

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA**

**Departamento de Tecnología de Alimentos**



**EFFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LA DIFUSIÓN DEL  
IÓN NITRITO DURANTE EL CURADO DEL JAMÓN**

**MÁSTER EN CIENCIA E INGENIERÍA DE LOS ALIMENTOS**

**Presentada por:**

**Jaime Carmona López**

**Dirigida por:**

**Dra. Neus Sanjuán Pellicer**

**Dra. Gabriela Clemente Polo**

**Valencia, 2010**

# EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LA DIFUSIÓN DEL IÓN NITRITO DURANTE EL CURADO DEL JAMÓN

Carmona, J.; Sanjuán, N.<sup>1</sup>; Clemente, G.<sup>1</sup>; Gómez, J.<sup>1</sup>

## RESUMEN

El jamón curado es un producto tradicional en cuyo proceso de elaboración se emplean sales de curado, entre las cuales destaca el nitrito sódico ( $\text{NaNO}_2$ ). El estudio de la difusividad de estas sales es muy importante a la hora de determinar el tiempo necesario con el que obtener unas características óptimas, tanto de calidad como sanitarias, en el producto terminado.

La temperatura es un parámetro fundamental en cualquier proceso de difusión. En el presente trabajo, se estudió el efecto de la temperatura sobre la difusión del ión nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) en el jamón, tomando como modelo de estudio el músculo *Semimembranosus*. Se prepararon muestras cilíndricas del tejido y se envolvieron sus caras laterales con film plástico, dejando descubiertas sus bases. Los cilindros se colgaron en cámaras a temperaturas de 2, 7 y 12 °C, con una humedad relativa del 95%, de forma que una de sus bases se encontrara sumergida en una salmuera saturada de nitrito sódico. Cada determinado tiempo, se descolgó una muestra cilíndrica y se dividió en cuatro secciones, determinándose el contenido en nitritos en cada una de ellas mediante un método espectrofotométrico.

La temperatura influyó sobre la difusividad del ión nitrito en el músculo *Semimembranosus*, de manera que se produjo un incremento de ésta con el aumento de la temperatura.

**PALABRAS CLAVE:** Concentración, curado, modelo difusivo, temperatura, transferencia de materia.

## RESUM

El pernil salat és un producte tradicional on es fan servir en el seu procés d'elaboració sals de curat, entre les quals destaca el nitrit sòdic ( $\text{NaNO}_2$ ). L'estudi de la difusivitat d'aquestes sals és molt important a l'hora de determinar el temps necessari amb el que obtenir unes característiques òptimes, tant de qualitat com sanitàries, en el producte acabat.

La temperatura és un paràmetre fonamental en qualsevol procés de difusió. En el present treball, es va estudiar l'efecte de la temperatura sobre la difusió de l'ió nitrit ( $\text{NO}_2^-$ ) en el pernil, prenent com a model d'estudi el múscul *Semimembranosus*.

---

<sup>1</sup> GRUPO ASPA (Análisis y Simulación de Procesos Agroalimentarios). Departamento de Tecnología de Alimentos. Universidad Politécnica de Valencia. C/ Camino de Vera, s/n, 46022, Valencia, España.

Es varen preparar mostres cilíndriques del teixit i s'embolicaren les seues cares laterals amb film plàstic, deixant descobertes les seues bases. Els cilindres es varen penjar en cambres a temperatures de 2, 7 i 12 °C, amb una humitat relativa del 95%, de manera que una de les seues bases s'encontrava submergida en una salmorra saturada de nitrit sòdic. Cada cert temps, es despenjava una mostra cilíndrica i es dividia en quatre seccions, determinant el contingut en nitrats en cadascuna d'elles mitjançant un mètode espectrofotomètric.

La temperatura va influir sobre la difusivitat de l'ió nitrit en el múscul *Semimembranosus*, de manera que es produí un increment d'aquesta amb l'augment de la temperatura.

PARAULES CLAU: Concentració, curat, model difusiu, temperatura, transferència de matèria.

## ABSTRACT

Curing ham is a traditional product. During its production process salts are used, being sodium nitrite ( $\text{NaNO}_2$ ) one of them. The study of the diffusivity of these salts is very important in determining the time required to obtain the optimal characteristics of quality and health in the final product.

Temperature is a key parameter in any process of diffusion. In this paper, we studied the effect of temperature on the diffusion of nitrite ion ( $\text{NO}_2^-$ ) in the ham. The *Semimembranosus* muscle of ham was our study model. Cylindrical samples were prepared whose tissue sides wrapped with plastic film, exposing its foundations. The cylinders were hung in climatic-storage room at 2, 7 and 12 °C with relative humidity at 95%. One of their bases was immersed in saturated brine with sodium nitrite. Each given time, a cylindrical sample was picked up and it was divided into four sections, determining the content of nitrite by a spectrophotometric method.

The temperature influenced on diffusivity of nitrite ion in muscle *Semimembranosus*, thus there was an increase on this with increasing temperature.

KEY WORDS: Concentration, cured, diffusivity model, mass transfer, temperature.

## INTRODUCCIÓN

El jamón curado es uno de los productos cárnicos más emblemáticos y de mayor tradición de nuestra gastronomía, siendo uno de los más antiguos alimentos conservados que se conocen.

Su procedimiento de obtención ha sufrido escasas variaciones a lo largo del tiempo. Actualmente, la tecnología del jamón curado busca incrementar su valor añadido y mejorar sus características sensoriales típicas.

En España, la industria productora de jamón curado representa la línea de consumo más importante dentro del sector cárnico, mostrando una tendencia ascendente en los últimos años. En el 2008, de los más de 30 millones de piezas elaboradas, aproximadamente el 90% pertenecían a jamón y paleta curados (AICE, 2009).

La técnica del curado es un método de conservación de los alimentos cuyos orígenes se pierden en la antigüedad. Se descubrió que las impurezas de la sal conocidas como *salpetre*, principalmente nitrato potásico, producían cambios característicos en el sabor, aroma y color de la carne. Sin embargo, no fue hasta la mitad del siglo XIX cuando se determinó científicamente el modo de acción del nitrato. En la actualidad, se sabe que el nitrato se reduce a nitrito por acción bacteriana, y que el color característico de los productos cárnicos curados se debe al efecto del nitrito (Flores y Toldrá, 1993). Los avances de la ciencia han llevado al uso directo de nitrito en lugar de nitrato, lo cual ofrece ciertas ventajas tecnológicas tales como la adición de menores cantidades de sal de curado, o la reducción de sus niveles residuales en el producto terminado.

