

# UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR D'ENGINYERIA  
AGRONÒMICA I DEL MEDI NATURAL

TRABAJO DE FIN DE MÁSTER



## CARACTERIZACIÓN DEL SALADO DE LOMO DE VACUNO MEDIANTE TECNOLOGÍAS ULTRASÓNICAS

MÁSTER EN INGENIERÍA AGRONÓMICA

Curso 2020-2021

**Autora:** Paula Acero Ricondo

**Tutor:** José V. García Pérez

**Cotutora:** Lola Fernández-Caballero Fariñas

**Directora experimental:** Virginia Sánchez Jiménez

Valencia, Julio de 2021



## RESUMEN

En los últimos años, el sector agroalimentario ha mostrado un interés creciente por el desarrollo de métodos y tecnologías capaces de controlar y monitorizar de forma no invasiva y a tiempo real parámetros de calidad a nivel de la línea de producción siendo este un aspecto íntimamente ligado al movimiento de la Industria 4.0. En este contexto, las tecnologías ultrasónicas representan una alternativa de bajo coste para la caracterización de alimentos en las líneas de producción. En concreto, las tecnologías ultrasónicas convencionales por contacto se han utilizado con éxito para la caracterización de tanto la composición como las propiedades texturales de diferentes productos cárnicos, como son la sobrasada y el jamón curado. Sin embargo, su uso a nivel industrial se ha visto dificultado por la necesidad del contacto entre la muestra y los transductores. Por el contrario, el uso de nuevas tecnologías ultrasónicas con acoplamiento por aire permiten realizar la medida sin contacto facilitando su implementación industrial. Así, el objetivo general del presente trabajo fue determinar la viabilidad del uso de los ultrasonidos sin contacto para la caracterización de textura y cambios composicionales durante el salado de filetes de lomo de vacuno comparándolo con las tecnologías ultrasónicas por contacto.

Para alcanzar el objetivo de este trabajo, se han realizado medidas ultrasónicas con contacto (1 MHz) y sin contacto (380 kHz) en filetes de vacuno previamente descongelados. Las muestras se han sometido a diferentes tiempos de salado en seco desde 1 a 24 h. Se determinaron parámetros ultrasónicos de interés como son la velocidad ultrasónica, a partir de la variación del tiempo de vuelo, y la amplitud máxima de la señal tanto para las medidas por contacto como sin contacto. El proceso de salado se caracterizó mediante la evolución de diferentes parámetros físico-químicos como son el contenido de cloruros, humedad, actividad y capacidad de retención de agua y diferentes parámetros texturales, como dureza y capacidad de relajación. Finalmente, se establecieron relaciones entre los parámetros ultrasónicos y los cambios en los contenidos de sal, humedad y los parámetros texturales.

Los resultados experimentales han puesto de manifiesto que los parámetros ultrasónicos obtenidos de ambas técnicas utilizadas han demostrado ser sensibles al proceso de salado de filetes de vacuno y los cambios composicionales y texturales asociados. De este modo, la velocidad obtenida con ultrasonidos por contacto se relacionó de forma satisfactoria con el contenido de sal ( $R^2=0,898$ ), humedad ( $R^2=0,903$ ) y la dureza ( $R^2=0,813$ ) a partir de modelos lineales. El ratio de variación de tiempo de vuelo obtenido con ultrasonidos sin contacto entre las muestras saladas y frescas se relacionó con el contenido de sal y humedad ( $R^2=0,697$ ), capacidad de relajación ( $R^2=0,788$ ) y dureza ( $R^2=0,936$ ). Además, el ratio de amplitud para las señales de muestras saladas y frescas obtenido con ultrasonidos sin contacto presentó una relación satisfactoria con el contenido de humedad ( $R^2=0,773$ ) y sal ( $R^2=0,805$ ). Finalmente, se puede concluir que los ultrasónicos sin contacto pueden considerarse como una técnica con enorme potencial para ser aplicada en las líneas de producción y caracterizar el contenido de sal de productos cárnicos crudo-curados y su textura.

**Palabras claves:** salado; vacuno; ultrasonidos; textura; parámetros físico-químicos; medidas no-destructivas.

## RESUM

En els últims anys, el sector agroalimentari ha mostrat un interès creixent pel desenvolupament de mètodes i tecnologies capaços de controlar i monitoritzar de forma no invasiva i a temps real paràmetres de qualitat a nivell de la línia de producció d'aquesta manera un aspecte íntimament lligat a el moviment de la Indústria 4.0. En aquest context, les tecnologies ultrasòniques representen una alternativa de baix cost per a la caracterització d'aliments en les línies de producció. En concret, les tecnologies ultrasòniques convencionals per contacte s'han utilitzat amb èxit per a la caracterització de tant la composició com les propietats texturals de diferents productes carnis, com són la sobrassada i el pernil curat. No obstant això, el seu ús a nivell industrial s'ha vist dificultat per la necessitat de l'contacte entre la mostra i els transductors. Per contra, l'ús de noves tecnologies ultrasòniques amb acoblament per aire permeten realitzar la mesura sense contacte facilitant la seva implementació industrial. Així, l'objectiu general de el present treball va ser determinar la viabilitat de l'ús dels ultrasons sense contacte per a la caracterització de textura i canvis composicionals durant el salat de filets de llom de boví comparant-lo amb les tecnologies ultrasòniques per contacte.

Per assolir l'objectiu d'aquest treball, s'han realitzat mesures ultrasòniques amb contacte (1 MHz) i sense contacte (380 kHz) en filets de boví prèviament descongelats. Les mostres s'han sotmès a diferents temps de salat en sec des de 1 a 24 h. Es van determinar paràmetres ultrasònics d'interès com són la velocitat ultrasònica, a partir de la variació de el temps de vol, i l'amplitud màxima del senyal tant per a les mesures per contacte com sense contacte. El procés de salat es va caracteritzar mitjançant l'evolució de diferents paràmetres fisicoquímics com són el contingut de clorurs, humitat, activitat i capacitat de retenció d'aigua i diferents paràmetres texturals, com duresa i capacitat de relaxació. Finalment, es van establir relacions entre els paràmetres ultrasònics i els canvis en els continguts de sal, humitat i els paràmetres texturals.

Els resultats experimentals han posat de manifest que els paràmetres ultrasònics obtinguts de les dues tècniques utilitzades han demostrat ser sensibles a el procés de salat de filets de boví i els canvis composicionals i texturals associats. D'aquesta manera, la velocitat obtinguda amb ultrasons per contacte es va relacionar de forma satisfactòria amb el contingut de sal ( $R^2 = 0,898$ ), humitat ( $R^2 = 0,903$ ) i la duresa ( $R^2 = 0,813$ ) a partir de models lineals. La ràtio de variació de temps de vol obtingut amb ultrasons sense contacte entre les mostres salades i fresques es va relacionar amb el contingut de sal i humitat ( $R^2 = 0,697$ ), capacitat de relaxació ( $R^2 = 0,788$ ) i duresa ( $R^2 = 0,936$ ). A més, la ràtio d'amplitud per als senyals de mostres salades i fresques obtingut amb ultrasons sense contacte presentar una relació satisfactòria amb el contingut d'humitat ( $R^2 = 0,773$ ) i sal ( $R^2 = 0,805$ ). Finalment, es pot concloure que els ultrasònics sense contacte poden considerar-se com una tècnica amb enorme potencial per ser aplicada en les línies de producció i caracteritzar el contingut de sal de productes carnis cru-curats i la textura.

**Paraules claus:** salat; boví; ultrasons; textura; paràmetres fisicoquímics; mesures no-destructives.

## ABSTRACT

In recent years, the agri-food sector has shown growing interest in the development of methods and technologies capable of controlling and monitoring in a non-invasive way and in real time quality parameters at the level of the production line, this being an aspect closely linked to movement of Industry 4.0. In this context, ultrasonic technologies represent a low-cost alternative for the characterization of food in production lines. Specifically, conventional contact ultrasonic technologies have been used successfully to characterize both the composition and the textural properties of different meat products, such as sobrasada and cured ham. However, its use at an industrial level has been hampered by the need for contact between the sample and the transducers. On the contrary, the use of new ultrasonic technologies with air coupling allow the measurement to be carried out without contact, facilitating its industrial implementation. Thus, the general objective of the present work was to determine the feasibility of using non-contact ultrasound for the characterization of texture and compositional changes during the salting of beef loin fillets, comparing it with contact ultrasonic technologies.

To achieve the objective of this work, contact (1 MHz) and non-contact (380 kHz) ultrasonic measurements have been performed on previously thawed beef fillets. The samples have been subjected to different dry salting times from 1 to 24 h. Ultrasonic parameters of interest were determined such as the ultrasonic speed, from the variation of the flight time, and the maximum amplitude of the signal for both contact and non-contact measurements. The salting process was characterized by the evolution of different physical-chemical parameters such as chloride content, humidity, activity and water retention capacity and different textural parameters, such as hardness and relaxation capacity. Finally, relationships were established between the ultrasonic parameters and the changes in the content of salt, moisture and textural parameters.

The experimental results have shown that the ultrasonic parameters obtained from both techniques used have shown to be sensitive to the salting process of beef fillets and the associated compositional and textural changes. In this way, the speed obtained with contact ultrasound was satisfactorily related to the salt content ( $R^2 = 0,898$ ), humidity ( $R^2 = 0,903$ ) and hardness ( $R^2 = 0,813$ ) from linear models. The ratio of variation in flight time obtained with non-contact ultrasound between salty and fresh samples was related to salt and moisture content ( $R^2 = 0,697$ ), relaxation capacity ( $R^2 = 0,788$ ) and hardness ( $R^2 = 0,936$ ). In addition, the amplitude ratio for the signals of salty and fresh samples obtained with non-contact ultrasound showed a satisfactory relationship with the moisture content ( $R^2 = 0,773$ ) and salt ( $R^2 = 0,805$ ). Finally, it can be concluded that non-contact ultrasonics can be considered as a technique with enormous potential to be applied in production lines and characterize the salt content of raw-cured meat products and their texture.

**Keywords:** salty; bovine; ultrasounds; texture; physico-chemical parameters; non-destructive measures.



## ÍNDICE

<b>1. Introducción</b> .....	<b>1</b>
1.1. Importancia del proceso de salado en la industria cárnica .....	1
1.2. Proceso de curado de la cecina .....	1
1.3. Modificaciones composicionales y texturales asociadas al salado de la carne	2
1.3.1. Influencia del salado de la carne en el contenido de humedad, actividad de agua y capacidad de retención de agua .....	3
1.3.2. Efecto del proceso salado de la carne en su textura .....	4
1.4. Métodos para la caracterización de productos cárnicos .....	4
1.4.1. Métodos destructivos .....	4
1.4.2. Métodos no destructivos .....	6
1.5. Ultrasonidos .....	8
1.5.1. Descripción .....	8
1.5.2. Ultrasonidos de señal o baja intensidad .....	8
1.5.3. Aplicación de ultrasonidos en tecnología de alimentos o industria alimentaria .....	10
<b>2. Objetivos</b> .....	<b>1</b>
<b>3. Material y métodos</b> .....	<b>14</b>
3.1. Materia prima .....	14
3.2. Salado .....	14
3.2.1. Acondicionamiento de las muestras post salado .....	15
3.3. Análisis ultrasónico .....	15
3.3.1. Ultrasonidos con contacto .....	16
3.3.2. Ultrasonidos sin contacto .....	17
3.4. Análisis de textura .....	19
3.4.1. Ensayo compresión-relajación .....	19
3.4.2. Determinación de parámetros texturales .....	20
3.5. Análisis físico-químicos .....	21
3.5.1. Determinación del contenido de cloruros .....	21
3.5.2. Determinación de la humedad .....	22
3.5.3. Determinación de la actividad de agua .....	22
3.5.4. Determinación del contenido en grasa .....	23
3.5.5. Determinación de la capacidad de retención de agua .....	23
3.6. Análisis estadístico .....	24
<b>4. Resultados y discusión</b> .....	<b>25</b>

4.1.	Cambios composicionales durante el salado .....	25
4.2.	Evolución de parámetros texturales durante el salado .....	27
4.3.	Encogimiento durante el salado .....	29
4.4.	Evolución de parámetros ultrasónicos durante el salado .....	30
4.4.1.	Ultrasonidos con contacto.....	30
4.4.2.	Ultrasonidos sin contacto.....	31
4.5.	Relación entre parámetros ultrasónicos y físico-químicos durante el salado.	34
4.5.1.	Ultrasonidos con contacto.....	34
4.5.2.	Ultrasonidos sin contacto.....	35
<b>5.</b>	<b>Conclusiones .....</b>	<b>38</b>
	<b>Bibliografía .....</b>	<b>39</b>

## ÍNDICE TABLAS

<b>Tabla 1.</b>	Parámetros físico-químicos analizados en los distintos tiempos de salado de los filetes vacuno. ....	25
<b>Tabla 2.</b>	Resultados de la medida del espesor (h) y encogimiento de los filetes de vacuno durante los distintos tiempos de salado. ....	30
<b>Tabla 3.</b>	Influencia de la medida del espesor en el cálculo de la velocidad ( <b>Ec. 2</b> ) para un filete de vacuno fresco. Se utilizó una variación de tiempo de vuelo de $-3.249 \mu\text{s}$ y una velocidad de aire de 343 m/s. ....	32

## ÍNDICE FIGURAS

<b>Figura 1.</b>	Diagrama del proceso de elaboración de cecina .....	2
<b>Figura 2.</b>	Filete de lomo de vacuno empleado en los análisis experimentales: a) Congelado y etiquetado, b) Descongelado (4°C). ....	14
<b>Figura 3.</b>	Salado en seco filete de lomo de vacuno.....	14
<b>Figura 4.</b>	Acondicionamiento del filete de lomo de vacuno post salado. ....	15
<b>Figura 5. a)</b>	Configuración experimental ultrasónica con contacto. <b>b)</b> Medida ultrasónica con contacto de un filete de vacuno. ....	17
<b>Figura 6.</b>	Muestra de referencia (emisor-receptor) y transmitida a través de una muestra de filete salado 1 h obtenida mediante la técnica de ultrasónica con contacto.....	17
<b>Figura 7. a)</b>	Esquema de la configuración ultrasónica sin contacto. <b>b)</b> Medida ultrasónica sin contacto de filete de lomo de vacuno salado durante 1h.....	19
<b>Figura 8.</b>	Muestra de referencia (emisor-receptor) y transmitida a través de una muestra de filete salado 2 h obtenida mediante la técnica de ultrasónica sin contacto. ....	19

<b>Figura 9.</b> Análisis instrumental de textura mediante ensayo de compresión-relajación (1 mm/s, 20% deformación). <b>a)</b> Texturómetro y sonda utilizada, <b>b)</b> Detalle del modo de realización del ensayo. ....	20
<b>Figura 10.</b> Curva característica del ensayo textural de compresión-relajación. Punto 1: Fuerza máxima registrada. Punto 2: Fuerza a los 15 s de relajación. ....	21
<b>Figura 11. a)</b> Evolución del contenido de humedad (W) y sal en filetes de vacuno salados. Se muestra el valor medio y los intervalos LSD de Fisher (95 %); <b>b)</b> Relación entre el contenido de sal y humedad (W) en filetes de vacuno salados. ....	26
<b>Figura 12.</b> Relación entre la capacidad de retención de agua (CRA) y el contenido de sal para filetes de vacuno salados. ....	26
<b>Figura 13.</b> Evolución durante el salado de los filetes de vacuno de <b>a)</b> dureza ( $F_{max}$ ) y <b>b)</b> capacidad de relajación total (CRT). Se muestran los valores medios y los intervalos LSD de Fisher (95 %). ....	28
<b>Figura 14.</b> Relación entre la capacidad de relajación total y el porcentaje capacidad de retención de agua durante el salado de los filetes de vacuno. ....	29
<b>Figura 15.</b> Evolución de la velocidad ultrasónica mediante el método con contacto durante el salado de los filetes de vacuno. Se muestra el valor medio y los intervalos LSD de Fisher (95 %).	
<b>Figura 16.</b> Evolución del ratio de la variación del tiempo de vuelo de la señal ultrasónica calculado a partir de los método sin y con contacto durante el salado de los filetes de vacuno. Se muestra el valor medio y los intervalos LSD de Fisher (95 %). ....	33
<b>Figura 17.</b> Evolución del ratio de amplitud máxima de la señal ultrasónica sin contacto entre filetes salados y frescos de lomo de vacuno. Se muestra el valor medio y los intervalos LSD de Fisher (95 %). ....	33
<b>Figura 18.</b> Relación de la velocidad ultrasónica medida por contacto con el contenido de humedad (W) ( <b>a</b> ) y sal ( <b>b</b> ). ....	34
<b>Figura 19.</b> Relación entre la velocidad ultrasónica por contacto y la dureza ( $F_{max}$ ) del filete de vacuno salado. ....	35
<b>Figura 20.</b> Evolución del ratio de la variación del tiempo de vuelo de la señal ultrasónica en función del contenido de W ( <b>a</b> ) y del contenido de sal ( <b>b</b> ) durante el salado de los filetes de vacuno. ....	36
<b>Figura 21.</b> Relación entre el ratio de variación de tiempo de vuelo del filete fresco y salado medido sin contacto con la dureza ( $F_{max}$ ) ( <b>a</b> ) y la capacidad de relajación total (CRT) ( <b>b</b> ) ....	37
<b>Figura 22.</b> Relación del ratio de amplitud máxima de la señal ultrasónica sin contacto entre filetes salados y frescos de lomo de vacuno con la humedad (W) ( <b>a</b> ) y el contenido de sal ( <b>b</b> ). ....	37

## **1. Introducción**

### **1.1. Importancia del proceso de salado en la industria cárnica**

La salazón es una de las etapas más relevantes en el procesamiento de productos cárnicos curados en seco, ya que la sal (NaCl) inhibe los patógenos transmitidos por los alimentos y el crecimiento de bacterias de deterioro (Liu et al., 2013), además de intervenir en los cambios de textura y sabor de la carne (Larrea et al., 2006). En concreto la sal es esencial para solubilizar las proteínas musculares y poder así alcanzar la calidad sensorial esperada de los productos cárnicos curados (Martin, 2012). Además, en el proceso de salado, la carne fresca se estabiliza debido a un efecto combinado de la ganancia de sal y pérdida de agua. Por lo tanto, la sal se considera un ingrediente multifuncional que afecta tanto a nivel de seguridad alimentaria como de calidad (De Prados, Garcia-Perez y Benedito, 2016).

