diversos libros específicos y congresos internacionales sobre la tecnología NIRS han confirmado la idoneidad de la misma en el control de productos en campos tan diversos como el agroalimentario, farmacéutico) médico, petroquímica, textil, medioambiental, forestal y químico. El grupo de investigación "Ingeniería de Sistemas de Producción Agroganaderos" (ISPA), al cual pertenecen los autores del presente trabajo, viene realizando, desde la década de los noventa, una intensa actividad de I + D + i + F (Investigación + Desarrollo + Innovación + Formación) sobre el uso de sensores NIRS para el control de calidad de productos y procesos agroalimentarios, y más concretamente, en el sector del cerdo ibérico (Garrido y col., 2004; Garrido y De Pedro, 2007; De Pedro y col., 2007).

Sin embargo, a pesar de su enorme potencial, una de las dificultades para la expansión generalizada de la tecnología NIRS en la industria agroalimentaria es la necesidad de generar modelos predictivos robustos para una determinada aplicación (ej. clasificación de canales de cerdo ibérico en función del régimen alimenticio y del perfil de ácidos grasos). Además, la instrumentación NIRS evoluciona muy rápidamente y coexisten en el mercado instrumentos de prestaciones muy variadas en lo referente a sus características ópticas, electrónicas, de tratamiento de datos, etc. De ahí, que el asesoramiento a la industria en estrategias de implantación de la tecnología NIRS conlleva, aún hoy día, la necesidad de una alta especialización científico-técnica. Un sensor NIRS

no es un analizador, y esto debe ser bien entendido, por los potenciales usuarios. Con pocas excepciones, los instrumentos comerciales han sido diseñados para aplicaciones no agroalimentarias (ej. productos farmacéuticos) o bien para productos tales como cereales, forrajes, etc., y su potencial de aplicación a otros productos y procesos agroalimentarios necesita ser demostrada científicamente, antes de que un determinado sensor pueda ser recomendado para su uso en una aplicación concreta, en una industria o laboratorio. Ha sido una constante en la estrategia de I + D + i + F de los autores de este trabajo el realizar proyectos y contratos con empresas, para compartir el riesgo y el beneficio del estudio de un sensor NIRS para una determinada aplicación.

En la década de los 90, por vez primera, De Pedro y col. (1992) mostraban que un instrumento NIRS monocromador de laboratorio permitía predecir el contenido en ácido oleico, palmítico, esteárico y linoleico en grasa fundida de cerdo ibérico, con una exactitud y precisión similar a la obtenida por el método tradicional de cromatografía de gases. Unos años más tarde, se mostraba que los datos espectroscópicos "per se", convenientemente tratados con algoritmos multivariantes de clasificación (ej. Análisis Discriminante Lineal), permitían predecir el régimen alimenticio ("bellota", "recebo", "cebo") con un elevado porcentaje de aciertos, similar al obtenido utilizando como variables discriminatorias el contenido en 11 ácidos grasos analizados por cromatografía de gases (Hervás y col., 1994 y De Pedro y col., 1995). Estos trabajos preliminares fueron realizados utilizando muestras procedentes de animales sometidos a



Figura 1. Análisis *in situ* de canales de cerdo ibérico en la línea de faenado mediante sensores MEMS-NIRS

ensayos de alimentación, en condiciones muy controladas. A este trabajo siguieron muchos otros, utilizando muestras procedentes de inspecciones de campo y de la industria (García-Olmo y col., 2000, 2001; García-Olmo, 2002; García-Olmo y De Pedro, 2002a; Pérez-Marín y col., 2007, 2010; García-Olmo y col., 2009; Fernández-Cabanás y col., 2011; Ortiz-Somovilla y col., 2007; Zamora-Rojas y col., 2011).