Respecto a los diferentes tipos de curado existentes, destacan el método en seco, mediante inyección y el conocido como curado húmedo, siendo este último el más utilizado por las industrias productoras de jamón curado. Esta técnica consiste en sumergir la pieza de carne a curar en una salmuera preparada a partir de sales de curado, entre las cuales se encuentra el nitrito sódico ( $\text{NaNO}_2$ ). El motivo por el que se escoge mayoritariamente esta forma de curado es su facilidad para obtener un producto con un sabor mucho más suave. Además de ello, esta técnica permite reducir la mano de obra requerida por las industrias productoras de jamón curado que la aplican en su proceso productivo (Pearson y Gilett., 1996).

En la carne curada es necesario mantener los niveles microbiológicos en valores seguros para la salud del consumidor; para ello, se deben establecer medidas de control sobre las dosis de las distintas sales que conformarán la salmuera, y que serán transferidas al producto terminado. Con ello, se conseguirá una actividad de agua adecuada y se evitará la proliferación de microorganismos mediante las justas cantidades de conservantes químicos, sin que aquellas superen el valor permitido por la ley para cada uno de éstos. En el caso de los nitritos, su concentración máxima permitida en España es de 100 ppm expresadas como nitrito de sodio en el producto final, tal y como se recoge en la lista positiva de aditivos alimentarios vigente (RD 142/2002).

Actualmente, la Unión Europea está estudiando modificar los niveles permitidos de nitrito en productos cárnicos (EFSA, 2003),

dado que los niveles indicativos de adición que fija la norma comunitaria se encuentran por encima de los niveles de adición máximos permitidos por la legislación de algunos de los países miembros (Toldrá, 2005). Este es el caso del nitrato, que no se emplea como agente de curado en los países del norte de Europa pero sí en los de la Cuenca Mediterránea.

Respecto al uso exclusivo de nitrito sódico en el curado de productos cárnicos, a pesar de haberse estudiado en numerosos trabajos científicos, se desconoce tanto su comportamiento difusivo en el interior de los pernils, como el efecto que ejercen sobre él parámetros tales como la temperatura del proceso.

La difusión de las sales en alimentos sólidos, principalmente cloruro sódico (NaCl), ha sido estudiada por muchos investigadores (Graiver et al., 2006; Pinotti et al., 2001; Siró et al., 2009; Wang et al., 2000) y, respecto al proceso de curado húmedo, se tiene a día de hoy gran cantidad de información sobre los efectos que producen las distintas sales de curado (NaCl, NaNO<sub>2</sub> y KNO<sub>3</sub>) sobre la macro y la microestructura del alimento tratado; además de conocerse que la mayoría de productos que han sido curados en salmuera, presentan una significativa pérdida de agua como consecuencia del proceso (Vestergaard et al., 2005).

En estudios previos llevados a cabo por Graiver et al. (2005), se llegó a la conclusión de que las modificaciones que ejercían las sales de curado sobre la microestructura del tejido cárnico, serían dependientes de los coeficientes de difusión de aquellas, tal y como ya intuyeron en investigaciones anteriores Pinotti et al. (2000) y Wang et al. (2000).

Graiver (2006) comprobó que, en el caso del curado húmedo, el desplazamiento del agua, tanto en contracorriente como en paralelo, era directamente dependiente del contenido en sales de la salmuera. Además, observó que en periodos largos de tratamiento, al alcanzarse las condiciones de equilibrio, la carne sufría importantes cambios tanto de composición como de microestructura, los cuales eran más acusados a mayores concentraciones de sal, principalmente de NaCl. Para salmueras con cantidades de cloruro sódico comprendidas entre 5 y 120 g/ L, el tejido tratado ganaba agua e incorporaba grandes cantidades de solutos, provocando el hinchazón de las fibras debido a la elevada capacidad de retención de agua que poseen las proteínas miofibrilares que conforman las fibras de la carne (Belitz y Grosch, 1997). De hecho, se ha comprobado que, dependiendo de cómo sea la composición de la salmuera, se dará un mayor o menor desplazamiento significativo de agua desde el exterior hacia el interior de las miofibrillas (Bertram et al., 2001).

Los fenómenos difusionales en alimentos son la base de muchos de los procesos de transferencia de materia que se dan durante su procesado o almacenamiento. Por tanto, el conocimiento de su base teórica, junto a los análisis experimentales, son de gran importancia para el estudio y el control del contenido en nutrientes presente en el producto.

La aplicación de los modelos difusivos suele dar buenos resultados a la hora de modelizar los cambios de composición durante un proceso de transferencia de masa. No obstante, como consecuencia de la simultaneidad en el desacoplamiento de aquellos, las ecuaciones difusionales se utilizan de

forma empírica para obtener coeficientes aparentes de difusividad, al no permitir aquellas determinar verdaderos valores de difusividad molecular (Crank, 1975).

En la bibliografía, existen numerosos estudios que han intentado determinar la cinética de salado en los alimentos mediante la obtención de coeficientes de difusión para el NaCl y el agua. Sin embargo, no se han desarrollado estudios sobre la difusión en la carne de otras sales de curado como el nitrito sódico.

Con el fin de contribuir a la mejora de la tecnología del jamón curado, se marcó como objetivo del presente trabajo el estudio de la influencia de la temperatura sobre la difusión del ión nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) durante la etapa de curado del jamón, tomando como modelo de estudio el músculo *Semimembranosus*.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

### **Materia prima**

#### **EL PERNIL**

La materia prima utilizada para las experiencias fue el músculo *Semimembranosus* de la extremidad posterior o pernil del cerdo blanco (*Sus scrofa domestica*). En concreto, se utilizaron 6 músculos *Semimembranosus* extraídos de pernils frescos.

Con el fin de reducir la heterogeneidad de la materia prima, se fijaron una serie de parámetros a la hora de elegir los pernils:

- El sacrificio de los cerdos se realizó a la vez; es decir, los cerdos permanecieron en reposo el mismo período de tiempo y fueron sacrificados en el matadero de forma continua.
- Los pernils poseían un peso promedio de  $10.01 \pm 0.39$  kg, consiguiendo de este modo que los músculos *Semimembranosus* tuviesen un peso lo más homogéneo posible.
- Otro parámetro fijado fue el pH, seleccionando aquellas piezas que poseían un pH entre 5.5 y 6.9, medido mediante un pH-metro Matthäus modelo pH-STAR CPU (Pötmes, Alemania), con el fin de evitar el riesgo de adquirir carnes PSE o DFD.
- Tras el sacrificio, los pernils se empaquetaron individualmente en bolsas de plástico y se refrigeraron a  $2 \pm 1$  °C, manteniéndolos a esa temperatura hasta el momento de la extracción de los músculos *Semimembranosus*.