En este proceso es importante considerar tanto la calidad como la cantidad de sal a utilizar. Puesto que este ingrediente debe de ser de calidad alimentaria para evitar la presencia de metales (cobre, hierro y cromo) que puedan acelerar el desarrollo de la oxidación de lípidos y la rancidez en las carnes curadas (Andersen y Skibsted 1991). Por otro lado, la cantidad de sal utilizada en salmueras y mezclas secas puede variar considerablemente, siendo generalmente el nivel de sal autolimitante. Los niveles extremos de sal hacen que el producto sea demasiado salado, mientras que bajas concentraciones de este compuesto puede resultar en una modificaciones inadecuadas de las proteínas. La mayoría de las salmueras de curado van desde 35 ° a 85 ° en el salómetro, un hidrómetro graduado para mostrar el grado de saturación de las salmueras (Townsend y Olson 1987).

### **1.2. Proceso de curado de la cecina**

El proceso de curado de la cecina sigue una serie de etapas (Figura 1) muy similares a las del proceso del jamón curado. En primer lugar, las piezas de vacuno se acondicionan (sangrado, perfilado, etc.). Después, las piezas son sometidas a un proceso de selección que consiste en la clasificación de las mismas según su aspecto externo, peso, pH, y raza y edad del animal (Ventanas, 2001). A continuación, las piezas aptas para el procesado, se someten a una fase de salado en la que se incorpora sal común (NaCl) y sales nitrificantes (nitratos y nitritos) (De Prados, 2016). El sistema tradicionalmente utilizado es el salado en seco en pila, que consiste en cubrir la superficie de las piezas con sal humectada y hacer capas alternas de sal/pieza vacuno (Zumalacarregui, 1997; Ventanas, 2003). Durante el salado se controlarán parámetros como la temperatura (2-5 °C) y la humedad relativa (80-90%) de la cámara de curado, para favorecer la solubilización de la sal y difusión al interior y limitar el crecimiento microbiano (De prados, 2016). Las piezas de carne de vacuno se someten a estas condiciones de salado en función de su peso (0,3-0,6 días/kg peso) (Clemente, 2014).

Tras el salado, las piezas se lavan para eliminar el exceso de sal y pasan a un proceso de asentamiento o post-salado durante 30-40 días. La pieza se cuelga al aire

controlando que la temperatura sea lo más baja posible (3-4 °C) y una humedad relativa del 75-80% (De Prados, 2016). Esta fase de post-salado tiene por finalidad eliminar el agua de constitución, hacer penetrar la sal de una manera homogénea y uniforme, favorecer el desarrollo de la microflora característica y canalizar los procesos bioquímicos de hidrólisis enzimática que producirán el aroma y sabor característicos (Clemente, 2014). A continuación, se podrán ahumar las piezas, utilizando para ello leña de roble o encina. La duración de esta fase estará comprendida entre los 12 y 16 días. (Clemente, 2014). Finalmente, se colgarán las piezas en secaderos en la fase de secado o curación y se procederá a la clasificación de las piezas según peso y conformación. La temperatura a la que se encuentra el producto en esta fase es de entre 10-12 °C y una humedad del 75-80%. El tiempo de curación de la cecina depende del peso y del porcentaje de materia grasa de las piezas en fresco y va de 7 a 22 meses (Clemente, 2014).

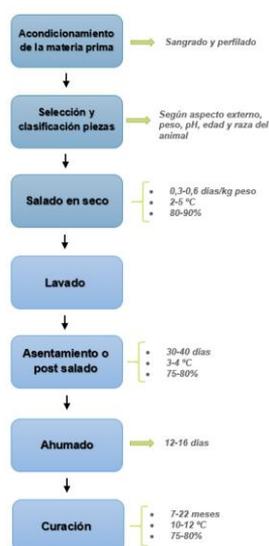


Figura 1. Diagrama del proceso de elaboración de cecina

### 1.3. Modificaciones composicionales y texturales asociadas al salado de la carne

El cloruro de sodio (NaCl) es el componente más importante en el proceso de elaboración de productos cárnicos curados (jamón serrano, jamón de Parma, cecina, etc.) por su papel clave en parámetros de calidad como son la capacidad de retención de agua (CRA) y la actividad del agua ( $a_w$ ). Además, tiene un papel central en los fenómenos de proteólisis y lipólisis y, por tanto, en la vida útil del producto (Molinero et al., 2008; Inguglia et al., 2017). Los fenómenos de proteólisis y lipólisis en la carne son los mecanismos más importantes con consecuencias en la calidad sensorial (como textura, aroma y sabor) (Lorenzo et al., 2015).

Aunque la oxidación de lípidos generalmente tiene efectos negativos sobre la carne y los productos cárnicos, en algunos casos contribuye al desarrollo de agradables aromas. De hecho, se considera que los compuestos derivados de la oxidación de lípidos juegan un papel importante en el desarrollo del aroma típico de los productos cárnicos durante la maduración o curado en seco, que es uno de los atributos más apreciados por los consumidores (Vargas-Ramella et al., 2021).

### **1.3.1. Influencia del salado de la carne en el contenido de humedad, actividad de agua y capacidad de retención de agua**

Durante la fase inicial del curado (proceso de salado) de vacuno, el agua gotea intensamente de la pieza disolviendo la sal que la envuelve, que difunde después hacia el interior del músculo (Toldrá, 2002). En las últimas etapas del proceso de curado, las pérdidas de agua se deben a las pérdidas de agua superficial y al equilibrio que se produce en el interior de la pieza de ternera. Este fenómeno de reequilibrio entre el agua de la pieza y la sal de curado es el conocido fenómeno de difusión pasiva, ósmosis.

Parámetros de calidad como la actividad de agua ( $a_w$ ) y la capacidad de retención de agua (CRA) permiten describir y predecir los efectos físico-químicos generados en los productos cárnicos tras el proceso de salado. En concreto, se entiende por actividad de agua a la medida de la disponibilidad de agua, o la relación entre la presión del vapor de agua en la muestra y la presión del vapor de agua del agua pura a la misma temperatura (Young, Frost y Agnew, 2012). Este parámetro se mide en un rango de 0 (sin agua libre) a 1 (agua libre predominante). Los ingredientes presentes en los productos cárnicos, como la sal, los azúcares y los fosfatos, dan como resultado una  $a_w$  más baja para el producto que para la carne fresca ( $a_w \cong 0,97$ ). Para muchos productos, una  $a_w$  reducida es importante para su conservación porque los microorganismos no crecerán por debajo de ciertos niveles de  $a_w$  (Rahman y Labuza 2007), variando según el tipo de microorganismo (Young, Frost y Agnew, 2012).

La capacidad de retención de agua es un parámetro de calidad importante que condiciona la calidad tecnológica del producto cárnico. La CRA se define como la capacidad que tiene la carne para retener el agua dentro de su estructura, al ser sometida a un tratamiento o fuerza externa (corte, calentamiento, prensado, etc.). La CRA juega un papel determinante en el rendimiento de muchos procesos de elaboración. Al mismo tiempo, condiciona también las propiedades sensoriales y de textura del producto, como la ternura, jugosidad o color (Álvarez y Romero, 2018). El contenido de sal tiene una influencia clara y definida sobre la capacidad de retención de agua en carne (Offer & Knight, 1983). De hecho, una de las principales razones del uso de NaCl es aumentar la capacidad de retención de agua de productos de carne y pescado (Offer & Trinick, 1983), así como para incrementar el rendimiento del proceso y, por supuesto, para proporcionar un sabor salado. De este modo, a nivel tecnológico se buscan valores de pH cercanos valores al punto isoeléctrico (pI) de las proteínas de la carne (Warriss, 1982), ya que cambiando el pH del producto hacia valores alejados del pI es una forma válida de aumentar la capacidad de retención de agua (Hultin et al., 2010; Puolanne et al., 2001). Es así que, añadiendo cloruro sódico a la carne, se puede

cambiar el punto isoeléctrico hacia pH menores, dando lugar a un aumento de la capacidad de retención de agua (Schut, 1976).

### **1.3.2. Efecto del proceso salado de la carne en su textura**

Las proteínas musculares sufren una degradación intensiva (proteólisis), dando como resultado una cantidad considerable de péptidos pequeños y aminoácidos libres (Toldra' et al., 2000). Este fenómeno afecta a la textura de la pieza de ternera curada en seco (degradación de grandes proteínas citoesqueléticas y miofibrilares), así como el desarrollo de un sabor y aroma específicos (péptidos y aminoácidos). Los principales cambios proteolíticos se han atribuido a la acción de las endopeptidasas endógenas (catepsinas (CTS) B, D, H y L y, en menor medida, calpaínas) y exopeptidasas (peptidasas y aminopeptidasas) (Toldrá y Flores, 2000). La mayoría de estas enzimas retienen un considerable nivel de actividad durante el proceso, alterando la composición química del tejido muscular (es decir, generación de mayores cantidades de pequeños péptidos y aminoácidos libres) (Toldra' et al., 1992; Saraga et al., 1993; Toldra' et al., 1993; Parreño et al., 1994). Hasta cierto punto, la proteólisis es beneficioso para la calidad sensorial de la carne curada en seco; sin embargo, si el proceso es demasiado intensivo, puede provocar defectos sensoriales como una excesiva suavidad y pastosidad, acompañada de aromas y sabores desagradables (Parolari et al., 1988 y 1994; Virgili et al., 1995a; Arnau et al., 1998; Garcia-Garrido et al., 2000). Además de proteínas, músculo y tejido adiposo, los lípidos tisulares también están sujetos a degradación (lipólisis) por enzimas lipolíticas. La lipólisis genera ácidos grasos libres y numerosos compuestos aromáticos, volátiles y no volátiles, como resultado de la oxidación y reacciones posteriores como otras degradaciones que generan productos que aceleran el envejecimiento (Antequera et al., 1992; Barbieri et al., 1992; Ventanas y col., 1992; Buscailhon et al., 1994a y 1994b; Ruiz y col., 1999). Condiciones dentro del músculo (pH, concentración de sal, contenido y disponibilidad de agua, temperatura, etc.) son los factores clave que afectan la actividad enzimática y, como consecuencia, la calidad del producto final, es decir, un desarrollo de la textura y sabor característicos del producto (Čandek-Potokar, 2011).

## **1.4. Métodos para la caracterización de productos cárnicos**

### **1.4.1. Métodos destructivos**

Los métodos oficiales de análisis de AOAC International proporcionan métodos de referencia para el análisis de alimentos (AOAC 2010) (Young, Frost y Agnew, 2012). A continuación, se exponen los métodos destructivos más comunes en la caracterización de productos cárnicos:

- La humedad constituye alrededor del 70 al 77% del músculo crudo. El contenido de humedad disminuye a medida que aumenta el contenido de grasa de la carne

y puede ser notablemente más bajo en las carnes procesadas. La medición del contenido de humedad de la carne se determina mediante un método gravimétrico, determinando la pérdida de peso tras un secado en estufa de aire forzado por convección o en vacío, entre 70 °C y 125 °C durante 8-24 h (AOAC 950.46). Existen otros métodos de secado alternativos como son la luz infrarroja, ultravioleta o el uso de un horno microondas (AOAC 985.14) (Young, Frost y Agnew, 2012).

- El análisis de proteínas se basa principalmente en la determinación del contenido de aminoácidos en la muestra que, posteriormente, se transforma a cantidad de proteínas mediante un factor de conversión. El procedimiento tradicional para determinar el nitrógeno en los alimentos es el método Kjeldahl. La muestra se digiere a alta temperatura con ácido sulfúrico concentrado y catalizadores para convertir sustancias nitrogenadas en sales de amonio. La adición de álcali concentrado convierte las sales de amonio en amoníaco libre que se destila con vapor y se recoge en ácido clorhídrico (AOAC 928.08) o en una solución diluida de ácido bórico (AOAC 981.10) que contiene indicadores de pH de colores adecuados. Para aumentar el rendimiento del método, se utilizan equipos semiautomatizados para analizar la proteína por lotes de muestras (por ejemplo, AOAC 977.14). Un método alternativo y más rápido para determinar el nitrógeno proteico es el método Dumas que, por combustión, libera nitrógeno en oxígeno puro cambiando su conductividad térmica y así determinando el contenido total proteico (AOAC 992.15) (Young, Frost y Agnew, 2012).
- La determinación de grasa cruda, también conocida como extracto de éter o contenido de lípidos libres, es la medida tradicional de grasa en la carne y los productos cárnicos (AOAC 960.39; AOAC 991.36). Existen diferentes métodos específicos para cada tipo de tejido. El método de extracción más común para determinar el contenido total de grasa en diferentes tipos de muestras es el método Soxhlet, utilizando disolventes como hexano o éter de petróleo. Sin embargo, el método Folch se realiza principalmente en tejidos como el hígado, riñón y el cerebro mediante la adición de cloroformo. Por otro lado, Maxwell et al. (1980) introdujeron un método en el que la carne se muele con un agente desecante, sulfato de sodio anhidro. La mezcla se empaqueta en una columna de la que se eluyen los lípidos mediante cloruro de metileno (Young, Frost y Agnew, 2012).
- La ceniza es el residuo inorgánico que queda después de la combustión a alta temperatura (500–600 °C). El contenido de cenizas de la carne cruda es bajo y relativamente constante, pero puede variar mucho en los productos cárnicos procesados a los que se han añadido minerales como la sal y los fosfatos, y en la harina de carne y huesos extraídos. AOAC 920.153 está diseñado para carne y productos cárnicos (Young, Frost y Agnew, 2012).
- La carne cruda contiene muy pocos carbohidratos, que comprenden glucosa y fosfatos de azúcar, glucógeno residual y ácidos orgánicos que son intermediarios metabólicos, y el producto glicolítico terminal ácido láctico. En un análisis aproximado, el contenido de carbohidratos se estima por diferencia respecto a la grasa, proteína, humedad y cenizas (Young, Frost y Agnew, 2012).

- Los métodos para determinar el contenido en sal en carne son: método Volhard (ISO 1841-1-1996), método potenciométrico (ISO, 1841-2-1996; NMKL 178, 2004) y método volumétrico (AOAC 935.47-1987) (De Prados, 2016).
- Los métodos destructivos tradicionales, para determinar la textura, se basan en el empleo de un penetrómetro que simula el proceso de masticación y se considera una medida de la facilidad del primer mordisco entre los dientes. Se registran el trabajo y las curvas de fuerza-deformación y luego se pueden calcular la dureza, cohesión y gomosidad (Honikel 1997). Lepetit (1989) desarrolló un dispositivo de compresión modificado para evitar la deformación lateral y medir las propiedades mecánicas de las fibras musculares. Además, se desarrolló un penetrómetro modificado (Tendertec) como un procedimiento moderadamente invasivo para predecir la sensibilidad en las canales de res (Belk y otros 2001).

#### 1.4.2. Métodos no destructivos

Como alternativa a los métodos destructivos tradicionales de análisis se buscan métodos físicos no invasivos compatibles con el producto a analizar. De esta manera se obtienen resultados de manera más rápida, reduciendo el coste de mano de obra y permitiendo la automatización de sistemas. Estas tecnologías están basadas en las relaciones obtenidas entre los parámetros propios de la técnica y las características físico-químicas del alimento (De Prados, 2016). Como ejemplo de estas técnicas cabría citar las siguientes:

- La Resonancia Magnética Nuclear (RMN) se basa en el hecho de que la mayoría de los núcleos atómicos absorben energía en el rango de radiofrecuencias del espectro electromagnético (Damez et al., 2013). La Resonancia Magnética de Imagen (RMI) es una aplicación más compleja de RMN y proporciona una imagen de la estructura interna del alimento (De Prados, 2016). Estas técnicas han permitido la caracterización de la carne, en cuanto a su contenido en grasa, agua y sal. Así, Davenel et al. (2012) estimaron el contenido en grasa en carne de cerdo; y Maria et al. (2010) y Siciliano et al. (2013) determinaron la composición de ácidos grasos en carne de vacuno y de cerdo, respectivamente. La RMN y RMI también se han utilizado para describir la difusión y distribución de agua y sal en carne de cerdo durante su salado en salmuera (Vestergaard et al., 2005b). Además, Pérez-Palacios et al. (2010 y 2011) diferenciaron jamones frescos y curados provenientes de cerdos Ibéricos con distintos sistemas de alimentación (De Prados, 2016). Sin embargo, la aplicación de RMN y RMI en la industria alimentaria se ve limitada por la gran inversión en equipos, las exigentes medidas de seguridad, la difícil adaptación de la tecnología a las líneas de producción y la exigencia de operarios con elevada cualificación.
- La Espectroscopia de Infrarrojo Cercano (NIR) se basa en la absorción de energía por parte de un alimento como consecuencia de la vibración de sus

moléculas cuando interactúan con radiación electromagnética con una longitud de onda entre 780 y 2500 nm (De Prados, 2016). La NIR ha sido útil en la predicción del contenido en grasa y su composición en ácidos grasos en carne de vacuno (Wold et al., 2011), de cordero (Pullanagari et al., 2015) y de cerdo (Barlocco et al., 2006; Prevolnik et al., 2011; Gou et al., 2013); así como para estimar el contenido en agua y sal en salchichas de cerdo fermentadas (Collell et al., 2010), en *Biceps femoris* de jamones curados (Prevolnik et al., 2011) y en lonchas de jamón curado envasadas a vacío (Gou et al., 2013). Otros parámetros tecnológicos (color, pH, capacidad de retención de agua, actividad de agua, etc.) y atributos sensoriales (textura, olor, sabor, jugosidad, ternura, etc.) en una amplia variedad de productos cárnicos, también han sido predichos con esta tecnología (Prieto et al., 2009). Pero NIR presenta ciertas desventajas para su aplicación en industria alimentaria, como son el alto coste del equipo y compleja calibración; además de que su limitada capacidad de penetración solo permite un nivel de análisis superficial (De Prados, 2016).