La constatación más real de que la investigación realizada ha sido de utilidad al sector del cerdo ibérico es que la tecnología NIRS se encuentra implantada en algunas industrias y laboratorios del sector. Asimismo, las autoridades competentes han financiado diferentes ensayos colaborativos en los que la tecnología NIRS ha sido considerada, junto a otras técnicas, a fin de poder tomar decisiones en cuanto a su posibilidad de inclusión como método oficial de control. Los resultados hasta aquí obtenidos han demostrado que las predicciones NIRS realizadas utilizando la metodología y modelos desarrollados por el ISPA, utilizando grasa fundida, permiten predecir la composición en ácidos grasos mayoritarios, con una precisión y exactitud similar a la de la cromatografía de gases en laboratorios altamente cualificados para tal fin (De Pedro, 2001; García-Olmo y col., 2002b).

Todos estos estudios y ensayos colaborativos han sido realizados utilizando la tecnología NIRS a nivel "at-line" (laboratorio), para lo cual es necesario una vez tomada la muestra correspondiente, llevar la misma al laboratorio para ser fundida y, posteriormente,

analizada por NIRS. Sin embargo, independientemente de este potencial de aplicación y de su aceptación oficial, existe una necesidad en la industria del cerdo ibérico por poseer sistemas de control automatizados, que permitan tomar decisiones en tiempo real. Desde el descubrimiento y desarrollo de la tecnología NIRS, ésta ha avanzado enormemente tanto en diseño instrumental como en aplicaciones (Mc Clure, 2003). En los últimos años, el diseño y desarrollo de instrumentos NIRS miniaturizados y portátiles, y el avance en el diseño de fibras ópticas, ha permitido a esta tecnología afrontar nuevos retos para los que los diseños instrumentales tradicionales nos eran adecuados (Crocombe, 2004).

Un estudio de viabilidad realizado en la Universidad de Córdoba (UCO) mostraba que era posible predecir la composición de ácidos grasos mayoritarios oléico, palmítico, esteárico y linoleico en animales vivos y en canales (Pérez-Marín y col., 2009). Dicho estudio concluía, que si bien era factible el realizar análisis de canales, en concreto, la sonda utilizada en dicho estudio, no era lo suficientemente adecuada para la aplicación perseguida. En el año 2005, en PITTCON, se presenta el primer instrumento portátil basado en tecnología MEMS (Sistemas Micro Electro Mecánicos, Micro Electronic Mechanical Systems) (Ramani, 2005). Los sensores MEMS-NIRS ofrecen numerosas ventajas con respecto a otras tecnologías utilizadas en la instrumentación tradicional NIRS, tales como: menor tamaño, portabilidad, menor coste, mayor velocidad de análisis, etc. La adquisición de uno de estos instrumentos por el grupo de investigación ISPA de la UCO permitió iniciar proyectos de I + D + i, con la colaboración de industriales del sector, con el objetivo de mostrar el potencial de sensores MEMS-NIRS en el control de calidad de canales de cerdo ibérico a nivel de la línea de faenado (Zamora-Rojas, 2013).

El presente trabajo resume el avance en el conocimiento alcanzado sobre el análisis *in situ* de canales de cerdo ibérico en la línea de faenado mediante el uso de un sensor MEMS-NIRS portátil. Se abordan dos aproximaciones: una cualitativa referente a la clasificación de canales según su régimen alimenticio y otra cuantitativa en relación a la predicción del perfil de ácidos grasos mayoritarios. Ambas aproximaciones son comparadas con los resultados obtenidos con instrumentos monocromadores de más alto coste y prestaciones científico-técnicas, que son los tradicionalmente usados para el análisis "al-line" en laboratorios e industrias.

Material y métodos

Colectivo de muestras y análisis de referencia

Se han utilizado un total de 300 canales de cerdo ibérico pertenecientes a dos campañas de sacrificio (2008/2009 y 2009/2010), y que procedían de 2 industrias de la zona de Los Pedroches (Córdoba). De éstas, 100 fueron clasificadas como bellota, 100 como recebo y 100 como cebo por los inspectores de campo, de acuerdo con las categorías establecidas en la norma de calidad de los productos de cerdo ibérico (Real Decreto 1469/2007, BOE, 2007). De cada una de las canales se registró su espectro NIRS en diferentes modos de análisis: en la canal en la industria, en tejido adiposo intacto y en grasa fundida, ambos últimos en el laboratorio. Para el análisis NIRS de laboratorio y el análisis de referencia (cromatografía de gases), se tomaron muestras de cada una de las canales, las cuales posteriormente fueron trasladadas en condiciones de refrigeración al Departamento de Producción Animal de la UCO. Una vez analizadas las muestras de tejido adiposo subcutáneo intactas, éstas se fundieron, siguiendo el procedimiento propuesto de De Pedro y col. (1997). Una alícuota fue utilizada para el análisis NIRS en modo transflectancia y otra fue enviada al Laboratorio Agroalimentario de Córdoba, para la determinación del perfil de ácidos grasos por cromatografía de gases (BOE, 2004).