#### **AGENTE DE CURADO**

El agente de curado utilizado en todas las experiencias fue nitrito sódico ( $\text{NaNO}_2$ ) de uso alimentario.

## Preparación de las muestras

La extracción de los músculos *Semimembranosus* se llevó a cabo mediante corte a cuchillo, eliminando en primer lugar la piel y el exceso de grasa de los perniles. A continuación, se fueron separando los distintos músculos del hueso hasta conseguir extraer el músculo *Semimembranosus* (figura 1).



**FIGURA 1.** Músculo *Semimembranosus* de cerdo doméstico.

El número de músculos *Semimembranosus* que se necesitaron para el desarrollo de una experiencia, con su respectiva repetición, fueron dos. Se obtuvieron 14 cilindros mediante un sacabocados por cada músculo, 13 destinados al tratamiento de curado y uno correspondiente a la muestra sin tratamiento, siendo las dimensiones de todos ellos de 8.4 cm de longitud y 2.1 cm de diámetro. Sus caras laterales fueron recubiertas con film plástico dejando descubiertas sus bases.

Como se hicieron tres experiencias, cada una de ellas a una temperatura experimental distinta (2, 7 y 12 °C), con su correspondiente repetición, se extrajeron un total de 84 muestras cilíndricas al finalizar el presente trabajo (tabla 1).

**TABLA 1.** Número de muestras cilíndricas que se necesitaron para el desarrollo de las experiencias a cada una de las tres temperaturas experimentales (2, 7 y 12 °C).

	Nº de cilindros por experiencia	Nº de cilindros por repetición	Nº total de muestras
Temperatura 2 °C	14	14	28
Temperatura 7 °C	14	14	28
Temperatura 12 °C	14	14	28
			84

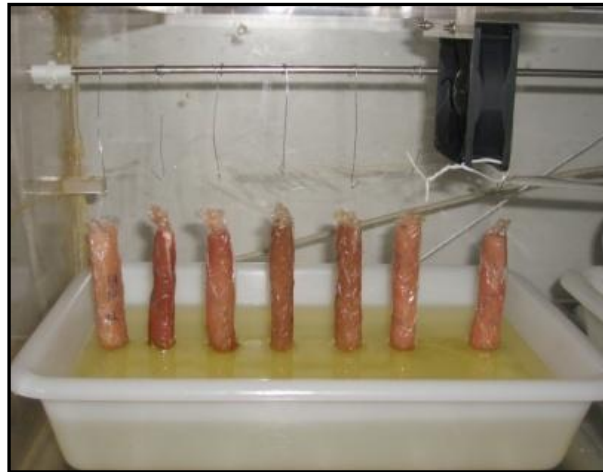
## DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO EN HUMEDAD

El contenido en humedad de las muestras se determinó por triplicado de acuerdo con el método oficial de la AOAC 950.46 (2000), para la determinación gravimétrica de la pérdida de masa de la muestra desecada hasta masa constante, en estufa de aire y a una temperatura de 105 °C.

## Tratamiento de curado

El método de curado escogido para el tratamiento de los cilindros fue curado húmedo. Para ello, se preparó una salmuera saturada a partir de nitrito sódico ( $\text{NaNO}_2$ ) de uso alimentario y agua destilada. Con este preparado se llenaron cuatro bandejas con el mismo contenido de salmuera (0.5 L), y se introdujeron en dos cámaras bajo temperatura ( $2 \pm 2$ ,  $7 \pm 2$  y  $12 \pm 2$  °C) y humedad relativa (95%) controladas.

Se colgaron 13 cilindros por cada cámara, de manera que una de sus bases quedara sumergida en la salmuera (figura 2).



**FIGURA 2.** Detalle de las cámaras de tratamiento de curado, en el cual se aprecia la disposición de las muestras cilíndricas sobre la salmuera.

Cada cierto tiempo, se descolgó un cilindro para interrumpir el proceso de curado y se procedió a la determinación de su contenido en nitritos.

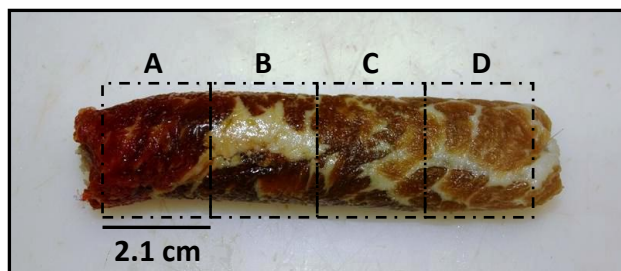
Los tiempos de interrupción fueron 0, 0.5, 1, 1.5, 2, 3, 4, 7, 9, 11, 14, 16, 18 y 21 días desde el inicio del tratamiento.

Los tres experimentos realizados a distintas temperaturas controladas, se llevaron a cabo por duplicado para examinar la variabilidad de los datos obtenidos.

## Determinación de la concentración de nitritos

Tras descolgar un cilindro, este se cortó en cuatro secciones: A (zona en contacto con la salmuera), B, C y D (zona más alejada de la salmuera), de 2.1 cm de longitud cada una de ellas, envolviéndose posteriormente con film plástico de forma individual para preservar su contenido en humedad (figura 3).





**FIGURA 3.** Muestra cilíndrica del músculo *Semimembranosus* de cerdo doméstico después de 21 días de tratamiento de curado húmedo en salmuera saturada de  $\text{NaNO}_2$ . En la figura se observan las cuatro secciones en que se dividieron los cilindros de carne.

A continuación, se trituró cada una de las secciones mediante una picadora Minimixer 300W-BP4530 y se trasvasaron 5 g del picado a un matraz de 300 mL. Posteriormente, se incorporaron 200 mL de agua PA-ACS a cada uno de los matraces y se introdujeron en un baño a 100 °C durante 10 minutos. Pasado este tiempo, se homogeneizó el contenido de cada matraz mediante un equipo ultraturrax modelo T25 (IKA Labortechnik, Janke & Kunkel GMBH & Co., Staufen, Alemania), con un vástago modelo S25N-18G, a una velocidad de 9500 r.p.m. durante 10 minutos, manteniendo los matraces en el baño a la misma temperatura de calentamiento (100 °C) con el fin de mejorar el proceso de extracción.