- La aplicación de Rayos X para el análisis no destructivo se basa en la diferente atenuación de los Rayos X (radiación electromagnética con una longitud de onda de 0.01-10nm) que producen tejidos de diferentes densidades, permitiendo de esta manera diferenciar estructuras biológicas. Varias tecnologías de Rayos X se basan en este principio: radiografía de Rayos X, inspectores de Rayos X, absorciometría de Rayos X de doble energía (DEXA o DXA), tomografía computerizada (CT) y tomografía microcomputerizada (De Prados, 2016). De este modo, las tecnologías de Rayos X se han utilizado para determinar la composición (grasa y magro) de animales vivos, canales y piezas de carne fresca en vacuno (Brienne et al., 2001; Frisullo et al., 2010), cordero (Hunter et al., 2011) y cerdo (Brienne et al., 2001; Marcoux et al., 2003; Vester-Christensen et al., 2009; Picouet et al., 2010). Además, los Rayos X han demostrado ser una herramienta útil para estimar el contenido de agua y sal en el músculo Longissimus dorsi de cerdo (Vestergaard et al., 2004) y en jamones curados en las etapas iniciales de su procesado (Fulladosa et al., 2010) y en la etapa de secado (Santos-Garcés et al., 2010). También la difusión de la sal en el músculo Semimembranosus de cerdo (Picouet et al., 2013) y su distribución en jamones curados durante su salado (Vestergaard et al., 2005a; Håseth et al., 2012) también ha sido investigada con Rayos X. Fulladosa et al. (2015) evaluaron la capacidad de esta tecnología para monitorizar la ganancia de sal durante el salado en jamones curados. Pero los Rayos X presentan algunas desventajas como son la necesidad de la calibración del equipo para cada componente (grasa, sal, etc.) y matriz cárnica a analizar, una inversión inicial elevada y las medidas de seguridad necesarias para evitar riesgos para la salud de los operarios (De Prados, 2016).
- El uso de ultrasonidos como técnica de caracterización presenta una serie de ventajas respecto al empleo de otras nuevas tecnologías no destructivas, como son: la facilidad de implementación en entornos industriales, el bajo consumo de

energía, el bajo coste del equipamiento, la nula peligrosidad y no requerir operarios con alto grado de formación (De Prados, 2016). En el campo de la industria alimentaria ha suscitado un gran interés por sus múltiples aplicaciones en la mejora de la calidad y seguridad de los alimentos (Awad et al., 2012). A continuación, en este estudio, se detallará en profundidad el fundamento de esta técnica de caracterización no destructiva y/o no-invasiva.

## **1.5. Ultrasonidos**

### **1.5.1. Descripción**

La acústica es la ciencia que estudia las ondas mecánicas y puede dividirse en tres ramas principales según el espectro de frecuencias y las características del sistema auditivo humano: infrasonido, sonido y ultrasonido. En concreto, el ultrasonido cubre la amplia gama de ondas mecánicas con frecuencias superiores a 20 kHz hasta las frecuencias asociadas a longitudes de onda comparables a las distancias intermoleculares. Las ondas de ultrasonido son ondas muy cortas (longitudes de onda en el rango de milímetros a nanómetros) generalmente generadas por fuentes tecnológicas específicamente diseñadas. Además del rango de frecuencia, la intensidad de onda influye ampliamente en los fenómenos relacionados con la producción, propagación y aplicación de ondas acústicas. De esta forma, el ultrasonido puede dividirse en dos áreas, que tratan de baja y alta intensidad de onda.

Las aplicaciones en las que se utilizan ondas de ultrasonido como medio de exploración, detección de cambios o fenómenos y obtención de información constituyen el área de ultrasonido de baja intensidad o de señal, con frecuencias superiores a 100 kHz e intensidades menores de 1 W/cm<sup>2</sup>. Por otra parte, las aplicaciones en las que se utiliza la energía ultrasónica para producir cambios permanentes en el medio de propagación constituyen el área de ultrasonidos de alta intensidad o ultrasonidos de potencia, con frecuencias desde 20kHz hasta 100kHz (no suelen emplearse superiores puesto que supondría una mayor absorción de energía) e intensidades menores de 1 W/cm<sup>2</sup> (Gallego-Juarez, 2017).

### **1.5.2. Ultrasonidos de señal o baja intensidad**

Los US de señal o baja intensidad se han empleado para caracterizar diversos parámetros físico-químicos de los medios donde se propagan, sin provocar cambios en los mismos (Mulet et al., 1999; Scanlon, 2004; Awad et al., 2012). Determinando las propiedades de la onda, que viaja a través del material, se pueden relacionar sus parámetros (velocidad, frecuencia y amplitud) con las características fisicoquímicas del producto (Peñarrubia, 2014).

Las medidas ultrasónicas pueden llevarse a cabo fundamentalmente mediante dos técnicas: el modo transmisión-recepción y el modo pulso-eco. En el modo transmisión-recepción, se colocan dos transductores, cada uno en una de las caras opuestas del material a estudiar, uno de los transductores emite la señal ultrasónica mientras que el otro transductor recibe la onda transmitida a través del material. En el modo pulso-eco, se pueden utilizar dos transductores (emisor y receptor), ambos colocados en la misma cara del material o bien un solo transductor, el cuál actúa como emisor y receptor. En este último caso, el transductor genera la onda ultrasónica que viaja a través de la muestra, se refleja en la interfase muestra-medio y retorna al mismo transductor atravesando de nuevo el producto (Sánchez, 2018).

Los sistemas de US disponibles comercialmente para las distintas aplicaciones de procesamiento de alimentos se clasifican, en términos generales, en dos tipos de sistemas: con contacto y sin contacto (Charoux et al., 2017). En concreto, los US de contacto como su nombre indica, consisten en la transmisión de la onda ultrasónica desde el transductor emisor hasta el receptor pasando por la muestra que está plenamente en contacto con ambos transductores. Para ello, normalmente se emplean medios de acoplamiento como son el agua, el aceite y/o geles aplicados entre el transductor y la muestra para asegurar un adecuado acoplamiento (Kumari et al., 2018). Sin embargo, los US de contacto pueden plantear una serie de problemas, como la contaminación del alimento por el deterioro de las sondas (Kentish y Feng, 2014), así como por el contacto directo con el alimento que puede limitar su uso en diferentes industrias alimentarias. Como solución a esta limitación, se ha estado investigado sobre sondas hechas de materiales inertes que incluyen cuarzo, pyrex, cerámica, poliéter éter de cetona o el politetrafluoroetileno (Capelo-Martínez, 2009), además del desarrollo de los US sin contacto acoplados por aire que eliminan este principal problema.

En concreto, los US sin contacto son capaces de transmitir las ondas ultrasónicas al producto utilizando el aire como medio de acoplamiento (Charoux et al., 2017). Su campo de aplicación es extremadamente amplio y los diferentes usos exigen diferentes especificaciones en términos de capacidad de transmisión de energía, sensibilidad (SNS) o pérdidas de inserción, frecuencia central, ancho de banda de frecuencia (BW) y distribución espacial del campo radiado. Los transductores ultrasónicos acoplados por aire se pueden clasificar atendiendo a su frecuencia de trabajo (frecuencia central y ancho de banda) y potencia acústica transmitida, ya que estas características determinan en gran medida las aplicaciones que se pueden abordar y la tecnología de transductor más adecuada (Gomez Alvarez-Arenas, 2017). Se trata de una técnica novedosa y con gran potencia de aplicación a nivel industrial por su fácil aplicación para la monitorización de alimentos a nivel de línea de producción. Algunos ejemplos desarrollados son la caracterización textural del aguacate durante su proceso de maduración (Fariñas et al., 2021a) y de hamburguesas de cerdo (Fariñas et al., 2021b).

### 1.5.3. Aplicación de ultrasonidos en tecnología de alimentos o industria alimentaria

Varias investigaciones han opinado que la técnicas ultrasónicas conduce a un aumento del rendimiento del proceso y mejora los factores de calidad de los alimentos (Mohit Singla y Nandan Sit, 2021).

A continuación, en los siguientes apartados, se comentan algunas de las investigaciones realizadas sobre la aplicación de ultrasonidos para la caracterización de diferentes grupos de alimentos:

- **Aceites y grasas**

Los aceites y grasas son productos alimentarios importantes, ya que el tipo y la proporción en que se utilicen para la fabricación de alimentos (margarina, helados, chocolate, etc.) influyen en sus propiedades reológicas (densidad, viscosidad, temperatura de fusión, etc.) y organolépticas (sabor, color, etc.) (Martini et al., 2006). Por tanto, la caracterización de las propiedades físico-químicas de grasas y aceites vegetales es esencial para asegurar la calidad de sus productos derivados (De Prados, 2016). Características como el contenido, la densidad, la viscosidad, las transiciones de fase y el polimorfismo de las grasas, han sido evaluadas con ultrasonidos (Awad et al., 2012). Así, Sankarappa et al. (2005) estudiaron la relación entre la densidad y la medida de la velocidad ultrasónica en diferentes tipos de aceites comestibles (coco, girasol, cártamo, ricino y cacahuete). Benedito et al. (2002b) relacionaron las medidas ultrasónicas (velocidad y atenuación) y las propiedades físico-químicas (viscosidad y compuestos polares) del aceite de oliva virgen calentado a 200°C durante diferentes tiempos, para determinar mediante US la calidad del mismo durante la fritura. Otra de las aplicaciones más relevante de los US, es la monitorización de la cristalización de la grasa (Awad, 2004; Gan et al., 2006; Povey et al., 2009).

- **Productos lácteos**

Los productos lácteos son susceptibles de sufrir cambios durante el procesado. Es por eso que los US se han empleado principalmente en la monitorización y control de calidad de los productos lácteos (leche, queso, yogur, etc.), relacionando los parámetros ultrasónicos con las variaciones de sus propiedades físico-químicas durante el procesado y almacenamiento (Mohammadi et al., 2014). Así, Koc et al. (2008) utilizaron los US para monitorizar el proceso de cuajado de la leche entera, que posteriormente se utilizaba para la fabricación de quesos; y Gan et al. (2006) monitorizaron el proceso de coagulación de productos a base de leche (bebida láctea con sabor a fresa y a plátano) mediante medidas ultrasónicas sin contacto. Los US de señal también se han utilizado para estimar la composición de helados (Bahram-Parvar, 2015) y de quesos frescos y curados (Benedito et al., 2002a; Telis-Romero et al., 2011). Por último, algunas de las aplicaciones se han enfocado a la detección de defectos en queso (agujeros, grietas etc.) (Benedito et al., 2001b y 2002a; Leemans et al., 2009) y de cuerpos

extraños (plásticos, cristal, madera, piedras o metal) en leche y yogur (Chandrapala et al., 2012).

- **Productos derivados de cereales**

Respecto a los productos derivados de cereales, los US se han empleado para evaluar la calidad de los mismos. De este modo, Alava et al. (2007) demostraron que los parámetros ultrasónicos (velocidad y atenuación) permiten diferenciar tipos de harina. Por su parte, Gómez et al. (2008) y Elfawakhry et al. (2013) mostraron el potencial de los US para caracterizar las propiedades físicas (densidad, reológicas, etc.) de masas de bizcocho y masas panarias, respectivamente. También, Elmehdi et al. (2003) emplearon los US para evaluar la estructura de la miga del pan. La caracterización online del proceso de fermentación de masas panarias también se ha abordado mediante el uso de técnicas ultrasónicas (Skaf et al., 2009). Por último, destacar el empleo de una técnica de velocidad ultrasónica de rápida transmisión y bajo coste para monitorizar cambios en la consistencia de la masa de harina de trigo, inducidos por proteínas, y gelatinización del almidón (García-Álvarez, Salazar y Rosell, 2011).

- **Productos vegetales**

Respecto a los productos vegetales, la mayor parte de los estudios se han centrado en buscar relaciones entre los parámetros ultrasónicos (velocidad, atenuación e impedancia acústica) y la firmeza/textura/madurez de frutas como el aguacate, mango, tomate, ciruela, manzana, pera y naranja (Mizrach et al., 1996; Mizrach, 2000; Mizrach, 2004; Camarena et al., 2006; Mizrach, 2007; Kim et al., 2009; Morrison et al., 2014). Los US también se han utilizado para evaluar cambios bioquímicos en zumos. Así, los parámetros ultrasónicos se han utilizado para determinar el contenido en diferentes azúcares (fructosa, glucosa, sacarosa...) en zumo de mango (Valente et al., 2013) y el contenido de azúcar y la viscosidad en zumo de naranja reconstituido (Kuo et al., 2008).

- **Carne**

Las aplicaciones de los US en la industria cárnica comenzaron a desarrollarse en las granjas y mataderos (De Prados, 2016). Así, los ultrasonidos se han empleado para predecir el porcentaje de grasa intramuscular y tejido magro, el espesor de la grasa dorsal y de los músculos, entre otros aspectos de calidad, en animales vivos, canales y músculos de cerdo (Newcom et al., 2002; Môrlein et al., 2005; Koch et al., 2011a; Koch et al., 2011b; Lakshmanan et al., 2012; Ayuso et al., 2013), cordero (Ribeiro et al., 2008; Thériault et al., 2009; Emenheiser et al., 2010) o vaca (Miles et al., 1987; Whittaker et al., 1992; Faulkner et al., 1990; Peña et al., 2014; Emenheiser et al., 2014; Scholz et al., 2015), entre otros. Otra de las utilidades ha sido la realización de medidas ultrasónicas en cerdos ibéricos vivos para evaluar el peso del jamón y la paleta (Ayuso et al., 2013).

En cuanto a productos cárnicos frescos, Miles et al. (1977) obtuvieron una buena correlación entre la velocidad ultrasónica y el contenido en grasa en músculos, tejido

adiposo y mezclas cárnicas (grasa y magro) de carne de vacuno, tanto fresca como congelada. Dwyer et al. (2001) y Swatland (2001) emplearon los US para detectar cambios de textura en carne de vacuno en animales viejos y sometidos a estrés, respectivamente. O también, Benedito et al. (2001a) estimaron la composición (grasa, agua, proteínas y otros compuestos) en mezclas cárnicas frescas de cerdo (tejido magro y graso) con medidas de velocidad ultrasónica a dos temperaturas diferentes.

Cabe añadir que una de las aplicaciones ultrasónicas más prometedoras en la industria cárnica es la monitorización online de propiedades físico-químicas de alimentos cárnicos durante su procesado (De Prados, 2016). Así, Sigfusson et al. (2004) monitorizaron el proceso de congelación de carne congelada de pollo y vacuno mediante US, estimando el porcentaje de carne congelada. En productos cárnicos de cerdo, Santacatalina et al. (2011) y Corona et al. (2014a) usaron los US para monitorizar el proceso de cristalización de la manteca de cerdo ibérico y grasa fresca ibérica durante su almacenamiento a baja temperatura. O Miota (2016) estudió la monitorización del salado y post-salado del lomo de cerdo.

Por último, el desarrollo de la tecnología US ha permitido abordar el estudio de distintos productos curados. Simal et al. (2003) y Llull et al. (2002) estimaron la composición (grasa, agua, proteínas y otros compuestos) y la textura de la sobrasada mediante medidas de velocidad a diferentes temperaturas. Se ha determinado el contenido en grasa y agua a través de la medida de la velocidad ultrasónica en productos formulados crudo-curados (Corona et al., 2014b) y en lonchas de jamón curado ibérico (Corona et al., 2013a). Mediante las medidas de US se caracterizó y clasificó grasa subcutánea curada y productos formulados crudo-curados procedente de carnes de cerdo ibérico, según el origen genético (ibérico puro y cruces) y sistema de alimentación (bellota o montanera y cebo con concentrados alto y bajo oleico) de los animales (Niñoles et al., 2008; Corona et al., 2014b). Por otra parte, los US también permiten evaluar el comportamiento de fusión de la grasa ibérica curada (Niñoles et al., 2010). Recientemente, Nowak et al. (2015) compararon propiedades mecánicas estimadas con medidas de US y determinadas con medidas convencionales (test compresión) en salchichas curadas, concluyendo que no existían diferencias significativas entre los dos métodos (US y método convencional) utilizados. O De Prados (2016) estudió los cambios composicionales del jamón curado durante su procesado con US. También Contreras et al. (2020) investigaron sobre la pastosidad y textura de jamón serrano. Y más recientemente, Fariñas et al. (2021b) detectaron mediante ultrasonidos sin contacto cambios texturales en hamburguesas de cerdo a consecuencia de su composición (diferentes contenidos de grasa) y temperatura (temperatura de consumo y temperatura de refrigeración o fábrica).