Análisis por Espectroscopía de Infrarrojo Cercano

Instrumento portátil: Phazir™ 1624 (Polychromix Inc., Wilmington, MA, USA) que realiza medidas en reflectancia, en el rango de longitudes de onda entre 1.600-2.400 nm, con una resolución espectral no constante de 8 nm. El tiempo de análisis es de 3 segundos.

Se tomaron cuatro espectros por canal en el área transversal de tejido adiposo subcutáneo, esto es, a unos 10 cm del área de inserción del rabo, zona de toma de muestra recomendada en la Orden PRE/3844/2004 (BOE, 2004). Para el posterior análisis de datos, se utilizó la media de los cuatro espectros recogidos. El análisis se realizó a la salida de las canales de la cámara de oreo (figura 1), en la cual se mantuvieron alrededor de 2 horas. La temperatura de las canales durante las medidas osciló entre 15 y 18 °C. Posteriormente, para facilitar la comparación de los datos obtenidos en este instrumento con los obtenidos en los instrumentos Foss NIRSystems (FNS), los datos fueron exportados al *software* WinISI IT ver 1.50 (Infrasoft International, Parma, Matilda, PA, USA), exclusivo de los instrumentos MENS.

Instrumentos de alta prestaciones científicas: Se utilizaron dos monocromadores Foss NIRSystems 6500 (Foss-NIRSystems Inc., Silver Spring, MD, USA), ubicados en las instalaciones del Servicio Central de Apoyo a la Investigación (SCAI, UCO), y que trabajan

Tabla 1. Resultados de clasificación según régimen alimenticio del colectivo de validación para los mejores modelos obtenidos para los diferentes instrumentos y modos de análisis

Técnica de análisis / Modo de análisis	Pre-tratamiento	Clasificación en campo	Clasificado como (%; nº)					
			Bellota		Recebo		Cebo	
			%	nº	%	nº	%	nº
Análisis NIRS en laboratorio / grasa fundida (FNS-I)	1	Bellota (33)	96,9	32	3,1	1	0	0
		Recebo (33)	0	0	100	33	0	0
		Cebo (28)	0	0	3,6	1	96,4	27
Análisis NIRS en laboratorio / Tejido adiposo intacto (FNS-II)	2	Bellota (33)	90,9	30	9,1	3	0	0
		Recebo (33)	12,1	4	87,9	29	0	0
		Cebo (28)	0	0	3,6	1	96,4	27
Análisis NIRS in situ matadero / canal (MEMS-NIRS)	3	Bellota (33)	93,9	31	6,1	2	0	0
		Recebo (33)	27,3	9	60,6	20	12,1	4
		Cebo (28)	0	0	3,6	1	96,4	27

1: 450-2500 nm/2 nm, derivada 2,10,5,1 y 5 factores PLS; 2: 450-2208 nm/2 nm, derivada 2,5,5,1 y MSC (Corrección multiplicativa del efecto de dispersión o scatter) y 6 factores PLS; 3: 1600-2208 nm/-8 nm, derivada 2,10,5,1 + MSC y 6 factores PLS.

en condiciones controladas de laboratorio. Los instrumentos FNS realizan medidas en el rango de longitudes de onda entre 400 y 2.500 nm, con una resolución espectral de 2 nm. El tiempo aproximado de análisis es de 2-3 minutos. Uno de estos espectro fotómetros (FNS-I) dispone de un módulo giratorio, y fue utilizado para el análisis en transreflectancia de la grasa fundida de cada muestra de la canal. El segundo (FNS-II) estaba conectado a una sonda de fibra óptica que realiza medidas en el modo interactancia-reflectancia, y se utilizó para la medida de tejido adiposo intacto tomado de las canales en estudio. En ambos casos, se tomaron dos espectros de cada muestra y, posteriormente, se utilizó el espectro medio para el tratamiento de datos.