Tras obtener los homogeneizados de cada sección, se dejaron atemperar los matraces a temperatura ambiente (25 °C) y se trasvasó su contenido a aforados de 250 mL, enrasándolos con agua PA-ACS. Posteriormente, se filtraron 50 mL de cada uno de ellos mediante filtros de papel, recogiendo el volumen filtrado en un bote para extracciones sobre el cual se determinó la concentración en nitritos ( $\text{NO}_2^-$ ).

La cuantificación del ión nitrito se realizó siguiendo el método oficial de la AOAC (2000) donde, a partir de la reacción colorimétrica que se da entre el ión nitrito con los reactivos de sulfamida y N-(1-naftil)-etilendiamina, se genera un diazocompuesto de color rosa (reacción de Griess), cuyo pico de absorbancia se da a 520 nm. La señal espectrofotométrica obtenida fue comparada con una curva patrón de nitritos previamente preparada, dando como resultado un valor proporcional a la cantidad de nitritos presente en la muestra.

Este procedimiento se llevó a cabo para cada una de las cuatro secciones en que se dividieron los 14 cilindros pertenecientes a una experiencia. Como se realizaron tres ensayos a tres diferentes temperaturas experimentales (2, 7 y 12 °C), con sus respectivas repeticiones, se obtuvieron 336 extractos de nitritos al finalizar las experiencias. Por otra parte, la cuantificación de la concentración de nitritos se hizo por triplicado para cada una de las extracciones obtenidas, realizándose un total de 1008 medidas espectrofotométricas al finalizar el presente trabajo (tabla 2).

**TABLA 2.** Número de extracciones y medidas espectrofotométricas que se llevaron a cabo a lo largo del presente trabajo.

	Nº de cilindros (x 2)	Nº de secciones por cilindro	Nº total de extracciones	Nº total de medidas
Temperatura 2 °C	28	4	112	336
Temperatura 7 °C	28	4	112	336
Temperatura 12 °C	28	4	112	336
			336	1008

## Modelización

La modelización de los datos experimentales se realizó mediante un modelo difusivo basado en la segunda ley de Fick, asumiendo que los cilindros de carne poseían una geometría de lámina semi-infinita, la transferencia de masa se daba sin resistencia externa al transporte de materia, y las dimensiones de las muestras permanecían constantes a lo largo del tratamiento de curado. A partir de estas premisas, se obtuvo la ecuación de gobierno (ecuación 1), la condición inicial (ecuación 2) y las condiciones de contorno (ecuación 3 y 4).

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (1)$$

$$C(t = 0) = C_0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t}(x = 0) = 0 \quad (3)$$

$$C(L) = C_e \quad (4)$$

Resolviendo e integrando la ecuación de gobierno y las condiciones de inicio y contorno, se obtuvo la ecuación general del proceso (ecuación 5).

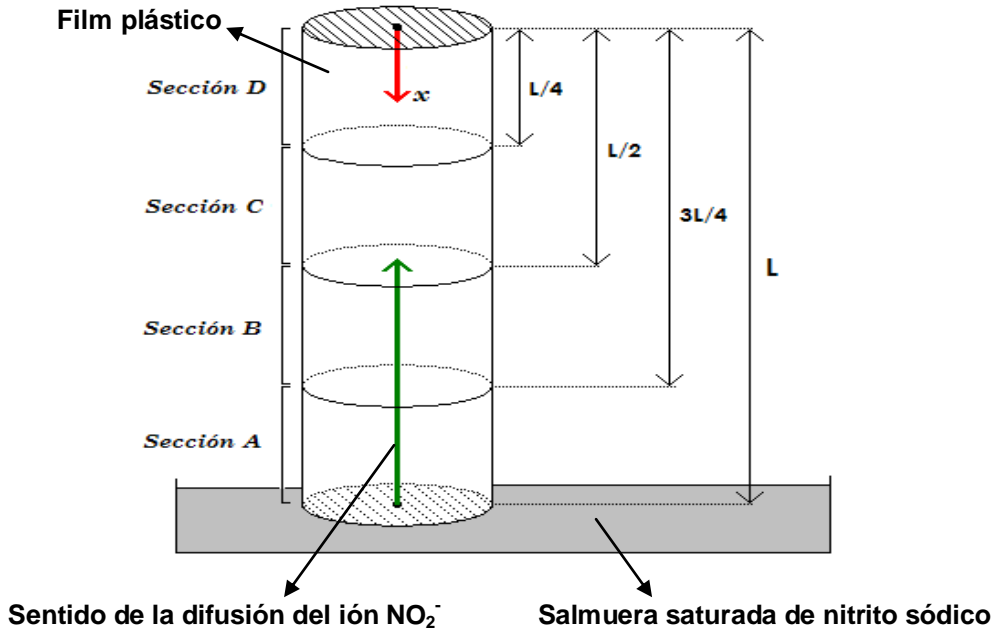
$$\frac{C(x, t) - C_e}{C_0 - C_e} = 2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{\lambda n L} e^{-D\lambda^2 n t} \cos(\lambda n x) \quad (5)$$

siendo

$$\lambda n L = (2n + 1) \frac{\pi}{2}, n = 0, 1, 2, \dots \quad (6)$$

donde: C = concentración de nitrito respecto al tiempo ( $\text{mg NO}_2^- \cdot \text{L}^{-1}$ );  $C_e$  = concentración de nitrito en equilibrio ( $\text{mg NO}_2^- \cdot \text{L}^{-1}$ );  $C_0$  = concentración de nitrito inicial ( $\text{mg NO}_2^- \cdot \text{L}^{-1}$ ); D = coeficiente de difusividad efectiva ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ); L = longitud de las muestras (m); t = tiempo de tratamiento (s); n = número de términos experimentales; y x = distancia axial (m).

En la figura 4 se esquematiza la difusión del ión nitrito en cada una de las secciones en que se dividieron las muestras cilíndricas.



**FIGURA 4.** Esquema donde se indica la longitud de cada una de las secciones en que se dividieron las muestras cilíndricas, el sentido de la difusión del ión NO<sub>2</sub><sup>-</sup> en las mismas, y la distancia axial considerada ( $x$ ).