## 2. Objetivos

El objetivo general del presente trabajo fue determinar la viabilidad del uso de los ultrasonidos sin contacto para la caracterización de textura y cambios composicionales durante el salado de filetes de lomo de vacuno comparándolo con las tecnologías ultrasónicas por contacto.

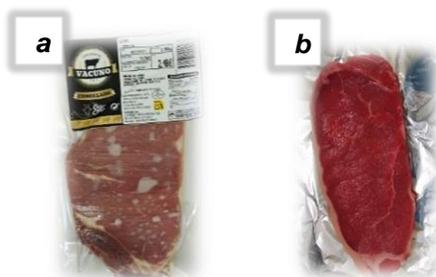
Para la consecución del objetivo general, se plantearon los siguientes objetivos específicos:

1. Analizar la evolución del contenido de sal y humedad durante el proceso de salado de filetes de lomo de vacuno.
2. Determinar cómo durante el proceso de salado se modifican las propiedades texturales, así como otras propiedades físicas-químicas como la actividad de agua y la capacidad de retención de agua.
3. Determinar los parámetros ultrasónicos de interés como son la velocidad ultrasónica, a partir del tiempo de vuelo, y la amplitud máxima de la señal tanto para las medidas por contacto como sin contacto.
4. Establecer relaciones entre los parámetros ultrasónicos y los parámetros composicionales y físico-químicos.

### 3. Material y métodos

#### 3.1. Materia prima

La materia prima que se ha empleado para llevar a cabo este trabajo experimental son filetes de lomo de vacuno (Elaborados cárnicos Medina S.A.U, Valencia) (Figura 2). Los filetes empleados en el experimento presentaron un peso medio de  $199,08 \pm 24,25$  g y un espesor medio de  $11,81 \pm 0,93$  mm. Antes de realizar las experiencias de salado, los filetes se descongelaron a 4 °C durante 12 h.

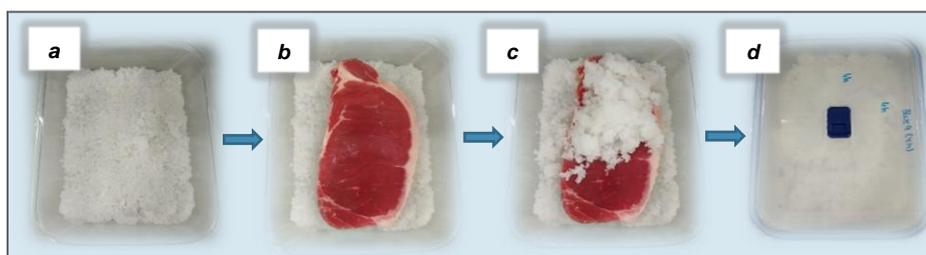


**Figura 2.** Filete de lomo de vacuno empleado en los análisis experimentales: a) Congelado y etiquetado, b) Descongelado (4°C).

#### 3.2. Salado

El salado de los filetes de lomo de vacuno se llevó a cabo mediante un proceso de salado en seco con sal parcialmente hidratada (10%) (Garcia-Perez et al., 2019). Se utilizó un ratio de 5 kg de sal por kg de muestra (Dinçer and Erbas., 2018) utilizando sal gruesa (Salinas del Odiel S.L., España).

El proceso de salado de los filetes de lomo de vacuno se inició con el registro de los pesos de los filetes descongelados para su posterior salado y control de peso durante el proceso. Posteriormente, una vez humectada con agua destilada, un 10% del peso de la sal empleada (Garcia-Perez et al., 2019) y homogeneizada, se colocó en un recipiente de vidrio cubriendo totalmente el fondo (Figura 3a), donde se colocó el filete (Figura 3b) y se cubrió por completo con el resto de sal (Figura 3c). Finalmente, se cerró el recipiente de vidrio de forma hermética (Figura 4d) y se almacenó a 4 °C. Se salaron muestras a diferentes tiempos (1, 2, 4, 8 y 24 h) y se realizaron 3 repeticiones en todos los casos. Así, en total, se utilizaron 15 filetes que se salaron y 3 más que se utilizaron como controles para las determinaciones analíticas.



**Figura 3.** Salado en seco filete de lomo de vacuno

### 3.2.1. Acondicionamiento de las muestras post salado

El análisis de ultrasonidos y textura, así como el resto de las determinaciones físico-químicas, se realizaron tras un acondicionamiento previo de cada filete de lomo de vacuno. Así, a cada tiempo de salado seleccionado, se extrajeron los recipientes de refrigeración con cada una de las muestras (Figura 4a). Posteriormente, se retiró el exceso de sal de manera cuidadosa (Figura 4b) y se lavaron superficialmente para eliminar los restos de sal más finos (Figura 4c). Finalmente, con papel absorbente se eliminó el exceso de agua de la superficie del filete (Figura 4d), para realizar las posteriores medidas ultrasónicas y físico-químicas.

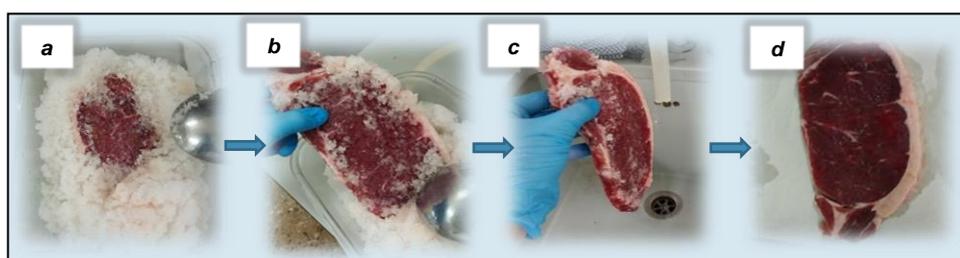


Figura 4. Acondicionamiento del filete de lomo de vacuno post salado.

### 3.3. Análisis ultrasónico

Los filetes estudiados se caracterizaron mediante ultrasonidos de señal empleando dos técnicas de medida: sin contacto y con contacto con la muestra. Las medidas se realizaron antes del salado, tras la descongelación completa, y después del salado con el fin de detectar una posible relación entre cambios ultrasónicos y físico-químicos de los filetes de ternera durante su salado.

El procedimiento experimental de ambas técnicas de medida ultrasónica es bastante similar consistiendo en un par de transductores piezoeléctricos (emisor-receptor), enfrentados entre sí con la muestra situada entre ellos y conectados a un generador-receptor. Este se encarga de enviar una señal eléctrica de excitación al transductor emisor y, al mismo tiempo, otra señal eléctrica al osciloscopio (trigger o disparo) para indicar el momento exacto en el que se ha enviado la señal de excitación. Por otro lado, el transductor emisor transforma la señal eléctrica en ultrasónica, ésta llega a la muestra atravesándola hasta llegar al transductor receptor, que realiza el proceso inverso (de señal ultrasónica a señal eléctrica). Finalmente, la señal es enviada al osciloscopio que digitaliza las señales para ser almacenadas y procesadas por el ordenador. La principal diferencia entre ambas técnicas radica en el contacto con la muestra, así las técnicas por contacto requieren que transductores y muestra estén en contacto. Mientras que en las sin contacto, los transductores están separados una cierta distancia (en el orden de cm) de la muestra, de manera que el acoplamiento se realiza por aire.

En ambos métodos de medida ultrasónica, se realizaron un total de 6 medidas por cada filete tanto en crudo como en salado (198 medidas). En todo momento, se mantuvieron refrigerados los filetes hasta la toma de medidas tanto en el caso de la técnica sin contacto (siempre en primer lugar), como en la de con contacto, para evitar alteraciones en la propagación del ultrasonido por una subida de temperatura.

### 3.3.1. Ultrasonidos con contacto

El equipo de medida de ultrasonidos con contacto utilizado en el presente trabajo ha sido diseñado y fabricado por el equipo de investigación de Análisis y Simulación de Procesos Agroalimentarios (ASPA) (Figura 5b). En concreto, las condiciones de medida mediante el método de ultrasonidos con contacto eran las siguientes:

- Transductores (A314S-SU, Panametrics, EE. UU.): par de transductores piezoeléctricos trabajando en modo transmisión recepción y con una frecuencia de 1 MHz.
- Generador-receptor (5077 PR, Olympus, EE. UU.): emitiendo un tren de onda cuadrada con amplitud de 200 V, sintonizado a 1 MHz. En recepción, activando el filtro paso alto con frecuencia de corte 10 MHz y amplificando la señal 30 dB.
- Osciloscopio (MDO3024, Tektronix, EE. UU.): velocidad de digitalización de 2.5 GS/s y promediando 128 señales.
- Sistema de medida de espesor (LEY 16RB model, SMC, Japón): sistema eléctrico de posicionamiento del transductor emisor con control remoto con un ajuste de posición ( $\pm 0.01$  mm).

La medida ultrasónica con contacto se realizó colocando las muestras entre la pareja de transductores. La propia humedad superficial del lomo favoreció el acople, por lo que no se utilizaron materiales de acople adicionales. El transductor receptor se encontraba fijo en la base de la plataforma, mientras que el transductor emisor se posicionaba de forma automática en la superficie de la muestra, tal y como se muestra en la Figura 5b, mediante un programa específico diseñado en LabView® (National Instruments, EE.UU.). Para proporcionar un acoplamiento muestra-transductor adecuado y evitar una deformación excesiva de la muestra, la fuerza de empuje del actuador se reguló según el tiempo de salado con un valor de 7,2 N. Finalmente, como en el sistema de medida sin contacto, las señales adquiridas mediante una aplicación informática programada en LabView® (National Instruments, EE.UU.) se almacenaron para su posterior análisis.

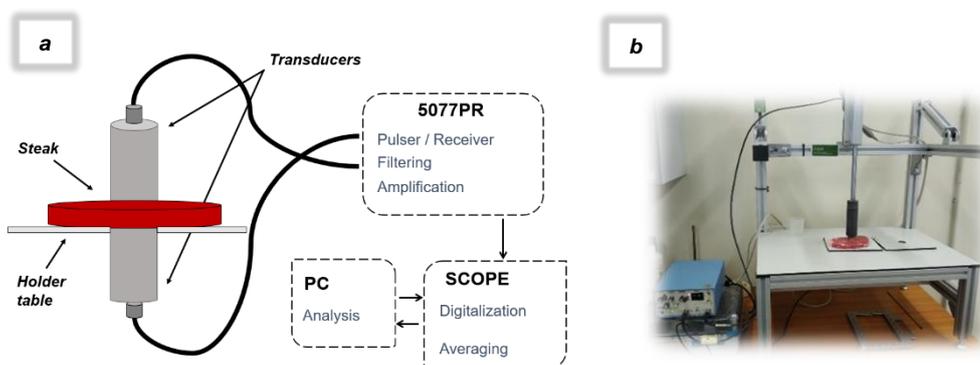
Para cada señal medida, se obtuvieron los siguientes parámetros ultrasónicos:

- **Diferencia de tiempo de vuelo ( $\Delta TOF$ , s):** la variación entre el tiempo de vuelo de la señal ultrasónica de la referencia (cuando la propagación se realiza de transmisor a receptor sin muestra) y el tiempo de vuelo de la señal medida que se propaga también a través del filete (Figura 5a) . De nuevo en este caso, se calculó mediante correlación cruzada (García-Pérez et al., 2019).
- **Velocidad ( $v$ , m/s):** la velocidad de propagación del ultrasonido por el filete puede calcularse a partir de la *Ec. 1*

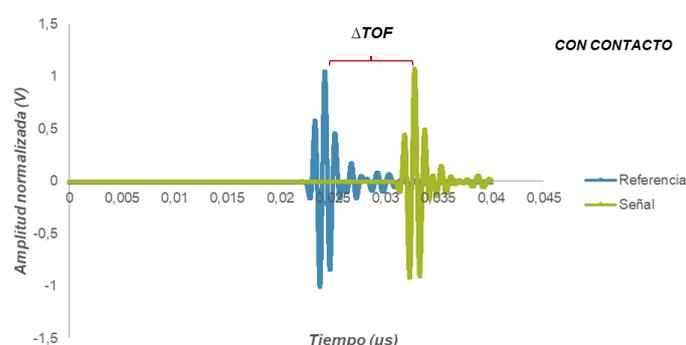
$$v = \frac{h}{\Delta TOF} \quad (Ec. 1)$$

Donde:

h, la altura (espesor) de la muestra en m.



**Figura 5.** a) Configuración experimental ultrasónica con contacto. b) Medida ultrasónica con contacto de un filete de vacuno.



**Figura 6.** Muestra de referencia (emisor-receptor) y transmitida a través de una muestra de filete salado 1 h obtenida mediante la técnica de ultrasónica con contacto.

### 3.3.2. Ultrasonidos sin contacto

Los parámetros y componentes escogidos para el sistema ultrasónico de medida sin contacto o acoplado por aire fueron los siguientes:

- Transductores (US-BioMat Lab., ITEFI-CSIC, España): par de transductores piezoeléctricos no enfocados acoplados por aire, con un diámetro de 20 mm, un rango de frecuencia de 180 a 380 kHz y una sensibilidad máxima de -25 dB (Alvarez-Arenas et al., 2012).
- Generador-receptor (5077 PR, Olympus, EE. UU.): emitiendo un tren de pulsos de onda cuadrada con amplitud de 400 V centrados a 300 kHz. En recepción, la señal es filtrada por un paso bajo con frecuencia de corte 10 MHz y amplificada 59 dB.
- Osciloscopio (MDO3024, Tektronix, EE. UU.): velocidad de digitalización de 10 MS/s y promediando 128 señales.

Las medidas ultrasónicas se tomaron en modo de transmisión-recepción, donde los filetes de lomo de vacuno se colocaron perpendiculares a la dirección de propagación de la onda en un porta-muestras a una distancia de 2 cm de cada transductor (Figura

7). El porta-muestras fue fabricado específicamente para esta aplicación y consistió en un marco metálico con un entretejido de hilo de pescar, material que influye mínimamente en la señal de ultrasonidos, y ayudó a mantener la muestra perpendicular a la dirección de propagación.

El procedimiento de medida se inició adquiriendo una señal de referencia ultrasónica, que corresponde a la propagación de la onda desde el emisor al receptor a través del aire (con el porta-muestras colocado, pero sin muestra). Esta referencia se utilizó como calibración de las medidas posteriores. Después, se colocó la muestra en el soporte y se volvió a capturar la señal recibida deslizando el porta-muestras con el filete sobre el trípode, para alcanzar 6 puntos diferentes de medida, evitando sus bordes. En concreto, la señal emitida desde el transductor emisor hasta el receptor viajaba a través del aire, pasando por la muestra hasta llegar al receptor (Figura 7). Finalmente, la señal digitalizada por el osciloscopio controlado por PyVISA se almacena para el posterior análisis y cálculo de los parámetros ultrasónicos (Python) (Figura 7).

Para cada medida ultrasónica, los parámetros que se obtuvieron fueron:

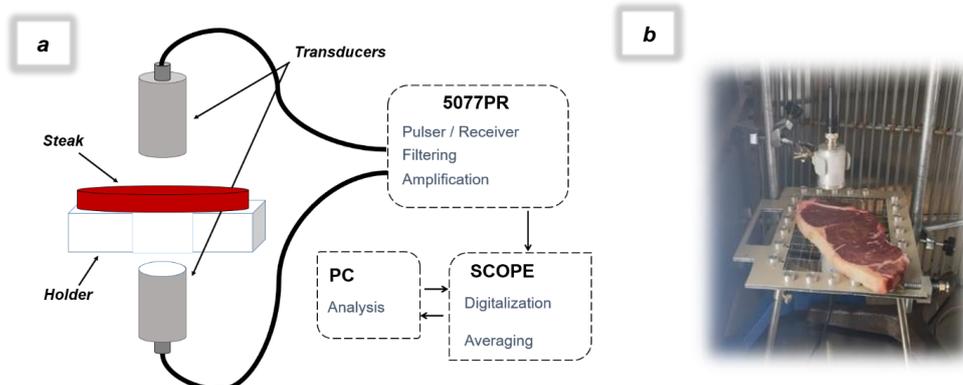
- **Variación de tiempo de vuelo ( $\Delta TOF$ ,  $\mu s$ ):** la diferencia entre el tiempo de vuelo de la señal ultrasónica de la referencia (cuando la propagación se realiza únicamente por el aire) y el tiempo de vuelo de la señal medida que se propaga también a través del filete. En este caso, se calculó mediante correlación cruzada (Figura 8) (García-Pérez et al., 2019).
- **Velocidad ( $v$ , m/s):** la velocidad de propagación del ultrasonido por el filete puede calcularse a partir de la *Ec. 2*

$$v = \frac{h}{\frac{h}{v_a} - \Delta TOF} \quad (Ec. 2)$$

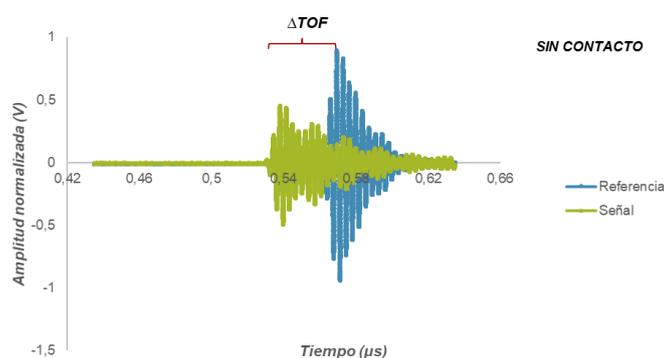
Donde:

donde  $h$ , es la altura (espesor) de la muestra en m; y  $v_a$  la velocidad de la onda ultrasónica a través del aire (343 m/s) (Schindle y Hutchins, 1995)

- **Amplitud máxima de la señal transmitida ( $A_{max}$ , V):** máximo valor de amplitud de pico de la señal transmitida a través del filete.