Procesamiento de los datos

El procesado y análisis multivariante de los datos espectrales se realizó con el software WinISI II ver 1.50 (Infrasoft International, Port Matilda, PA, USA)

-*Análisis cualitativo:* El procedimiento se inició con la aplicación del algoritmo CENTER (Shenk y Westerhaus, 1991 a y b). La base de datos obtenida tras medir los espectros tomados para cada muestra y cada modo de análisis, fue ordenada de menor a mayor distancia, utilizando para ello el estadístico H de Mahalanobis estandarizado respecto al espectro medio de

la población. Las muestras que presentaban un valor de H estandarizada superior a 3,0 fueron consideradas anómalas espectrales (Shenk y Westerhaus, 1991 a y b) y se eliminaron del colectivo. De esta forma, el colectivo utilizado para desarrollar los modelos cualitativos quedó constituido por 279 muestras procedentes de 97 animales referenciados como bellota, 94 de recebo y 84 de cebo. Posteriormente, y partiendo de los datos espectrales de las 279 muestras ordenadas por sus distancias espectrales (de menor a mayor distancia al centro de la población), se seleccionó una de cada tres muestras (para conformar el colectivo de validación N = 94) y las restantes fueron utilizadas como colectivo de entrenamiento (N = 185) para el desarrollo de los modelos cualitativos de clasificación de canales según régimen alimenticio bellota, recebo y cebo. Los modelos se desarrollaron utilizando el algoritmo de Análisis Discriminante por Mínimos Cuadrados Parciales (PLS2-DA, Partial Least Squares Discriminant Analysis). Zamora-Rojas y col. (2012) describen con más detalle todo el proceso de desarrollo de estos modelos cualitativos.

- *Análisis cuantitativo:* Dado el coste analítico del análisis de referencia por cromatografía de gases, en este caso el número de muestras se limitó 100, seleccionadas utilizando únicamente información espectral a través del algoritmo CENTER, anteriormente citado. En este caso, el colectivo de calibración quedó consti-

tuido por 88 muestras y el de validación por 22 muestras. Para el desarrollo de calibraciones se utilizó el algoritmo de Regresión por Mínimos Cuadrados Parciales Modificado (MPLS, Modified Partial Least Squares Regression), incluido en el software WinISI. Se desarrollaron calibraciones para la predicción del porcentaje de ácido palmítico (CI6:0), ácido esteárico (CI8:0), ácido oleico (CI8: 1) Y ácido linoleico (CI8:2). Una descripción más detallada de la metodología seguida para desarrollar y validar las calibraciones se puede consultar en el trabajo de Zamora-Rojas y col. (2013a).

Resultados y discusión

La **tabla 1** muestra los porcentajes de canales de cerdo ibérico correctamente clasificadas según régimen alimenticio para los distintos modos de análisis NIRS e instrumentación descritos, una vez aplicados los mejores modelos de clasificación obtenidos. En general, para la clasificación de animales de bellota y cebo, los resultados obtenidos con el espectrofotómetro MEMS-NIRS portátil son comparables con los obtenidos con los instrumentos NIRS de laboratorio, tanto analizando grasa fundida como tejido adiposo subcutáneo intacto.