Como en el proceso de obtención de los extractos de nitritos se homogeneizaron las cuatro secciones en que se dividieron las muestras cilíndricas (figura 3), las concentraciones de ión nitrito experimentales obtenidas para cada una de ellas corresponden a valores medios; por tanto, la ecuación general (ecuación 5) tuvo que integrarse de nuevo para cada uno de los tramos en que se dividieron los cilindros de carne (ecuación 7, 8, 9 y 10).

- Sección D ( $0 - L/4$ ):

$$\frac{\bar{C}(t) - C_e}{C_o - C_e} = 8 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(\lambda n L)^2} e^{-D\lambda^2 n t} \text{sen}(\lambda n L/4) \quad (7)$$

- Sección C ( $L/4 - L/2$ ):

$$\frac{\bar{C}(t) - C_e}{C_o - C_e} = 8 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(\lambda n L)^2} e^{-D\lambda^2 n t} [\text{sen}(\lambda n L/2) - \text{sen}(\lambda n L/4)] \quad (8)$$

- Sección B ( $L/2 - 3L/4$ ):

$$\frac{\bar{C}(t) - C_e}{C_o - C_e} = 8 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(\lambda n L)^2} e^{-D\lambda^2 n t} [\text{sen}(\lambda n 3L/4) - \text{sen}(\lambda n L/2)] \quad (9)$$

- Sección A ( $3L/4 - L$ ):

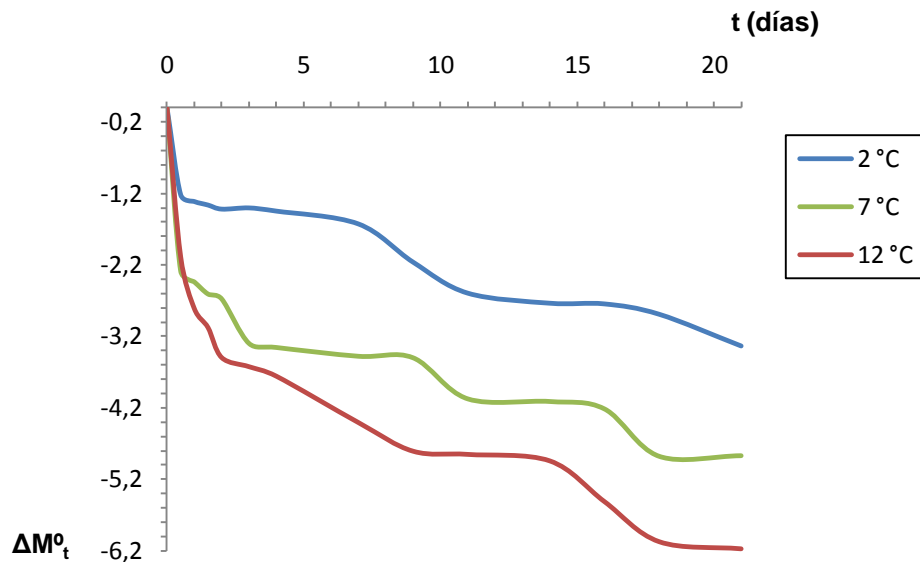
$$\frac{\bar{C}(t) - C_e}{C_o - C_e} = 8 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(\lambda n L)^2} e^{-D\lambda^2 n t} [\text{sen}(\lambda n L) - \text{sen}(\lambda n 3L/4)] \quad (10)$$

donde:  $\bar{C}$  = concentración media de nitrito en cada una de las secciones respecto al tiempo ( $\text{mg NO}_2^- \cdot \text{L}^{-1}$ ).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Variación del peso de las muestras tras el proceso de curado

La variación del peso que sufrieron los cilindros de carne tras finalizar su proceso de curado, para cada una de las tres temperaturas empleadas, se muestra en la figura 5.

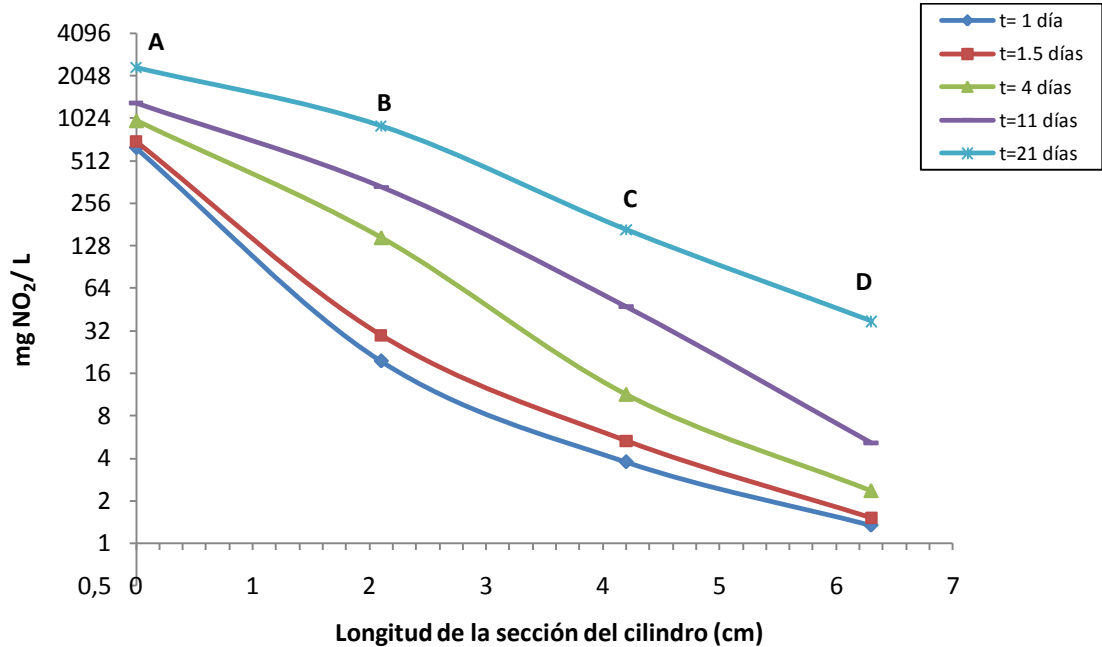


**FIGURA 5.** Variación del peso de las muestras cilíndricas tras el proceso de curado a cada una de las temperaturas de tratamiento.