**Figura 7.** a) Esquema de la configuración ultrasónica sin contacto. b) Medida ultrasónica sin contacto de filete de lomo de vacuno salado durante 1h.



**Figura 8.** Muestra de referencia (emisor-receptor) y transmitida a través de una muestra de filete salado 2 h obtenida mediante la técnica de ultrasónica sin contacto.

### 3.4. Análisis de textura

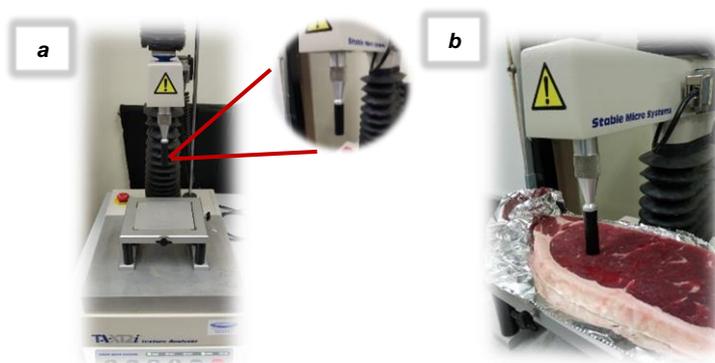
#### 3.4.1. Ensayo compresión-relajación

El análisis instrumental de textura se llevó a cabo tras las medidas ultrasónicas. En concreto, se realizó mediante el método de ensayo de compresión-relajación descrito por Gou. (2008) parcialmente modificado. Para ello, se utilizó un texturómetro (TA.XT2i, Stable Micro Systems, UK) con las siguientes condiciones de análisis (Figura 9a):

- Sonda cilíndrica plana:  $\varnothing$  10 mm (SMS P/1K)
- Velocidad previa al análisis: 1 mm/s
- Velocidad después del análisis: 10 mm/s
- Velocidad de compresión: 1 mm/s
- Compresión: 20%
- Tiempo de relajación: 15 s
- Trigger de fuerza: 0,1 N

Las muestras se mantuvieron en refrigeración (4°C) hasta la realización de las pruebas de textura. En concreto, el análisis de textura se realizó en la parte central de cada filete,

igual (Figura 9b) que las medidas ultrasónicas. De este modo, por cada filete se registraron entre 7-10 medidas, dependiendo de la superficie disponible, evitando aquellas zonas con grasa, tejido conectivo o los bordes.



**Figura 9235.** Análisis instrumental de textura mediante ensayo de compresión-relajación (1 mm/s, 20% deformación). a) Texturómetro y sonda utilizada, b) Detalle del modo de realización del ensayo.

### 3.4.2. Determinación de parámetros texturales

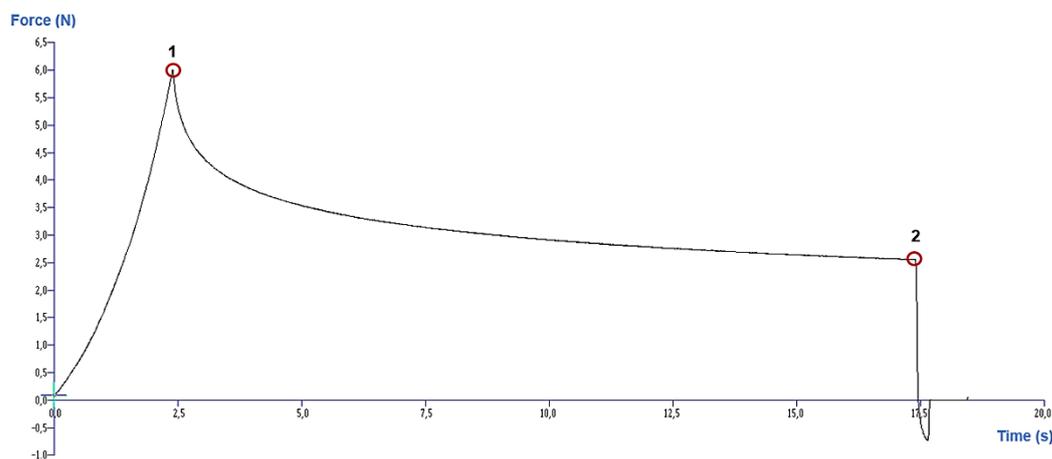
Una vez realizadas las medidas texturales, se registraron las curvas fuerza (N) - tiempo (s) (Figura 10) en las que se identificaron diferentes puntos de interés:

- Punto 1 = Fuerza máxima registrada (fin de la etapa de compresión)
- Punto 2 = Fuerza a los 15 s de iniciarse la fase de relajación (fin del ensayo)

En la Figura 10, se observa la fase de compresión comprendida entre el origen de coordenadas y el punto 2, así como la fase de relajación entre los puntos 1 y 2. A partir del análisis la curva fuerza-tiempo se calcularon los siguientes parámetros texturales utilizando el software Exponent Lite® (Stable Micro System, UK):

- **Fuerza máxima de compresión ( $F_{max}$ ):** Fuerza registrada en el punto 1 ( $F_1$ ), que puede considerarse como un valor de firmeza de la carne.
- **Trabajo de compresión ( $W$ ):** Área bajo la curva definida entre el origen de coordenadas (0,0) y el punto 2.
- **Módulo de elasticidad ( $E$ ):** Pendiente de la recta formada entre los puntos 1 y 2.
- **Capacidad de relajación total (CRT):** Se calcula con la fuerza máxima ( $F_1$ ) y la fuerza a los 15 segundos de relajación ( $F_2$ ), tal y como se detalla a continuación:

$$CRT = \frac{F_1 - F_2}{F_1} \quad (\text{Ec. 3})$$



**Figura 10.** Curva característica del ensayo textural de compresión-relajación. Punto 1: Fuerza máxima registrada. Punto 2: Fuerza a los 15 s de relajación.

### 3.5. Análisis físico-químicos

#### 3.5.1. Determinación del contenido de cloruros

El contenido en sal de las muestras de ternera se caracterizó mediante el método estándar oficial AOAC 971.27(AOAC, 1997).

La determinación del contenido de cloruros de las muestras en cada uno de los puntos de salado (1, 2, 4, 8 y 24 h), se realizó mediante un equipo de análisis de cloruros (MK II Chloride Analyzer 926, Sherwood Scientific, Reino Unido) siguiendo el método descrito por Prados et al. (2015). En concreto el análisis se iniciaba con la preparación de la muestra, cortando y pesando 0,5 g de muestra seleccionada de diferentes partes del filete. A continuación, se añadieron 50 mL de agua destilada para posteriormente homogeneizar la mezcla con un ultraturrax (T25 IKA Labortechnik, Janke & GMB & Co, Alemania) equipado con un vástago modelo S25N-18G durante 5 min a 8.000 rpm. Finalmente, las mezclas se filtraron con papel de filtro (45 µm) para asegurarnos que no quedan impurezas y poder realizar la determinación de cloruros y el contenido de cloruros (mg/Cl-/L) se midió por valoración (MK II Chloride Analyzer 926) en el volumen filtrado. Se realizaron 7 repeticiones para cada muestra.

Para el cálculo del contenido de sal (g NaCl/ 100g muestra) de la muestra se empleó la ecuación 4.

$$NaCl = \frac{L \cdot v \cdot PM_{NaCl}}{m \cdot f \cdot PM_{Cl}} \cdot d \quad (Ec. 4)$$

Donde:

**L**, Resultado de la valoración del filtrado (mg Cl/L).

**V**, el volumen de agua con el que se preparó el extracto (mL disolución).

**PM<sub>NaCl</sub>**, el peso molecular del cloruro sódico (g/mol NaCl)

$PM_{Cl^-}$ , el peso molecular del ión cloruro (g/mol Cl<sup>-</sup>)

$m$ , la masa de muestra de carne empleada (g).

$f$ , el factor de conversión de las unidades (10<sup>4</sup>).

$d$ , el valor de dilución realizada.

### 3.5.2. Determinación de la humedad

El contenido de humedad (W) en las muestras de carne se determinó con el método gravimétrico indirecto por desecación AOAC 950.46 (AOAC, 1997), que está basado en la pérdida de peso de la muestra debida a la evaporación de agua hasta alcanzar peso constante. El contenido de humedad se midió por triplicado en cada muestra salada y en los controles. En concreto, el análisis se inició registrando los pesos y secando en una estufa a 105 °C durante al menos 1 h de las flaneras con una varilla de vidrio y con 10 g de arena de mar lavada (grano fino QP). Después, las flaneras se dejaron enfriar en un desecador hasta temperatura ambiente y se añadieron 5 g de muestra. Se mezcló la arena y la muestra con ayuda de la varilla para evitar así que se forme una costra durante el secado que pueda dificultar la evaporación del agua. Tras aproximadamente 24 h en estufa con circulación forzada de aire a 105 °C y hasta obtener peso constante, la flanera con la muestra desecada se dejó enfriar en el desecador. Finalmente, se pesó la flanera con la muestra desecada y se calculó el contenido de humedad (W, g agua/g muestra seca) de acuerdo a la ecuación 5.

$$W = \frac{(P_1 + P_2) - (P_1 + P_3)}{P_2} \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde:

$P_1$ , el peso (g) de la flanera junto con la varilla y los 10 g de arena.

$P_2$ , el peso (g) de la muestra húmeda.

$P_3$ , el peso (g) de la muestra seca hasta alcanzar peso constante (24h).

### 3.5.3. Determinación de la actividad de agua

La determinación de la actividad de agua ( $a_w$ ) se realizó mediante un medidor de actividad de agua (AW SPRINT TH-500, Novasina, Suiza) el cual se calibró previamente a los análisis (25 °C). Así, se añadió la muestra cubriendo el fondo de la cápsula plástica y se colocó la pieza de cobertura para la medida. Se realizaron tres repeticiones para cada muestra.

### 3.5.4. Determinación del contenido en grasa

El contenido total de grasa de las muestras de lomo de vacuno se determinó mediante extracción Soxhlet sólido-líquido de acuerdo al método estándar oficial AOAC 991.36 (AOAC, 1997).

Inicialmente, se tomaron 5 g de muestra de carne cruda y se introdujeron en un cartucho de papel de filtro. A continuación, el cartucho con la muestra y junto con el resto de componentes del extractor Soxhlet, se secaron en estufa 105 °C durante aproximadamente 24 h. De este modo, se asegura la eliminación del posible contenido de humedad, tanto de la muestra como de los materiales, para que no influya en el proceso. Posteriormente, el cartucho con la muestra se introdujo en la cámara del extractor Soxhlet y se añadió 70 mL de disolvente éter de petróleo sobre la muestra. Así, una vez alcanzada la temperatura de ebullición (70 °C) del solvente, este evapora, asciende, condensa y arrastra la grasa que queda disuelta en él. El disolvente durante la condensación cae, gota a gota, sobre el cartucho que contiene la muestra, extrayendo la grasa soluble. Cuando el nivel de disolvente condensado en la cámara alcanza la parte superior del sifón lateral, este, con la grasa disuelta, asciende por el sifón y retorna al matraz de ebullición. Este proceso se repite durante unas 6 h tiempo que se considera suficiente para extraer toda la grasa.

Tras el periodo de extracción, se toma el matraz donde se ha recogido el disolvente con la grasa disuelta, y se deja en estufa a 60 °C durante 24 h hasta que evapore por completo todo el éter de petróleo. Finalmente, por diferencia de peso del matraz al inicio y al final del análisis, se calcula la cantidad de grasa extraída (G, %) (Ec. 6). La determinación del contenido de grasa se realizó por triplicado en las muestras control (sin salar).

$$G = \frac{m_3 - m_2}{m_1} \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde:

$m_1$ , peso de la muestra (g).

$m_2$ , peso (g) del matraz.

$m_3$ , peso (g) del matraz con grasa.

### 3.5.5. Determinación de la capacidad de retención de agua

La determinación de la capacidad de retención de agua (CRA) se realizó mediante centrifugación para forzar la salida de agua de acuerdo a la metodología descrita por Thorarinsdottir et al. (2001). Para ello, se pesaron y llenaron tubos de centrifuga con 7 g de perlas de vidrio a los que se les añadió la muestra de carne. En concreto, se colocaron sobre las perlas 3 g de muestra de carne de vacuno previamente troceada y envuelta en una rejilla de PVC. Seguidamente, se centrifugaron las muestras 1.500 rpm durante 15 min a 4 °C. Una vez centrifugadas las muestras, se retiró la rejilla con la

muestra de carne y se pesó el tubo con las perlas y el líquido extraído junto con algún soluto disuelto. A partir de la ecuación 7, se determinó la capacidad de retención de agua (CRA, %). Las determinaciones se realizaron por triplicado.

$$CRA = \frac{(m \cdot W) - (P_f - P_i)}{m \cdot W} \cdot 100 \quad (\text{Ec. 7})$$

Donde:

$m$ , peso (g) de la muestra.

$W$ , contenido de humedad (g agua/ g muestra húmeda).

$P_i$ , peso inicial (g) del tubo de centrifuga con las perlas de vidrio.

$P_f$ , peso final (g) del tubo de centrifuga con las perlas de vidrio y el líquido extraído de la muestra tras la centrifugación.

### 3.6. Análisis estadístico

Se ha analizado la influencia del tiempo de salado en los parámetros texturales, ultrasónicos y físico químicos, a través de un análisis de la varianza simple (ANOVA) y se han establecido los grupos homogéneos respecto de la media mediante los intervalos LSD (Least Significant Difference) de Fisher, con un nivel de confianza del 95%.

Los análisis estadísticos se han realizado con el software Statgraphics Centurion XVIII (Statgraphics Technologies Inc., EE.UU.).

## 4. Resultados y discusión

### 4.1. Cambios composicionales durante el salado

La Tabla 1 muestra la evolución de los diferentes parámetros composicionales y físico-químicos analizados en filetes de vacuno durante el salado. En concreto, muestra los resultados obtenidos del contenido de humedad (W), actividad de agua ( $a_w$ ), capacidad de retención de agua (CRA) y contenido de sal durante los distintos tiempos de salado (0, 1, 2, 4, 8 y 24 h) y a tiempo 0 h en los filetes sin salar (control).

Los filetes de vacuno frescos estudiados presentaron un contenido medio de grasa de  $1,80 \pm 0,14$  g/100 g, humedad de  $73,54 \pm 0,26$  g agua/100 g m.s y actividad de agua de 0,972 (Tabla 1). Durante el salado, se observa una disminución progresiva del contenido de humedad y de actividad de agua hasta alcanzar valores de 56,06 g agua/100 g m.s y 0,815 en filetes salados a 24 h, respectivamente. Estos cambios, como se explicará a continuación, se relacionan con el incremento del contenido de sal que aumenta desde 0,15 g NaCl/100 g en el filete fresco hasta valores de 14,56 g NaCl/100 g a 24 h. Los valores de contenido de sal obtenidos en los filetes salados durante 24 h son muy superiores a los valores medios de productos cárnicos como son el jamón curado que puede oscilar entre 3,7 y 10,3 g NaCl /100 g (Ventanas 2001) o la cecina, 8,42 g NaCl /100 g (García et al., 1997). El tiempo de salado de 24 h se eligió porque se pretendió evaluar condiciones de salado extremas cercanas al equilibrio.