Como era de esperar, los mejores resultados se obtuvieron con los modelos desarrollados en grasa fundida al ser la matriz más homogénea, y donde las bandas de absorción relacionadas con los ácidos grasos están mejor definidas en el espectro NIRS. Estos mayores porcentajes de canales correctamente clasificadas fueron seguidos por los obtenidos en condiciones contro-

ladas de laboratorio analizando tejido adiposo subcutáneo intacto, una matriz de producto más heterogénea y compleja. El análisis de canales en la línea de faenado en tiempo real con el equipo MEMS-NIRS clasificó correctamente el 93,9 % de las canales de bellota del colectivo de validación, 96,4 % en el caso de cebo y 60,6 % para el recebo. En el caso de la categoría recebo, los peores porcentajes de muestras correctamente clasificadas pueden explicarse por el hecho de que este grupo de animales tienen una alimentación combinada de pienso y recursos naturales de la dehesa. La preferencia individual del animal sobre un tipo de alimento u otro, los recursos disponibles en el campo y el metabolismo propio de cada individuo puede influir en la variabilidad individual de cada animal y, por tanto, hacer más complejo definir espectralmente este grupo intermedio entre las otras dos categorías. Es importante resaltar que los modelos predictivos NIRS se basan en la información de referencia de campo siguiendo los criterios de la Norma, y es lógico pensar que el dato de referencia recebo tenga mayor error que los de bellota y cebo.

La alta capacidad predictiva de estos modelos cualitativos demuestra el potencial de los instrumentos NIRS basados en tecnología MEMS-NIRS para clasificar canales de cerdo ibérico según régimen alimenticio con una alta fiabilidad y de una forma rápida, simple, no destructiva e individual en la línea de faenado del matadero. Resaltar cómo los tres modos de análisis permiten que ningún animal de cebo sea clasificado en la categoría bellota y viceversa.

Si bien estos resultados son fruto de una aproximación cualitativa que tiene su relevancia para el sector del

Tabla 2. Estadísticos de predicción de ácidos grasos para el colectivo de validación utilizando los mejores modelos de regresión obtenidos en los diferentes instrumentos y modos de análisis

Técnica de análisis NIRS / Modo de análisis		Laboratorio		
		grasa fundida (FNS-I)	tejido adiposo (FNS-II)	canal (MEMS-NIRS)
Rango espectral/ resolución		1.100-2.500 nm; 2nm	780-2.208 nm; 2nm	1.600-2.208 nm; -8 nm
Ácido palmítico (C16:0)	R ² p	0,97	0,85	0,78
	ETP (%)	0,37	0,79	1,00
Ácido esteárico (C18:0)	R ² p	0,95	0,92	0,83
	ETP (%)	0,38	0,45	0,68
Ácido oleico (C18:1)	R ² p	0,98	0,84	0,84
	ETP (%)	0,35	1,25	1,3
Ácido linoleico (C18:2)	R ² p	0,97	0,94	0,81
	ETP(%)	0,19	0,29	0,55

R²p: Coeficiente de determinación; ETP: Error típico de Predicción

cerdo ibérico, ya que la normativa española contempla estas distintas categorías y los productos derivados alcanzan precios diferentes en el mercado, determinar el perfil de ácidos grasos no sólo va en esa misma línea de autenticación de productos sino que también es relevante para proporcionar a los consumidores, particularmente de mercados internacionales, una información de alto valor, por la asociación de los ácidos grasos insaturados y la salud.

La **tabla 2** recoge los resultados de las ecuaciones desarrolladas para la predicción de los cuatro ácidos grasos mayoritarios. Como se observa en dicha tabla, las ecuaciones desarrolladas con el instrumento portátil MEMS-NIRS muestran una capacidad predictiva inferior frente a otros modos de análisis NIRS (grasa fundida y tejido adiposo subcutáneo en instrumentos de altas prestaciones científico técnicas en laboratorio). La varianza explicada por los modelos MPLS (R²p) varía entre el 84% y el 98%, en el caso de los modelos desarrollados en condiciones controladas de laboratorio dependiendo del ácido graso y modo de presentación, mientras en el caso del análisis MEMS-NIRS, los valores de varianza explicada son, en general, algo inferiores (78 % para el ácido palmítico, 81 % para el ácido linoleico, 83 % para el ácido esteárico y 84 % para el ácido oleico). En cualquier caso y como indican Shenk y col., 2001, un valor de R' en va-

lidación superior al 70% es adecuado para el análisis cuantitativo NIRS.