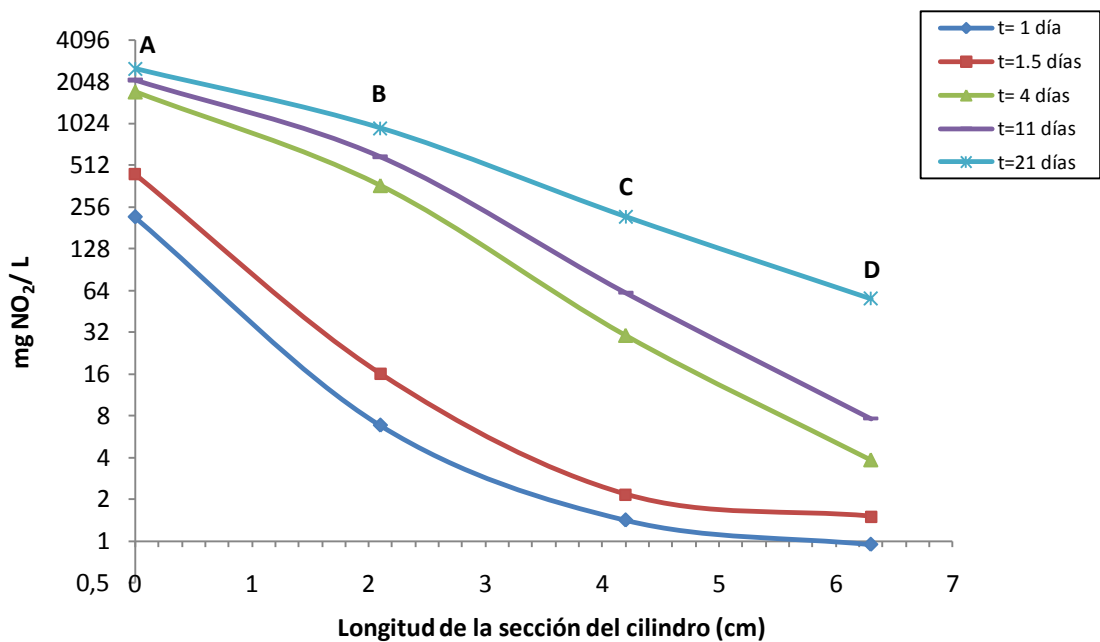
La variación del peso de las muestras durante el periodo de curado fue notable. Durante el tratamiento a una temperatura de 12 °C se alcanzaron las pérdidas de peso más elevadas. Esto se debe a que, al ir aumentando la temperatura de curado, se acelera la pérdida de agua de las muestras; por ello, se incrementa el coeficiente de difusión del agua consiguiendo una mayor pérdida de humedad en la carne (Barat et al., 2006).

## Perfil del contenido en ión nitrito

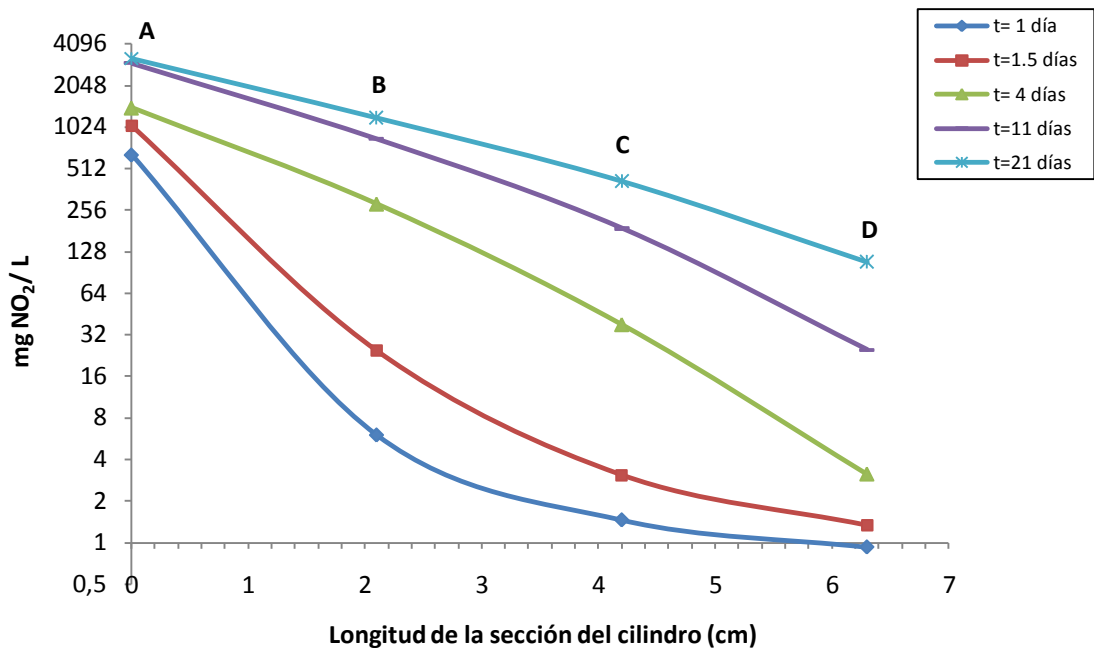
En las figuras 6, 7 y 8 se muestran los perfiles de concentración de nitrito en las muestras cilíndricas, durante 21 días de tratamiento en salmuera saturada de  $\text{NaNO}_2$ , y a una temperatura de 2, 7 y 12 °C, respectivamente.



**FIGURA 6.** Perfil de la concentración de nitrito en las cuatro secciones de las muestras a 2 °C de temperatura durante 21 días de tratamiento.



**FIGURA 7.** Perfil de la concentración de nitrito en las cuatro secciones de las muestras a 7 °C de temperatura durante 21 días de tratamiento.



**FIGURA 8.** Perfil de la concentración de nitrito en las cuatro secciones de las muestras a 12 °C de temperatura durante 21 días de tratamiento.