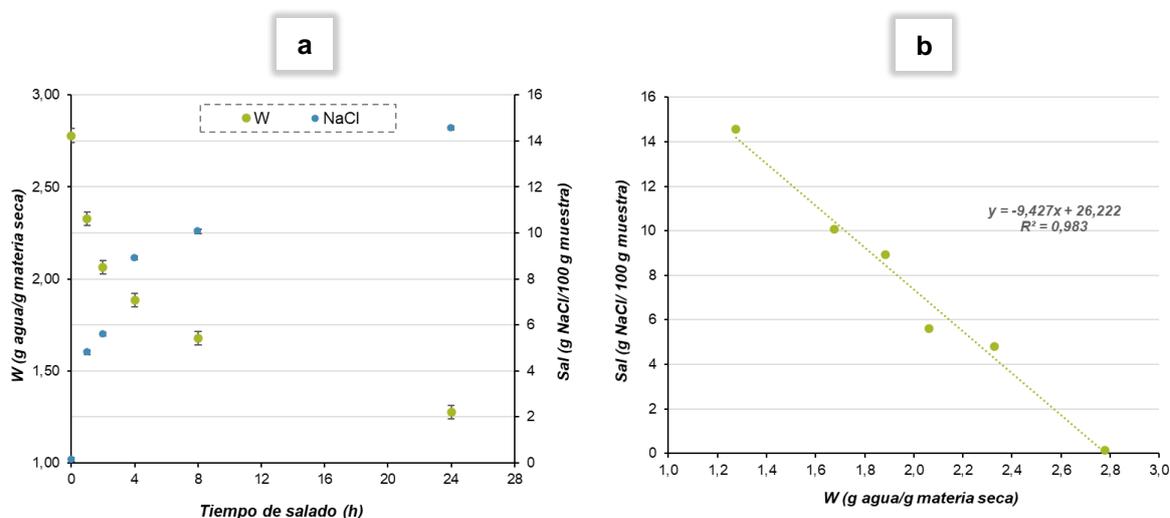
Tabla 193. Parámetros físico-químicos analizados en los distintos tiempos de salado de los filetes vacuno.

nº Filete	Tiempo salado (h)	Humedad			$a_w$			CRA			Sal		
		g agua/100 g m.s	Valor medio	Error estándar	$a_w$	Valor medio	Error estándar	%	Valor medio	Error estándar	NaCl g/100 g	Valor medio	Error estándar
16	0	73,56			0,972			85,78			0,15		
17	0	73,08	73,54	0,26	0,972	0,972	0,000	90,79	87,20	1,81	0,16	0,15	0,00
18	0	73,97			0,972			85,04			0,15		
11	1	69,48			0,941			85,54			4,76		
12	1	69,71	69,94	0,36	0,933	0,939	0,003	99,46	94,59	4,53	5,18	4,81	0,20
14	1	70,65			0,944			98,76			4,49		
1	2	67,09			0,905			98,50			5,31		
2	2	67,27	67,35	0,18	0,925	0,918	0,007	100,11	99,15	0,49	5,70	5,61	0,15
3	2	67,68			0,925			98,85			5,82		
4	4	64,89			0,905			97,41			9,27		
5	4	63,68	65,26	1,04	0,892	0,901	0,005	97,66	97,79	0,26	9,07	8,92	0,26
9	4	67,21			0,905			98,28			8,41		
10	8	63,55			0,875			98,17			9,66		
13	8	61,71	62,63	0,53	0,864	0,873	0,005	96,51	97,08	0,55	10,72	10,08	0,33
15	8	62,62			0,882			96,56			9,85		
6	24	56,19			0,818			96,03			14,51		
7	24	55,72	56,06	0,17	0,807	0,815	0,004	96,44	96,64	0,42	14,91	14,56	0,19
8	24	56,28			0,821			97,45			14,26		

Nota:  $a_w$  = actividad de agua; CRA = Capacidad de retención de agua.

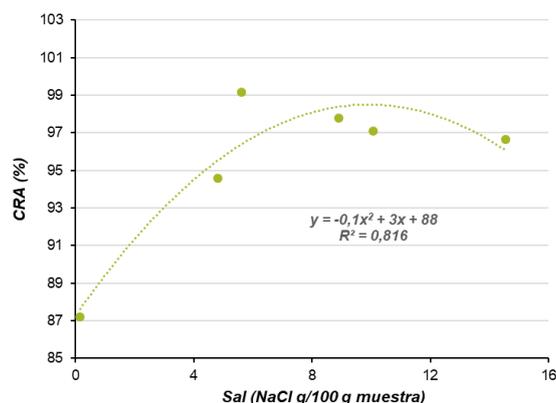
En la Figura 11a, se muestra la evolución del contenido de humedad y de sal durante el proceso de salado de los filetes de lomo de vacuno. Durante el salado, ocurren dos mecanismos de transferencia de materia simultáneos y en dirección opuesta, por un lado, la sal entra al producto y el agua sale. Estos mecanismos se han estudiado en profundidad en la bibliografía considerando la teoría difusional. Así, el proceso está influenciado por diferentes variables, tales como la temperatura, el espesor de la pieza de carne y el tipo de salado (salado en seco o salmuera). En el caso del salado en seco, el agua se libera de las fibras musculares, disolviendo la sal que envuelve la muestra, lo que aumenta la difusión de la misma al interior del músculo (Toldrá, 2002). La relación

entre el contenido de sal y la pérdida de contenido de humedad durante el salado se muestra en la Figura 11b donde se observa que ambas variables siguen una relación lineal ( $R^2 = 0,983$ ).



**Figura 11. a)** Evolución del contenido de humedad (W) y sal en filetes de vacuno salados. Se muestra el valor medio y los intervalos LSD de Fisher (95 %); **b)** Relación entre el contenido de sal y humedad (W) en filetes de vacuno salados.

Otro parámetro de interés para evaluar el efecto del salado en productos cárnicos es la capacidad de retención de agua (CRA). La Figura 12 representa la relación entre CRA y el contenido de sal durante el salado de los filetes de vacuno descrito con una relación polinómica ( $R^2 = 0,816$ ). Se aprecia un evidente aumento de la CRA entre los filetes control (87,20% - 0 g NaCl/100 g) y los filetes salados durante 1 h (94,59%) (Tabla 1). A partir de 2 h de salado (5,61g NaCl/100 g), la CRA disminuyó ligeramente en los siguientes tiempos de salado hasta alcanzar un valor de 96,64 % en los filetes salados durante 24 h, siendo muy similar a las 8 h (Tabla 1).

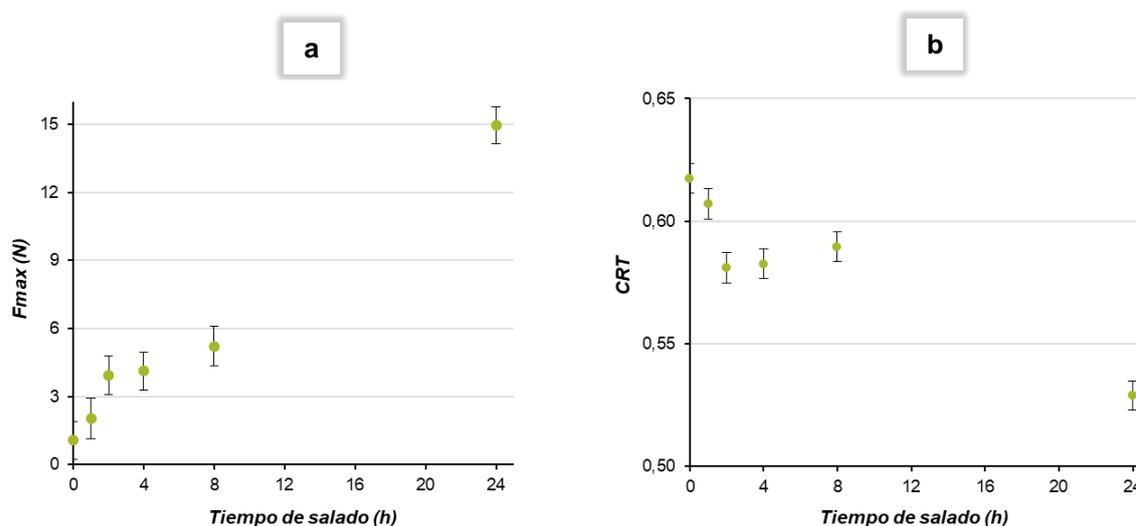


**Figura 12.** Relación entre la capacidad de retención de agua (CRA) y el contenido de sal para filetes de vacuno salados.

El aumento de la CRA de los filetes de lomo de vacuno durante el salado es un efecto buscado a nivel tecnológico. La CRA es un parámetro que mide la habilidad del músculo para retener el agua libre de su estructura, determinado por diferentes factores como son las fuerzas de interacción solido-agua (fuerzas van der Waals, etc.), pH, temperatura y el equilibrio entre proteína y agua (Albarracín et al., 2011). Por esta razón, está directamente relacionado con la jugosidad del producto y, con ello, con el nivel de aceptación del consumidor (Huss, 1998). Este efecto se produce al incrementar el contenido de sal en matrices cárnicas que conlleva una modificación de los valores de pH post-mortem (pH aproximadamente 5,4-5,7), considerados valores cercanos al punto isoeléctrico (pI) (aproximadamente pH 5,2) de las proteínas de la carne (Warriss, 1982), hacia valores superiores o inferiores al pI en función del contenido de sal empleado (Bate-Smith, 1948). Así, la sal aumenta significativamente la CRA de la carne al desplazar el pI de pH 5,2 hacia valores alejados del pI, siendo así una forma válida de aumentar la capacidad de retención de agua (Hultin et al., 2010; Puolanne et al., 2001). Por otra parte, los cambios en la CRA constituyen un indicador adecuado de los cambios en la estructura de las proteínas miofibrilares (Purriños et al., 2011; Warner, 2017). Así, la desnaturalización de las proteínas disminuye la CRA que explica el descenso de CRA a partir de un contenido de sal de aproximadamente 6 g NaCl/100 g obtenido a las 2 h de salado.

#### 4.2. Evolución de parámetros texturales durante el salado

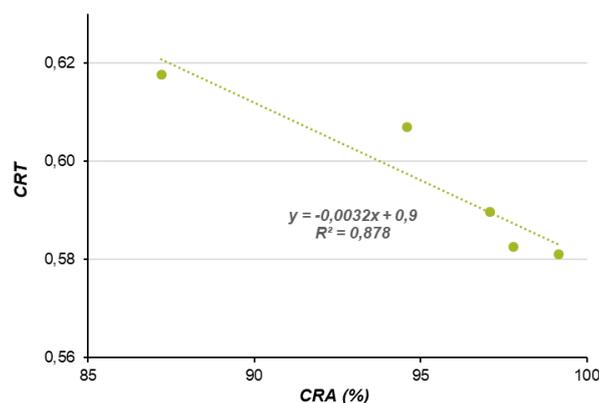
El efecto del salado sobre los parámetros texturales se puede observar en las Figura 13. La Figura 13a muestra un incremento gradual de la dureza ( $F_{max}$ , N) de los filetes de vacuno a medida que aumenta el tiempo de salado (1, 2, 4, 8 y 24 h) y, con ello, el contenido de sal. En concreto, las muestras control (0,15 g NaCl/100 g muestra) presentaron un valor promedio de dureza de 1,07 mientras que los filetes salados desde 1 h (4,81 g NaCl/100 g muestra) hasta 8 h (10,08 g NaCl/100 g muestra) presentaron un incremento gradual de dureza desde 2,04 hasta 5,22, respectivamente. Morales et al. (2007) describieron un efecto similar en muestras de jamón serrano saladas con un 1,2 y 4 g NaCl/100 g, observando un aumento progresivo de la fuerza máxima desde 9,49 N hasta 12,06 N en las muestras con 1 y 4 g NaCl/100 g, respectivamente. Del mismo modo que Lorenzo y Carballo (2016) tras caracterizar muestras de cecina con contenidos de sal de 9 y 12 g NaCl/100 g, obtuvieron valores de dureza de 11 y 17 N, respectivamente. Este incremento de dureza es esperable debido a la reducción del contenido de humedad durante el salado (Figura 13a) que produce una modificación de la resistencia del material ante una fuerza de compresión (Toldrá, 2002; Ruiz-Ramírez et al., 2005; Gou et al., 2008). Por ello, los filetes salados durante 24h presentaron un incremento considerable de dureza, en comparación con las tratadas durante 8 h, con un valor de  $14,96 \pm 3,97$  N. Este incremento de la dureza con el tiempo de salado puede ser como resultado del efecto inhibitorio de la sal sobre la actividad de la proteasa, evitando el ablandamiento de la carne con el tiempo como reportaron Gou et al. (2008) en muestras de jamón serrano saladas durante 6 y 14 días.



**Figura 13.** Evolución durante el salado de los filetes de vacuno de **a)** dureza ( $F_{max}$ ) y **b)** capacidad de relajación total (CRT). Se muestran los valores medios y los intervalos LSD de Fisher (95 %).

En cuanto a la capacidad de relajación total, la Figura 13b muestra su evolución durante los diferentes tiempos de salado. Los filetes frescos presentaron un valor de CRT de 0,62 que se va reduciendo hasta las 24 h de salado (0,53). Se puede decir que la reducción de la capacidad de relajación es casi despreciable entre los tiempos de salado entre 1 y 8 h, incluso se puede apreciar un ligero aumento no significativo ( $p > 0,05$ ). El descenso de la CRT en los filetes salados está relacionado posiblemente con la proteólisis (Toldrá, 2002). Esta ligera reducción de la capacidad de relajación ha sido reportada por Gou et al. (2008) en muestras saladas de jamón serrano con valores de CRT de 0,601, 0,593 y 0,598 en muestras con contenidos de sal de 6,8, 9,6 y 11,2 g NaCl/100 g, respectivamente. Del mismo modo, Fulladosa et al. (2018) reportaron un valor de CRT de 0,67 en muestras de jamón serrano curado con un contenido de sal de 4,76 g NaCl/100 g. El descenso del CRT evidencia que el salado convierte a los filetes de lomo de vacuno en un material con un comportamiento más elástico, es decir, aumenta su capacidad de recuperar su forma original tras ser comprimidos (Peleg, 1979).

Se encontró una relación lineal significativa ( $p < 0,05$ ,  $R^2 = 0,878$ ) entre CRT y CRA (Figura 14), así, a medida que la CRA, disminuye la CRT, o lo que es lo mismo, mejora la respuesta elástica del material. El valor máximo de CRA obtenido (99,15 %) se produce en las muestras saladas durante 2 h (5,61 g NaCl/ 100 g) (Tabla 1) y se relaciona con un valor de capacidad de relajación total de 0,58. A partir de este punto, se produce un aumento del contenido de sal ( $> 6$  g NaCl/100 g) que produce un ligero descenso de la capacidad de retención de agua y, con ello, un cambio de la CRT que aumenta ligeramente. Por tanto, a medida que aumenta el contenido de sal por encima 6 UDS en los filetes de lomo de vacuno, se observa el efecto de hidratación por la adhesión de las moléculas de agua en las fibras musculares debido al incremento de las cargas negativas aportadas por los iones ( $Cl^-$ ) (Warner, 2017). Este hecho conlleva a un cambio en el comportamiento mecánico del material, produciéndose una disminución en su capacidad de relajación, es decir, aumenta su capacidad de recuperar la forma inicial independientemente del tiempo de compresión.



**Figura 14.** Relación entre la capacidad de relajación total y el porcentaje capacidad de retención de agua durante el salado de los filetes de vacuno.

### 4.3. Encogimiento durante el salado

La reducción del espesor y, con ello, el encogimiento de los filetes de lomo de vacuno durante su salado, es un aspecto inherente a la pérdida de agua. La Tabla 2 muestra los espesores (mm) de los filetes medidos mediante un micrómetro y el sistema de ultrasonidos por contacto, y el cálculo del encogimiento. Así, cabría esperar un incremento gradual del encogimiento a medida que transcurre el salado y la pérdida de agua es mayor. Sin embargo, no hubo una tendencia clara en los resultados (Tabla 2), y todos los tiempos de salado mostraron valores similares al obtenido para 1 hora de salado. En el caso del encogimiento medido con la técnica del micrómetro, se observa que va en aumento desde un 13,437 % en los filetes salados 1 h hasta 16,045 % a 24 h, sin embargo, a las 8 h de salado se obtuvo un encogimiento de tan solo el 6,707 %. El mismo comportamiento se observa en los valores del encogimiento medidos por la técnica de contacto, con valores que fluctúan desde los obtenidos entre 1 y 24 h de salado.

Si se comparan ambas técnicas de medida, se aprecia una importante variabilidad en los resultados obtenidos con ambos métodos obteniéndose diferencias de hasta un 14,5 % de encogimiento medido a las 8 h de salado. En general, los valores de encogimiento medidos con el equipo de ultrasonidos sin contacto son superiores a los obtenidos por el micrómetro. Este hecho puede deberse especialmente al error que presenta la medida de espesor principalmente en las muestras sin salar (Tabla 2) ya que son más sensibles a la deformación y con ello, a la falta de precisión en la medida del espesor. En concreto, y como se comentará posteriormente, la falta de precisión en esta medida afectará al cálculo de la velocidad ultrasónica, especialmente en las medidas sin contacto (*Ec.1* y *Ec. 2*).

**Tabla 2.** Resultados de la medida del espesor (h) y encogimiento de los filetes de vacuno durante los distintos tiempos de salado.

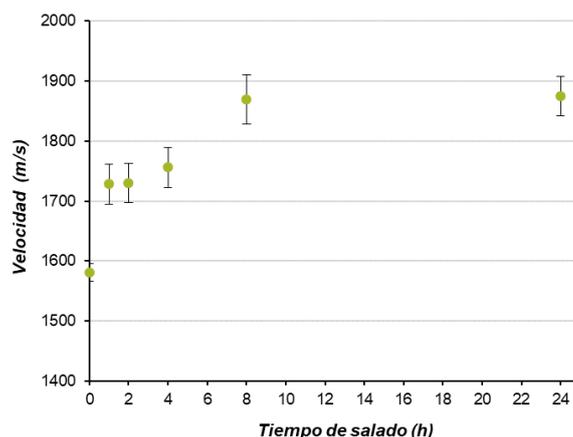
nº Filete	Tiempo salado (h)	Micrómetro						
		h fresco (mm)	Valor medio h fresco (mm)	Error estándar h fresco (mm)	h salado (mm)	Valor medio h salado (mm)	Error estándar h salado (mm)	Encogimiento (%)
11	1	12,348			10,622			
12	1	12,388	11,840	0,914	9,730	10,249	0,268	13,437
14	1	10,785			10,397			
1	2	12,121			10,922			
2	2	12,094	12,017	0,157	10,473	10,319	0,400	14,125
3	2	11,836			9,563			
4	4	13,282			10,420			
5	4	12,709	12,250	1,322	10,672	10,441	0,128	14,773
9	4	10,760			10,230			
10	8	10,073			9,892			
13	8	10,854	11,167	1,279	10,473	10,418	0,289	6,707
15	8	12,573			10,888			
6	24	13,067			10,693			
7	24	12,334	12,481	0,528	9,878	10,478	0,304	16,045
8	24	12,042			10,863			
nº Filete	Tiempo salado (h)	US contacto						
		h fresco (mm)	Valor medio h fresco (mm)	Error estándar h fresco (mm)	h salado (mm)	Valor medio h salado (mm)	Error estándar h salado (mm)	Encogimiento (%)
11	1	13,412			11,062			
12	1	13,500	13,506	0,056	10,062	10,891	0,438	19,359
14	1	13,607			11,550			
1	2	14,817			11,411			
2	2	13,923	14,007	0,445	11,312	11,290	0,078	19,400
3	2	13,282			11,146			
4	4	13,277			10,682			
5	4	14,250	13,585	0,333	11,180	11,009	0,164	18,962
9	4	13,229			11,167			
10	8	13,083			11,453			
13	8	13,167	13,306	0,182	10,332	10,482	0,523	21,221
15	8	13,667			9,662			
6	24	12,417			11,397			
7	24	13,500	13,056	0,327	10,382	10,957	0,301	16,073
8	24	13,250			11,093			

#### 4.4. Evolución de parámetros ultrasónicos durante el salado

En este apartado se detalla el comportamiento de los distintos parámetros ultrasónicos medidos en el lomo de vacuno salado a diferentes tiempos (1, 2, 4, 8 y 24 h).