En relación al error o incertidumbre de la estimación (ETP), como era de esperar, los valores de dicho estadístico son inferiores en las calibraciones realizadas con los equipos de altas prestaciones científico-técnicas (FNS), ya sea para analizar el tejido adiposo subcutáneo o, sobre todo, para grasa fundida.

Sin embargo, para una interpretación más correcta de los valores de ETP obtenidos con el instrumento portátil y su utilidad para la industria, conviene tener en cuenta cuál es la situación actual del análisis de ácidos grasos en industrias y laboratorios. De hecho, la calidad se determina en función de la composición en ácidos grasos de (a) grasa subcutánea de una muestra media representativa de una determinada partida de animales, elegidos al azar. Ello conlleva que si la selección de muestras de la partida no ha sido adecuada, una partida podría ser calificada en otra categoría distinta de a la que realmente pertenece (De Pedro y García-Olmo, 1999) e incluso, que en una partida haya animales con una composición en ácidos grasos que no corresponda a la calidad atribuida a la misma (De Pedro, 2001). La Norma de Calidad (BOE, 2003) establece claramente el procedimiento de muestreo en análisis por cromatografía de gases de lotes de animales y el porcentaje de animales a muestrear, en función del tamaño del lote.

Teniendo en cuenta estos procedimientos de muestreo, es importante resaltar que para evaluar y, sobre todo, comparar convenientemente cualquier método analítico, es imprescindible considerar que el error total de un método viene definido por la expresión "error total² = error del método + error de muestreo". Estimando ambas componentes del error podemos obtener una información más rigurosa de cualquier método analítico, y en nuestro caso concreto, de} valor de las calibraciones desarrolladas con el instrumento portátil situado en la línea de faenado, frente a los fNS situados en laboratorio.

Para realizar el cálculo del error total partimos de bases de datos acumuladas durante años, y que contienen información del perfil de ácidos grasos obtenido por cromatografía de gases y el predicho NrRS obtenido con los modelos desarrollados en grasa fundida, para cada animal individual de lotes de animales procedentes de diferentes campañas de sacrificio. De dicha base de datos se seleccionaron 5 lotes de animales. Cada lote -animales que pertenecen a un mismo ganadero y alimentados bajo las mismas condiciones- estaba compuesto por 22, 31, 23,34 y 27 animales, respectivamente. Para calcular el error de muestreo en el caso del análisis por cromatografía de gases y mediante análisis NIRS en muestra fundida, ambos métodos en uso en laboratorios e industrias actualmente, si bien realizados sobre una muestra media, se ha considerado la desviación típica con respecto a la media de los valores obtenidos para todos los animales de cada lote. En el caso del análisis de tejido adiposo intacto y en la canal, partimos de la base de que el error de muestreo no existe, ya que ambos modos de análisis permiten de forma rá-

pida el análisis de la grasa de todos los animales de un lote determinado.

Como se observa en la tabla 3, una vez calculados los errores totales del método de referencia y de los diferentes modos de análisis estudiados, podemos concluir que el instrumento MEMS-NIRS muestra unos errores totales que son similares e incluso en algunos casos inferiores a los obtenidos por el método oficial de referencia, al permitir el análisis en tiempo real y de forma individualizada en todas las canales en la línea de faenado. El simple hecho de poder analizar, en tiempo real, canales en la línea de faenado de forma individualizada, sin la necesidad de tomar muestras, destruir parte del producto o reducir la velocidad de procesamiento de la industria, es un salto cualitativo frente a los actuales métodos o sistemas de control de calidad en el sector del cerdo ibérico. Esto es crucial, ya que el consumidor desea pagar de acuerdo a la calidad de una determinada pieza, y sin embargo los animales que en principio pertenecen a un mismo lote y que han sido alimentados bajo las mismas condiciones, no necesariamente deben tener las mismas características, como se ha puesto de manifiesto anteriormente.

Conclusiones y futuros trabajos

El análisis *in situ* de canales de cerdo ibérico en la línea de faenado mediante espectrofotómetros MEMS-NIRS portátiles permite clasificar canales, de forma individual, según el régimen alimenticio y predecir el perfil 1 de los ácidos grasos mayoritarios, con ventajas respecto a los métodos actualmente utilizados en la industria.