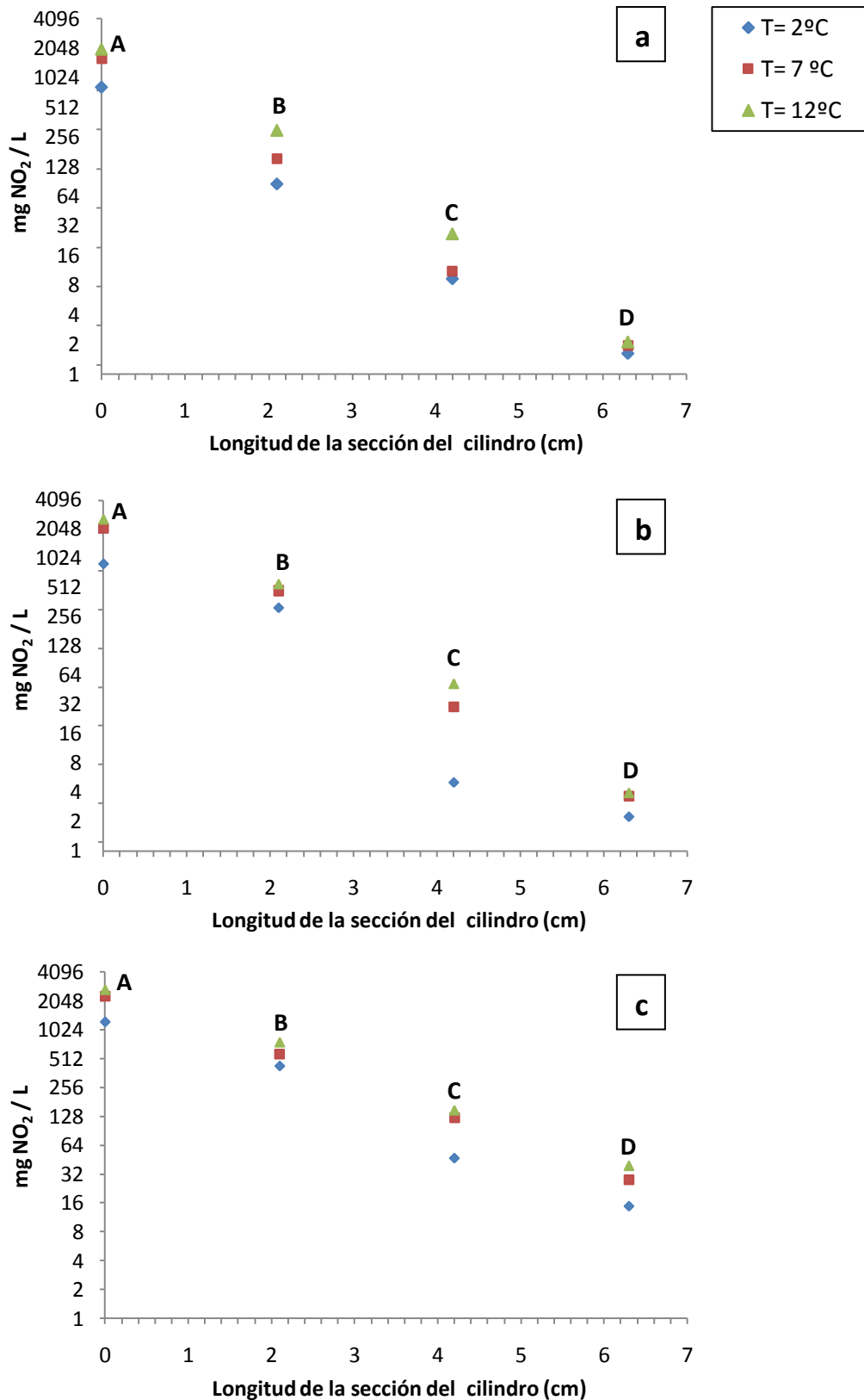
Estas figuras muestran la existencia de diferencias en el contenido de ión nitrito entre los distintos tramos en que se dividieron las muestras cilíndricas.

Como es de esperar, la concentración de nitritos fue siempre mayor en aquellas secciones más cercanas a la salmuera saturada (secciones A y B). También se observó un incremento de la concentración del ión nitrito con el paso de los días de tratamiento; donde, a mayor número de días en contacto con la salmuera, su perfil de concentración en las muestras fue más uniforme; es decir, las diferencias de concentración entre las distintas secciones de los cilindros fueron cada vez más pequeñas.

Estos resultados son comparables con los patrones descritos por Graiver et al. (2009).

### Efecto de la temperatura en la transferencia de nitrito

A partir de los datos experimentales, se representó la variación del contenido de nitritos en las cuatro secciones en que se dividieron las muestras cilíndricas, a los 4, 9 y 16 días de tratamiento, para las tres temperaturas de curado empleadas (figura 9).



**FIGURA 9.** Perfil de la concentración de ión nitrito en las secciones de los cilindros inmersos durante 4 (a), 9 (b) y 16 días (c) en salmuera saturada de NaNO<sub>2</sub> a diferentes temperaturas de tratamiento (2, 7 y 12 °C).

En la anterior figura, se observa que la concentración de nitritos aumenta conforme se incrementa la temperatura de tratamiento. Este aumento tuvo lugar en todas las secciones estudiadas y para todos los tiempos de inmersión. No obstante, cabe señalar que el aumento que se da a la temperatura experimental de 2 °C fue mayor que a 7 y 12 °C. Esto podría ser debido a la elevada disminución de la humedad experimentada por las muestras a estas dos temperaturas, tal y como se observa en la figura 5; donde se ve que, al aumentar la temperatura de tratamiento, se incrementa la pérdida de humedad de la carne. Dado que los nitritos difunden en fase acuosa, una pérdida de agua en los cilindros probablemente dificultó la difusión del ión, no aumentando su concentración como cabría esperar.

### Modelización

A partir de los datos de concentración de nitritos obtenidos durante el proceso experimental, se utilizaron las ecuaciones 7, 8, 9 y 10 del modelo difusivo descrito en el apartado de materiales y métodos para obtener los coeficientes de difusión efectiva a cada temperatura experimental (tabla 3).

**TABLA 3.** Difusividades efectivas del ión nitrito en las muestras cilíndricas para las distintas temperaturas experimentales.

	Tiempo de inmersión (días)	Difusividad (m <sup>2</sup> /s) x 10 <sup>10</sup>
Temperatura 2 °C	21	6.200 ± 0.111
Temperatura 7 °C	21	7.500 ± 0.031
Temperatura 12 °C	21	12.000 ± 0.105

En la tabla anterior se observa que, al incrementar la temperatura de curado de los cilindros, también se incrementaron los coeficientes de difusividad efectiva del ión nitrito en las muestras cilíndricas.