##### 4.4.1. Ultrasonidos con contacto

La Figura 15 muestra la evolución de la velocidad de la onda ultrasónica medida mediante la técnica de contacto durante el proceso de salado de los filetes de lomo de vacuno. Se aprecia un paulatino aumento de la velocidad a medida que crece el tiempo de salado (entre 1 y 8 h). Así, mientras que, en el filete fresco, la velocidad media obtenida es de 1581 m/s, alcanza una velocidad de 1870 m/s, a las 8 h de salado. Sin embargo, no se observaron diferencias significativas ( $p > 0,05$ ) entre 8 y 24 h de salado.



**Figura 15.** Evolución de la velocidad ultrasónica mediante el método con contacto durante el salado de los filetes de vacuno. Se muestra el valor medio y los intervalos LSD de Fisher (95 %).

La evolución de la velocidad de la onda ultrasónica concuerda con el comportamiento esperable en el salado en seco de piezas de carne, como se ha demostrado en trabajos anteriores (De Prados et al., 2016; De Prados et al., 2017). El incremento gradual de la velocidad con el tiempo de salado puede explicarse por la pérdida de agua y ganancia de sólidos en los tejidos (Kinsler et al., 1999; De Prados et al., 2015)

El análisis de la energía de la onda no reportó ningún tipo de información útil debido a la perturbación que provoca el contacto entre el transductor y la muestra en la energía transmitida al interior del material analizado.

#### 4.4.2. Ultrasonidos sin contacto

El cálculo de la velocidad ultrasónica en los filetes salados mediante la ecuación 2 es muy sensible a la medida del espesor. Como ejemplo del impacto de la medida del espesor en la velocidad, se incluye la Tabla 3, donde se analiza cómo la velocidad varía en función del espesor para un filete de vacuno fresco tomando como partida los valores de espesor medidos por las técnicas utilizadas y, posteriormente, valores ligeramente inferiores y superiores. Como se muestra en la Tabla 3, una diferencia de 1,06 mm entre la medida del espesor con el equipo ultrasónico por contacto y el micrómetro conllevan una diferencia de aproximadamente 1500 m/s (3522 m/s – 2031 m/s). Y para espesores de aproximadamente 14 mm se alcanzan velocidades similares a las medidas mediante la técnica por contacto. Esto es debido a que la velocidad ultrasónica en este material es muy superior a la del aire, así, cambios muy pequeños del espesor conllevan grandes fluctuaciones en la medida de la velocidad. Estimaciones más precisas de la velocidad ultrasónica medida mediante técnicas sin contacto se han realizado a partir del espectro de resonancia en lonchas de jamón curado (Corona et al., 2013) y hamburguesas (Fariñas et al., 2021). En estos productos, a partir de la frecuencia de resonancia y la variación del tiempo de vuelo se puede hacer una estimación simultánea de la velocidad y del espesor con elevada precisión. Sin embargo, dicha técnica no se pudo utilizar en este trabajo debido a la alta atenuación que presentan los filetes durante el proceso de salados. Así, en este tipo de productos, es necesario utilizar técnicas de medida del

espesor que sean capaces de alcanzar niveles de precisión elevados. En un futuro desarrollo, sería necesario evaluar el uso de medidas de pulso-eco tanto en el transductor inferior como el superior para estimar correctamente la trayectoria de la onda ultrasónica y el espesor de la muestra.

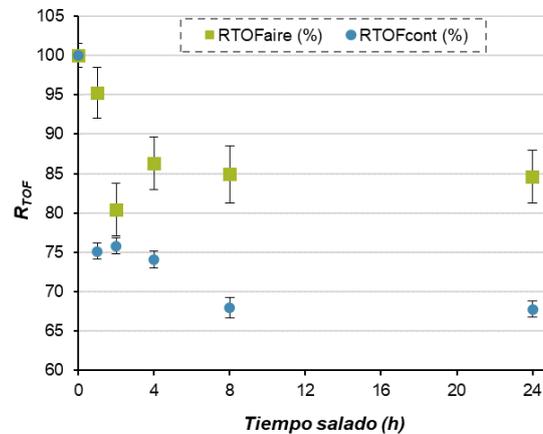
**Tabla 3.** Influencia de la medida del espesor en el cálculo de la velocidad (*Ec. 2*) para un filete de vacuno fresco. Se utilizó una variación de tiempo de vuelo de  $-3.249 \mu\text{s}$  y una velocidad de aire de  $343 \text{ m/s}$ .

Espesor (mm)	V (m/s)
Micrómetro 12,35	3522
Equipo ultrasonidos 13,41	2031
14	1682
13,7	1839
12	4818

Dado que la medida de la velocidad no fue fiable, se utilizó como parámetro a analizar el ratio entre la variación de tiempo de vuelo para el filete salado y el fresco ( $R_{\text{TOF}}$ ). En la Figura 16, se muestra como el  $R_{\text{TOF}}$ , medido sin contacto, presenta un descenso durante el salado. Así, tras 1 h de salado, se observó un valor de  $R_{\text{TOF}}$  del 95 %, estabilizándose en valores cercanos al 80 % a partir de las 4 h de salado. El  $R_{\text{TOF}}$  es un parámetro complejo porque está influenciado por el incremento de velocidad que conlleva el salado y por los cambios de espesor que experimenta el filete. Si se realiza el mismo análisis para las medidas ultrasónicas por contacto y se calcula el  $R_{\text{TOF}}$ , se observa un patrón similar con un descenso acusado en las primeras horas y una estabilización a partir, en este caso, de las 8 h de salado. En lo referente a la comparativa del  $R_{\text{TOF}}$  mediante ambas técnicas se pueden destacar tres aspectos (Figura 16):

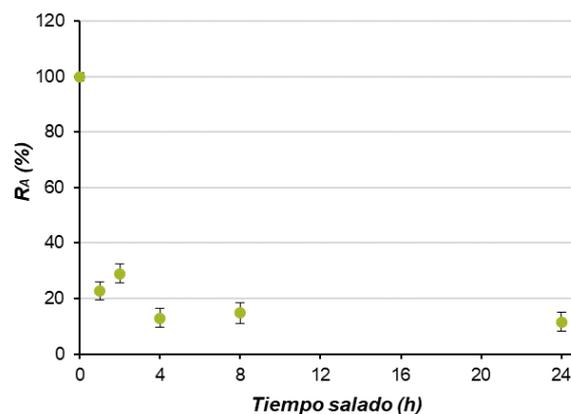
1. El  $R_{\text{TOF}}$  presentó mayores magnitudes en la medida por contacto ( $R_{\text{TOF}}$  máximo de 67% frente al 80%) esto es debido a que en las medidas sin contacto la variación de tiempo de vuelo representa la diferencia de tiempo de tránsito entre la señal que va por el aire y la que atraviesa el producto, mientras que en las de contacto, únicamente la que atraviesa el producto por lo que los cambios son de mayor magnitud en términos relativos.
2. El  $R_{\text{TOF}}$  se estabiliza a las 4 h en las medidas sin contacto mientras que en contacto la estabilización ocurre a las 8 h.
3. Las mayores desviaciones obtenidas en las medidas sin contacto en comparación con las de contacto. Una explicación de la diferencia de variabilidad encontrada entre ambas técnicas radica en las alteraciones de espesor de las muestras producidas como consecuencia del contacto y acoplamiento entre los transductores y la muestra. La ligera presión que se precisa en la técnica por contacto para asegurar que la señal ultrasónica atravesase la muestra por el punto de medida hace que el tiempo de vuelo de la señal siempre corresponde con la distancia más corta entre ambos

transductores lo que explica su menor variabilidad. En el caso de la técnica sin contacto, la señal ultrasónica que atraviesa el filete reflejará cualquier ensanchamiento, protuberancia o heterogeneidad de la muestra dando lugar a mayores variaciones en los datos recogidos.



**Figura 16.** Evolución del ratio de la variación del tiempo de vuelo de la señal ultrasónica calculado a partir de los métodos sin y con contacto durante el salado de los filetes de vacuno. Se muestra el valor medio y los intervalos LSD de Fisher (95 %)

La Figura 17 representa el ratio de amplitud máxima ( $R_A$ ) de la señal ultrasónica sin contacto obtenido para las medidas en el producto salado y el fresco. Se observa que el salado conlleva un descenso muy relevante del nivel de energía de la onda, situándose el  $R_A$  en valores cercanos al 20% durante la primera hora de salado para disminuir progresivamente hasta el 10% a las 24 h de salado. Estos resultados evidencian que el salado aumenta la atenuación del filete de vacuno.



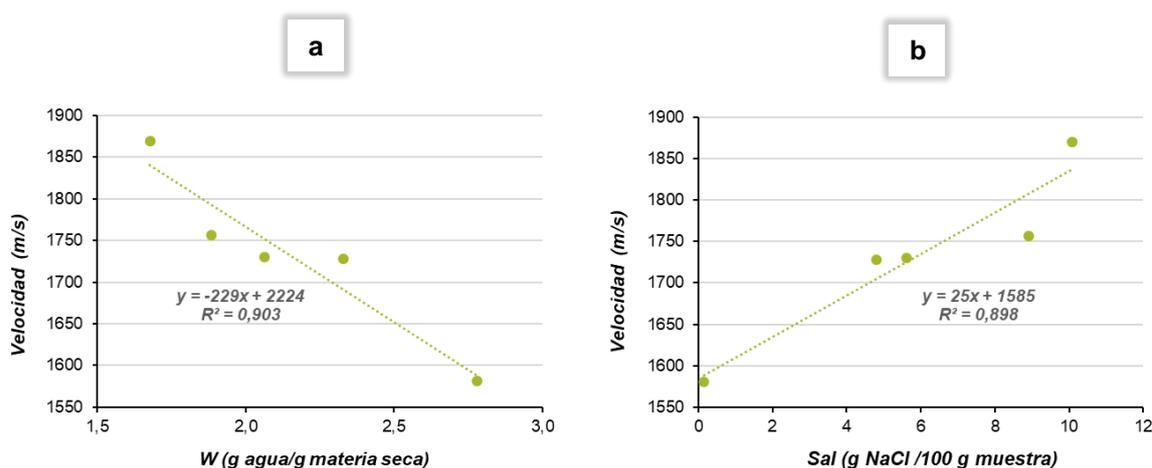
**Figura 17.** Evolución del ratio de amplitud máxima de la señal ultrasónica sin contacto entre filetes salados y frescos de lomo de vacuno. Se muestra el valor medio y los intervalos LSD de Fisher (95 %).

#### 4.5. Relación entre parámetros ultrasónicos y físico-químicos durante el salado

En este último apartado se busca analizar las relaciones existentes entre los parámetros composicionales y texturales con los parámetros ultrasónicos.

##### 4.5.1. Ultrasonidos con contacto

La Figura 18 representa la relación de la velocidad medida por contacto a diferentes contenidos de humedad (Figura 18a) y de sal (Figura 18b) para los filetes de lomo de vacuno. Se obtuvo una velocidad media de 1581 m/s en los filetes frescos con una humedad de 2,78 g agua/g m.s que se incrementó a medida que la humedad disminuyó, hasta una velocidad de 1869 m/s en los filetes salados 8 h con 1,68 g agua/g m.s (Figura 18a). Sin embargo, se aprecia un comportamiento contrario en la Figura 18b, con el aumento de la velocidad para los valores obtenidos para contenidos de sal de 0,153 g NaCl/100 g en filetes frescos y 10,08 g NaCl/100 g en filetes salados 8 h. Así, se encontraron relaciones lineales significativas ( $p < 0,05$ ) entre la velocidad y el contenido de humedad ( $R^2 = 0,903$ ) (Figura 18a), así como con el contenido de sal ( $R^2 = 0,898$ ) (Figura 18b). El contenido en sal y en humedad ejercen efectos contrarios en la velocidad, ya que en términos generales los ultrasonidos viajan más rápido en los sólidos (proteínas y grasas) que en líquidos (agua). (Benedito et al., 2000). Lo que explica que a medida que disminuye el contenido de humedad, como ocurre en el caso del presente estudio, la velocidad disminuye. Mientras que el aumento del contenido de sal de la pieza provocó un aumento de la velocidad debido a la ganancia neta de sólidos solubles (Kinsler et al., 1999; De Prados et al., 2015).

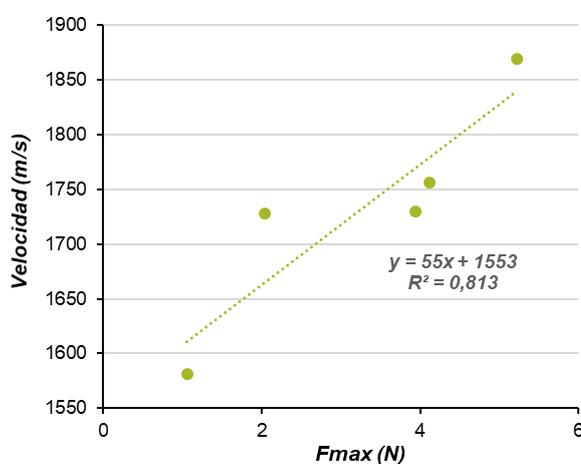


**Figura 18.** Relación de la velocidad ultrasónica medida por contacto con el contenido de humedad (W) (a) y sal (b).

Se ha observado una relación entre los parámetros ultrasónicos y texturales mediante las medidas realizadas por contacto. En concreto, la Figura 19 describe satisfactoriamente mediante una tendencia lineal ( $R^2 = 0,813$ ), la relación entre la velocidad ultrasónica y la dureza ( $F_{max}$ ) obtenida en los filetes salados hasta 8 h. La explicación a este comportamiento puede responder al aumento de rigidez del material, que se traduce en un mayor módulo elástico. Paralelamente, sabemos que la densidad del producto se incrementa debido a la creciente concentración de sólidos debido al propio proceso de salado (Chiralt et al., 2001; Telis et al., 2003). Conocida la relación

entre la velocidad, el módulo elástico y la densidad:  $v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ , podemos concluir que el

aumento del módulo elástico durante el salado es superior al que se produce en la densidad de los filetes, generando ese incremento en la velocidad ultrasónica a medida que aumenta la concentración de sal o tiempo de salado.

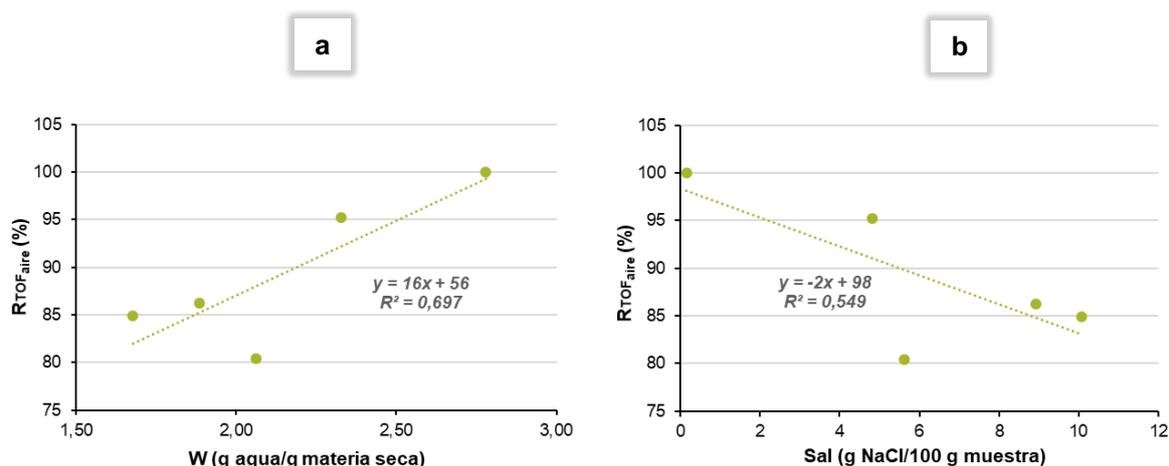


**Figura 19.** Relación entre la velocidad ultrasónica por contacto y la dureza ( $F_{max}$ ) del filete de vacuno salado.

En el caso de la velocidad y el CRT, no se ha observado una correlación entre ambas variables por lo que este parámetro no arroja información acerca del comportamiento viscoelástico del material.