Tabla 3. Estimación de los errores totales (%) para cada ácido graso analizado en tejido adiposo subcutáneo mediante cromatografía de gases y diferentes modos de análisis NIRS, estimado en un total de 5 lotes con un total de 137 animales

Técnica de análisis / Modo de análisis	Ácido palmítico (C16:01)	Ácido esteárico (C18:01)	Ácido oleico (C18:1)	Ácido linoleico (C18:2)
Cromatografía de gases*	0,88	0,78	1,01	0,55
Análisis NIRS en laboratorio / grasa fundida (FNS I) *	0,92	0,84	1,04	0,56
Análisis NIRS en laboratorio / tejido adiposo intacto (FNS-II)^	0,79	0,45	1,25	0,29
Análisis NIRS <i>in situ</i> matadero / canal (MEMS-NIRS) ^	1,00	0,68	1,30	0,55

* los errores totales de la técnica cromatografía de gases y del análisis NIRS de grasa fundida incluyen los errores de muestreo y del método de laboratorio. Cromatografía de gases: Error Típico Laboratorio = 0,22%, 0,25%, 0,15% y 0,26%, para C18:0, C18:1, C18:2 y C16:0, respectivamente (García-Olmo, 2002). NIRS en grasa fundida (datos de ETP, Tabla 2).

^ Los errores totales de los análisis NIRS de tejido adiposo intacto en laboratorio y los obtenidos en la canal, se corresponden con el error del método, ya que en estos casos ambos métodos de análisis permiten analizar el 100% de las canales faenadas.

Un trabajo conjunto de todos los agentes involucrados en el sector del cerdo ibérico a nivel de procesamiento, control y certificación, así como de laboratorios externos de centros de investigación, universidades, centros tecnológicos y de la Interprofesional ASICI, junto con el apoyo y reconocimiento de la Administración y las organizaciones de consumidores, sería fundamental para consolidar y transferir los resultados de este trabajo y avanzar en aquellos aspectos críticos, no evaluados aún, que permitieran clarificar al consumidor, de una forma objetiva y analítica, los precios tan diferenciados existentes en el mercado.

Si bien los avances en el conocimiento han permitido mostrar el potencial real de un sensor MEMS-NIRS de bajo coste y disponible en el mercado, existen todavía diversos aspectos que pueden ayudar a optimizar la incorporación de esta tecnología en la industria y mejorar los resultados obtenidos. El grupo de Ingeniería de Sistemas de Producción Agroganaderos de la Universidad de Córdoba contempla en sus actividades de I + D + i + F, no sólo el evaluar instrumentos existentes en el mercado, para así poder ofrecer una información rigurosa a los potenciales usuarios, sino que asimismo trabaja en colaboración con los fabricantes de instrumentos para proponer modificaciones de los ya existentes para su mejor adaptación (ej. tamaño de ventana, rango de medida, etc.) a las necesidades con-

cretas de cada producto/proceso. Además, actualmente existe una línea ya iniciada para integrar sensores portátiles MEMS-NTRS con nuevas tecnologías de la información y la comunicación (Zamora-Rojas y col., 2013b), de forma tal que permitan desarrollar sistemas de apoyo a la toma de decisión en tiempo real y de acceso a información detallada de cada pieza a través de dispositivos móviles.

Agradecimientos

Este Ira bajo ha sido posible gracias a la financiación de diferentes proyectos (RTA 2008-00026-C07 y P09-AGR-SI29) y asimismo al apoyo recibido por el Ministerio de Educación, Cultura y Deporte a través de una beca FPU (Formación de Personal Universitario). Los autores agradecen la colaboración de la Denominación de Origen protegida Los Pedroches y a las industrias COVAP. S.A.e., Embutidos Camilo Ríos, S.L y Sierra de Sevilla por proporcionar el material experimental. Gracias a Antonio López López, Manuel Sánchez Calderón y María del Carmen Fernández Fernández por su asistencia en el laboratorio.

Bibliografía

Puede consultar la bibliografía de este artículo en www.eurocarne.com/documentos/22204.pdf. e