Los valores de difusividad obtenidos son similares a los publicados por Pinotti et al. (2001), quienes estudiaron la difusión de sales de nitrito en presencia de cloruro sódico con el fin de determinar los coeficientes de difusión efectiva a temperaturas de curado comprendidas entre 2 y 20 °C, durante un tiempo corto de procesamiento. De la misma manera, en trabajos realizados por Gou et al. (2003), se vio un incremento en la difusividad efectiva del cloruro sódico en el músculo *Gluteus medius* de cerdo doméstico al aumentar la temperatura de curado.



## CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos, se observó que el incremento de la temperatura puede provocar una mayor disminución de la humedad de las muestras.

Por otra parte, se vio que al aumentar la temperatura de tratamiento, las diferencias en la concentración de nitritos entre las distintas secciones de las muestras eran cada vez más pequeñas.

Finalmente, se observó una influencia de la temperatura sobre la difusividad efectiva del ión nitrito durante el curado del músculo *Semimembranosus*, de manera que se produjo un aumento de su coeficiente de difusividad al incrementar la temperatura del proceso. Como consecuencia de ello, las muestras cilíndricas tratadas presentaron una mayor concentración de ión nitrito, aunque este efecto se vio reducido a 7 y 12 °C, probablemente a causa de la elevada pérdida de humedad experimentada por las muestras a estas dos temperaturas.

## NOMENCLATURA

C	Concentración de nitrito respecto al tiempo	$\text{mg NO}_2^- \cdot \text{L}^{-1}$
$C_e$	Concentración de nitrito en equilibrio	$\text{mg NO}_2^- \cdot \text{L}^{-1}$
$C_0$	Concentración de nitrito inicial	$\text{mg NO}_2^- \cdot \text{L}^{-1}$
$\bar{C}$	Concentración media de nitrito en cada una de las secciones respecto al tiempo	$\text{mg NO}_2^- \cdot \text{L}^{-1}$
D	Coeficiente de difusividad efectiva	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
L	Longitud de las muestras cilíndricas	m
n	Número de términos experimentales	
t	Tiempo de tratamiento	s
x	Distancia axial	m

## AGRADECIMIENTOS

Los autores del presente trabajo agradecen el apoyo económico recibido por parte del Ministerio de Educación y Ciencia a través del programa CONSOLIDER - INGENIO - 2010 (CSD2007-00016).

## REFERENCIAS

- AICE (2009). Panorama del sector cárnico. *Asociación de Industrias de la Carne en España*. [www.aice.es](http://www.aice.es). (Consulta: 25/03/2010)
- Barat, J.M.; Grau, R.; Ibáñez, J.B.; Pagán, M.J.; Flores, M.; Toldrá, F.; Fito, P. (2006). Accelerated processing of dry-cured ham. Part I. Viability of the use of brine thawing/salting operation. *Meat Science*, 72: 757-765.
- Belitz, H.D. y Grosch, W. (1997). *Química de los Alimentos*, second ed. Ed. Acribia Zaragoza, España.
- Bertram, H.; Karlsson, A.; Rasmussen, M.; Pedersen, O.; Dønstrup, S.; Andersen, H. (2001). Origin of multiexponential  $T_2$  relaxation in muscle myowater. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 49 (6), 3092-3100.
- Crank, J. (1975). *The mathematics of diffusion*. Clarendon Press, Oxford, UK.
- EFSA. (2003). Opinion of the Scientific Panel on Biological Hazards on a request from the Commission related to the effects of Nitrites/Nitrates on the Microbiological Safety of Meat Products. [www.efsa.europa.eu](http://www.efsa.europa.eu) (Consulta: 25/03/2010)
- Flores, J. y Toldrá, F. (1993). Curing. In: R. Macrae, R. K.; Robinson, and M. J. Sadler (Eds.) *Encyclopaedia of Food Science, Food Technology and Nutrition*. Pp. 1277-1282. Academic Press Inc.
- Graiver, N. (2006). *Procesos Difusionales en el Curado de Carne*. PhD Thesis Facultad de Ciencias Exactas. Universidad Nacional de La Plata.
- Graiver, N.; Pinotti, A.; Califano, A.; Zaritzky, N. (2005). Diffusion of sodium chloride in meat pork: influence on its microstructure. *The Journal on Scanning Microscopies* 27, 76-77.
- Graiver, N.; Pinotti, A.; Califano, A.; Zaritzky, N. (2006). Diffusion of sodium chloride in pork tissue. *Journal of Food Engineering* 95, 533-540.
- Graiver, N.; Pinotti, A.; Califano, A.; Zaritzky, N. (2009). Mathematical modeling of the uptake of curing salts in pork meat. *Journal of Food Engineering* 95, 533-540.
- Gou, P.; Comaposada, J.; Arnau, J. (2003). NaCl content and temperature effects on moisture diffusivity in the *Gluteus medius* muscle of pork ham. *Meat Science*. 63, 29-34.
- Pearson, A. y Gilett, T. (1996). *Curing en Processed Meats*, third ed. Editorial Chapman & Hall, New York.
- Pinotti, A.; Califano, A.; Zaritzky, N. (2000). Diffusion of curing salts in meat: effect of sodium chloride on tissue microstructure. *The Journal of Scanning Microscopies* 22 (2), 137-138.
- Pinotti, A.; Graiver, N.; Califano, A.; Zaritzky, N. (2001). Diffusion of nitrite and nitrate salts in pork tissue in the presence of sodium chloride. *Journal Food Science* 67, 2165-2171.
- RD 142/2002, de 1 de febrero, por el que se aprueba la *lista positiva de aditivos distintos de colorantes y edulcorantes para su uso en la elaboración de aditivos alimenticios, así como sus condiciones de utilización*.
- Siró, I.; Vén, C.S.; Balla, C.S.; Jónas, G.; Zeke, I.; Friedrich, L. (2009). Application of an ultrasonic assisted curing technique for improving the diffusion of sodium chloride in porcine meat. *Journal Food Engineering* 91, 353-362.
- Toldrá, F. (2005). Norma Europea de aditivos: implicaciones de la reducción de nitratos y nitritos en el jamón curado. In: *III congreso mundial del jamón*.
- Vestergaard, C.; Risum, J.; Adler-Nissen, J. (2005). Na-MRI quantification of sodium and water mobility in pork during brine curing. *Meat Science* 69, 663-672.
- Wang, D.; Tang, J.; Correia, L. (2000). Salt diffusivities and salt diffusion in farmed Atlantic salmon muscle as influenced by rigor mortis. *Journal Food Engineering* 43, 115-123.