#### 4.5.2. Ultrasonidos sin contacto

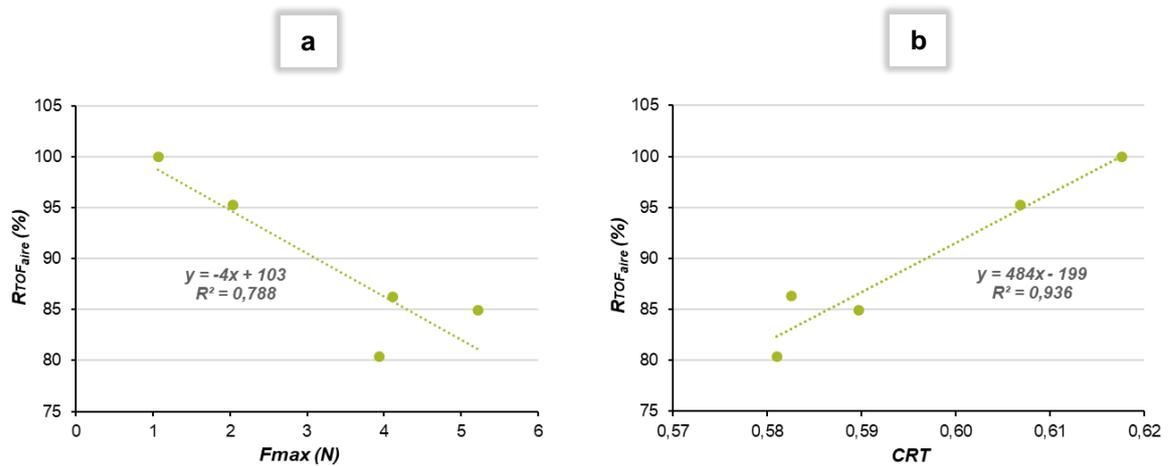
La Figura 20 representa la variación del  $R_{TOF}$  medida sin contacto a diferentes contenidos de humedad (Figura 20a) y sal (Figura 20b). Estos datos vuelven a confirmar las hipótesis enunciadas en la sección 4.4.2. Como se ha comentado en el apartado 4.5.1., el contenido en sal y humedad ejercen efectos contrarios en la velocidad, ya que la propagación del ultrasonido por sólidos es en términos generales más rápida que en líquidos. Además, el proceso de salado genera un efecto de disminución del volumen de los tejidos que acentuaría esta tendencia en relación a que el espesor de los filetes se ve afectado.



**Figura 20.** Evolución del ratio de la variación del tiempo de vuelo de la señal ultrasónica en función del contenido de W (a) y del contenido de sal (b) durante el salado de los filetes de vacuno.

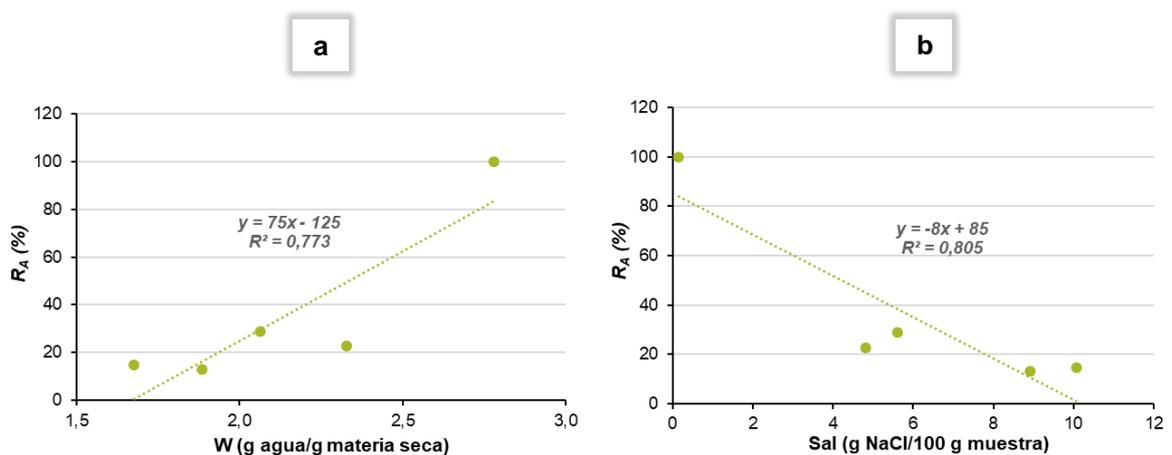
La Figura 21 representa la relación entre el ratio de la variación del tiempo de vuelo del producto salado y fresco con parámetros texturales correspondientes a 0, 1, 2, 4 y 8 h de salado y de producto fresco. En el caso de la dureza ( $F_{max}$ ) (Figura 21a) se observa una relación lineal ( $R^2 = 0,788$ ) significativa ( $p < 0,05$ ) que refleja que a medida que aumenta la dureza, disminuye el  $R_{TOF}$ , es decir el tiempo de propagación en el producto se hace más diferente al del aire, debido al aumento de la velocidad ultrasónica. La explicación a este fenómeno es común a la enunciada en el apartado 4.5.1. que relaciona el aumento de la rigidez y por ende, del módulo elástico y la de densidad, en menor medida, con la velocidad de propagación. Aunque en este caso el parámetro ultrasónico evaluado sea el  $R_{TOF}$ , la relación esperable es equivalente de acuerdo a la **Ec.2**.

A diferencia de las medidas con contacto, donde no se observó una relación entre CRT y velocidad, en el caso de sin contacto se encontró una relación lineal ( $R^2 = 0,936$ ) entre la CRT y el  $R_{TOF}$  (Figura 21b), así a medida que la CRT se hace menor, el  $R_{TOF}$  disminuye, lo que se asocia a un aumento de la velocidad. Es decir, la velocidad ultrasónica aumenta (menor  $R_{TOF}$ ) cuando el filete presenta una mayor componente elástica (menor CRT) (Fariñas et al., 2021). Esta última relación puede presentarse como una ventaja de la técnica de ultrasonidos sin contacto frente a la de contacto, si asumimos como plausible la hipótesis de que la baja correlación encontrada entre velocidad sin contacto y CRT se deba a la presión de los transductores sobre la muestra medida que modifica su respuesta viscoelástica.



**Figura 21.** Relación entre el ratio de variación de tiempo de vuelo del filete fresco y salado medido sin contacto con la dureza ( $F_{max}$ ) (a) y la capacidad de relajación total (CRT) (b)

La Figura 22 representa la relación del ratio de la amplitud máxima ( $R_A$ ) de la señal ultrasónica sin contacto, obtenido para las medidas de filetes frescos y salados de vacuno, con la humedad (W) y el contenido de sal. En la Figura 22a, se comprueba que a medida que la humedad disminuye desde valores de 2,78 g agua/g materia seca en filetes frescos hasta 1,68 g agua/g materia seca en filetes salados 8 h, la amplitud máxima ( $R_A$ ) también disminuye desde el 100% al 15%, respectivamente. Sin embargo, se aprecia un comportamiento contrario con la sal (Figura 22b), aumentando de 0,15 g NaCl/100 g en filetes frescos a 10,08 g NaCl/100 g en filetes salados 8 h, para esos valores de amplitud (100%-15%). Los resultados confirman lo que ya se evidenció en el apartado 4.4.2., el aumento del contenido de sal en las muestras conlleva a un descenso importante del nivel de energía de la onda ultrasónica, concluyendo que salado aumenta la atenuación del filete de vacuno, seguramente propiciado por el aumento del nivel de concentración de solutos.



**Figura 22.** Relación del ratio de amplitud máxima de la señal ultrasónica sin contacto entre filetes salados y frescos de lomo de vacuno con la humedad (W) (a) y el contenido de sal (b).

## 5. Conclusiones

Las conclusiones generales que se obtienen del presente trabajo son las siguientes:

Los parámetros ultrasónicos obtenidos de ambas técnicas utilizadas han demostrado ser sensibles al proceso de salado de filetes de vacuno y los cambios composicionales y fisicoquímicos asociados. En concreto:

- La velocidad ultrasónica obtenida por el método por contacto se puede considerar un parámetro útil para monitorizar el proceso de salado y se relacionó de una forma satisfactoria con el contenido en sal ( $R^2=0,898$ ) y humedad ( $R^2=0,903$ ). La determinación de este parámetro por técnicas sin contacto no fue posible. Este parámetro también mostró una relación satisfactoria con la dureza del filete salado ( $R^2=0,813$ ).
- El ratio de variación de tiempo de vuelo de la señal en el filete salado y fresco obtenido por la técnica de ultrasonidos sin contacto se puede considerar un parámetro relevante para monitorizar el proceso de salado dada su relación significativa ( $p<0,05$ ) con el contenido de sal ( $R^2=0,549$ ) y humedad ( $R^2=0,697$ ). Mejores relaciones se encontraron entre el ratio de variación de tiempo de vuelo y las propiedades texturales, como la capacidad de relajación (CRT) ( $R^2=0,788$ ) y la dureza ( $R^2=0,936$ ). La dificultad en la realización de una medida precisa del espesor de la muestra en la zona de medida dificultó la estimación de la velocidad ultrasónica con esta técnica.
- El ratio de amplitud de la señal entre el filete salado y fresco obtenido mediante la técnica sin contacto presentó una relación satisfactoria con el contenido de humedad ( $R^2=0,773$ ) y sal ( $R^2=0,805$ ). El cálculo de este parámetro con las técnicas por contacto no aporta una información relevante dado la perturbación que provoca en la energía transmitida el contacto entre el transductor y filete.

El presente trabajo ha puesto de manifiesto la viabilidad del uso de ultrasonidos sin contacto, mediante el análisis del ratio de la variación del tiempo de vuelo y el ratio de amplitud de la señal ultrasónica entre las señales obtenidas para el producto fresco y salado, para la caracterización de textura y cambios composicionales durante el monitorizado del salado de filetes de lomo de vacuno. El análisis en términos de velocidad para ultrasonidos sin contacto podría ser igualmente satisfactorio pero es necesario realizar una medida precisa del espesor del filete.

## Bibliografía

- ALBARRACÍN, W.; SÁNCHEZ, I.C.; GRAU, R.; BARAT, J.M. (2011). Salt in food processing; usage and reduction: a review. *International Journal of Food Science and Technology*, 46: 1329–1336.
- BENEDITO, J.; CARCEL, J.A.; CLEMENTE, G.; MULET, A. (2000). Cheese maturity assessment using ultrasonics. *Journal of Dairy Science*, 83: 248-254.
- CANDEK-POTOKAR, M.; SKRLEP, M. (2012). Factors in pig production that impact the quality of dry-cured ham: a review. *Animal*, 6:2: 327-338.
- CHIRALT, A.; FITO, P.; BARAT, J.; ANDRÉS, A.; GONZÁLEZ-MARTÍNEZ, C.; ESCRICHE, I.; CAMACHO, M. (2001). Use of vacuum impregnation in food salting process. *Journal Food Engineering*, 49: 141-151.
- CONTRERAS, M. (2020). Use of ultrasound for the characterization and correction of textural defects in dry-cured ham. *Tesis doctoral*. Universidad Politécnica de Valencia.
- CORONA, E.; GARCIA-PEREZ, J.V.; MULET, A.; BENEDITO, J. (2013). Ultrasonic assessment of textural changes in vacuum packaged sliced Iberian ham induced by high pressure treatment or cold storage. *Meat Science*, 95: 389–395.
- DE PRADOS, M. (2016). Caracterización mediante ultrasonidos de señal de los cambios composicionales del jamón curado durante su procesado. *Tesis doctoral*. Universidad Politécnica de Valencia.
- DE PRADOS, M., GARCIA-PEREZ, J.V., BENEDITO, J. (2015). Non-destructive salt content prediction in brined pork meat using ultrasound technology. *Journal Food Engineering*, 154: 39-48.
- DE PRADOS, M., GARCIA-PEREZ, J.V., BENEDITO, J. (2016). Ultrasonic characterization and online monitoring of pork meat dry salting process. *Food Control*, 60: 646–655.
- DE PRADOS, M., GARCIA-PEREZ, J.V., BENEDITO, J. (2017). Non-invasive ultrasonic technology for continuous monitoring of pork loin and ham dry salting. *Meat Science*, 128: 8-14.
- DE PRADOS, M.; GARCÍA-PÉREZ, J.V.; BENEDITO, J. (2015). Non-destructive salt content prediction in brined pork meat using ultrasound technology. *Journal Food Engineering*, 154: 39–48.
- DINÇER, E.A.; ERBAŞ, M. (2018) Drying kinetics, adsorption isotherms and quality characteristics of vacuumdried beef slices with different salt contents. *Meat Science*, 145: 114-120.
- FARIÑAS, L.; CONTRERAS, M.; SANCHEZ-JIMENEZ, V.; BENEDITO, J.; GARCIA-PEREZ, J.V. (2021). Use of air-coupled ultrasound for the non-invasive characterization of the textural properties of pork burger patties. *Journal Food Engineering*, 297: 110481.
- FULLADOSA, E.; AUSTRICH, A.; MUÑOZ, I.; GUERRERO, L.; BENEDITO, J.; LORENZO, J.M.; GOU, P. (2018). Texture characterization of dry-cured ham using multi energy X-ray analysis. *Food Control*, 89: 46-53.
- GARCIA-PEREZ, J.V.; DE PRADOS, M.; MARTINEZ, G.; GOMEZ ALVAREZ-ARENAS, T.E.; BENEDITO, J. (2019). Ultrasonic online monitoring of the ham salting process. Methods for signal analysis: Time of flight calculation. *Journal Food Engineering*, 263: 87–95.

- GÓMEZ ÁLVAREZ-ARENAS, T.E.; SHROUT, T.; ZHANG, SHUJUN; LEE, HYEONG JAE. (2012). Air-Coupled Transducers Based on 1-3 Connectivity Single Crystal Piezocomposites. *Proceedings, 2012 IEEE International Ultrasonics Symposium, Dresden, Germany, 7-10 October 2012*. 10.1109/ULTSYM.2012.0557.
- GOU, P.; MORALES, R.; SERRA, X.; GUÀRDIA, M.D.;. (2008). Effect of a 10-day ageing at 30°C on the texture of dry-cured hams processed at temperatures up to 18°C in relation to raw meat pH and salting time. *Meat Science*, 80: 1333-1339.
- JUÁREZ, M.; ALDAI, N.; LÓPEZ-CAMPOS, Ó.; DUGAN, M. E. R.; UTTARO, B.; AALHUS, J. L. (2012). Beef Texture and Juiciness, en: *Handbook of meat and meat processing*, 2ª Ed. CRC Press. US: 177-206.
- KINSLER, L.E.; FREY, A.R.; COPPENS, A.B.; SANDERS, J.V. (1999). *Fundamentals of acoustics*. John Wiley & Sons, US.
- KUMARI S.O.; BRIJESH K.T.; O'DONNELL C.P. (2018). Effect of Ultrasound Technology on Food and Nutritional Quality, en: *Advances in food and nutrition research*, vol 84. 1ª Ed. Academic Press. US: 207-240.
- LORENZO, J.M. (2014). Changes on physico-chemical, textural, lipolysis and volatile compounds during the manufacture of dry-cured foal "cecina". *Meat Science*, 96: 256-263.
- MIOTA, P. (2016). Monitorización del salado y post-salado de lomo mediante ultrasonidos. *Trabajo de fin de grado*. Universidad Politécnica de Valencia.
- MORALES, R.; SERRA, X.; GUERRERO, L.; GOU, P. (2007). Softness in dry-cured porcine biceps femoris muscles in relation to meat quality characteristics and processing conditions. *Meat Science*, 77: 662-669.
- PURRIÑOS, L.; BERMÚDEZ, R.; TEMPERÁN, S.; FRANCO, D.; CARBALLO, J.; LORENZO, J.M.; (2011). Influence of salt content and processing time on sensory characteristics of cooked "lacón". *Meat Science*, 87: 436-442.
- RUIZ-RAMÍREZ, J.; ARNAU, J.; SERRA, X.; GOU, P. (2005). Relationship between water content, NaCl content, pH and texture parameters in dry-cured muscles. *Meat Science*, 70: 579-587.
- SÁNCHEZ, E.A. (2018). Análisis de textura en aguacate mediante ultrasonidos de señal sin contacto. *Trabajo de fin de grado*. Universidad Politécnica de Valencia.
- SCHINDEL, D.W.; HUTCHINS, D.A. (1995). Through-thickness characterization of solids by wideband air-coupled ultrasound. *Ultrasonics*, 33: 11-17.
- TELIS, V.R.N.; ROMANELLI, P.F.; GABAS, A.L.; TELIS-ROMERO, J. (2003). Salting kinetics and salt diffusivities in farmed Pantanal caiman muscle. *Pesqui. Agropecuária Bras.*, 38: 529-535.
- TOLDRÁ, F.; BARAT, J.M.; (2014). Low-Sodium Products, en: *Handbook of Fermented Meat and Poultry*. 2ª Ed. Wiley Blackwell. US: 251-257.
- WARNER, R.D. (2017). The Eating Quality of Meat- IV Water-Holding Capacity and Juiciness, en: *Lawrie's meat science*, 8ª Ed. John Wiley & Sons. US: 419-459.
- YOUNG, O.A.; FROST, D.A.; AGNEW, M. (2012). Analytical Methods for Meat and Meat Products, en: *Handbook of meat and meat processing*, 2ª Ed. CRC Press. US: 139-159.