

## MODELADO DE TRANSFERENCIA DE CALOR Y MASA DURANTE EL ENFRIAMIENTO DE CARNE VACUNA

### HEAT AND MASS TRANSFER MODELLING DURING BEEF MEAT COOLING

**A. Urquiola<sup>a</sup>, P. Curto-Risso<sup>a</sup> y P. Galione<sup>a</sup>**

<sup>a</sup>Departamento de Termodinámica Aplicada, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay, <https://www.fing.edu.uy>

**Palabras clave:** Modelado numérico, transferencia de calor y masa, enfriamiento de carne vacuna, perdidas de peso por evaporación.

**Resumen.** Con el fin de analizar las pérdidas de peso por evaporación de agua durante el enfriamiento de carne vacuna, se realiza un modelo transitorio de transferencia de calor y masa sobre una pieza de carne de geometría cilíndrica, dentro de un recinto en el que se tiene una circulación de aire. El modelado se realiza utilizando el software COMSOL Multiphysics. La difusión de calor y masa de agua dentro de la carne son modeladas, incorporando la variación de la actividad del agua superficial. Se considera el enfriamiento de la carne por convección, radiación y evaporación de agua. El coeficiente de convección utilizado en el modelo, asumido constante y uniforme, es estimado a partir de mediciones experimentales. Se utiliza el modelo de intercambio de radiación entre superficies de un recinto para determinar el enfriamiento radiativo. El modelo es validado con mediciones experimentales de temperatura de la carne y la masa de agua evaporada acumulada durante el período de enfriamiento. Los resultados obtenidos del modelo y del experimento son muy similares, con un error relativo máximo para la masa evaporada menor al 1 %. El modelo resulta una herramienta útil para evaluar el uso de enfriamiento radiativo para minimizar las pérdidas evaporativas en cámaras frigoríficas.

**Keywords:** Numerical modeling, heat and mass transfer, beef cooling, evaporative weight loss.

**Abstract.** In order to analyze weighth losses due to water evaporation during beef cooling, a transient heat and mass transfer model is developed for a cylindrical piece of meat placed inside a chamber with air circulation. The model is performed using COMSOL Multiphysics software. Heat and water mass diffusion within the meat are modeled, considering variations of surface water activity. Meat cooling by convection, radiation, and water evaporation is considered. The convective heat transfer coefficient used in the model, assumed to be constant and uniform, is estimated from experimental measurements. A model of heat exchange by radiation between surfaces of an enclosure is used to determine radiative cooling. The model is validated with experimental measurements of meat temperature and the accumulated weight loss by water evaporation during the cooling period. The results obtained from the model and the experiment are very similar, with a maximum relative error for evaporated mass of less than 1 %. The model is a useful tool for evaluating the use of radiative cooling to minimize evaporative losses in cold chambers.

## 1. INTRODUCCIÓN

En el procesamiento industrial de la carne, durante las primeras 24 horas post-mortem se produce una compleja cadena de cambios energéticos, bioquímicos y físicos que resultan en la conversión de músculo en carne [Toldra \(2017\)](#); [Savell et al. \(2005\)](#). La velocidad y la duración del metabolismo post-mortem (principalmente la disminución del pH) impactan significativamente en los atributos de calidad de la carne (color, textura y capacidad de retención de agua). La temperatura del músculo durante este período posterior a la faena afecta las reacciones metabólicas y, por lo tanto, el desarrollo de la calidad de la carne [Savell et al. \(2005\)](#), por lo que es un factor importante que debe controlarse durante el enfriamiento de la carne vacuna. Generalmente, este proceso ocurre en una cámara de enfriamiento con circulación de aire forzado con temperatura y humedad controladas. En este proceso, las medias reses calientes y húmedas se enfrian con aire, combinando la transferencia de calor y masa desde la superficie. A medida que el agua superficial se evapora, el agua de la carne se difunde desde el interior hacia la superficie, rehumedeciéndola. Este fenómeno conlleva una pérdida total de peso de la media res de aproximadamente el 2 % ([Mirade et al. \(2002\)](#); [Kuffi et al. \(2016\)](#); [Kuitche et al. \(1996\)](#); [Mallikarjunan y Mittal \(1994\)](#)), lo que implica una pérdida económica para la industria ([Daudin y Kuitche \(1996\)](#)). La pérdida de calor se produce por convección, radiación y evaporación de agua. En un trabajo anterior ([Urquiola et al. \(2024\)](#)) se presentan resultados que indican que el intercambio de calor por radiación durante el proceso de enfriamiento de la carne resulta ser un método interesante para enfriarla rápidamente sin aumentar la masa evaporada, lo que podría permitir reducir las pérdidas de peso por evaporación.

En este trabajo se propone implementar un modelo de transferencia de calor y masa durante el enfriamiento de carne vacuna y validar lo experimentalmente. Para esto se trabaja en paralelo y de forma iterativa en el diseño del montaje experimental y en la implementación del modelo, partiendo del modelo antes implementado para una media res ([Urquiola et al. \(2024\)](#)) pero incorporando el cálculo del intercambio de calor por radiación entre superficies en un recinto ([Bergman y Lavine \(2017\)](#)) y adaptando la geometría. Se propone implementar un dispositivo experimental en el que un trozo de carne de forma cilíndrica se coloca suspendido dentro de un recinto también cilíndrico y entre los cuales se hace circular un flujo de aire, de forma tal que la muestra de carne está expuesta a enfriamiento por convección, radiación y evaporación. En el montaje experimental se miden la evolución de la temperatura de la muestra de carne y del peso de la misma, con el fin de validar el modelo.

## 2. DESCRIPCIÓN DEL MODELO

Aquí se presenta el modelo de difusión de calor y masa en una muestra de carne, basado en el modelo presentado en [Urquiola et al. \(2024\)](#), con la incorporación del modelado más detallado del intercambio de calor por radiación entre la muestra y su entorno y con una geometría adaptada. La carne se trata como un sólido de propiedades uniformes, mientras que la transferencia de calor por convección con el aire se modela con un coeficiente de convección único, determinado experimentalmente. La temperatura del aire es medida, así como su humedad. Para la transferencia de calor por radiación se consideran por separado (como superficies distintas del recinto), la superficie lateral y cada "tapa" por donde entra y sale el aire, el cual es forzado por un ventilador. La temperatura de la superficie lateral se mide, y las de las tapas se asimilan a la temperatura del aire en la sección. La geometría del dispositivo se puede ver en la Fig. 1.

La transferencia de masa entre la superficie de la carne y el aire se modela a través de la analogía de convección de calor y masa, considerando convección forzada, teniendo en cuenta

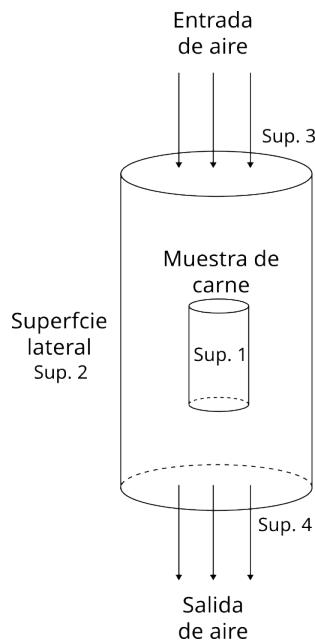


Figura 1: Geometría del dispositivo a montar y modelar.

las variaciones en la actividad del agua tal como se explica en [Urquiza et al. \(2024\)](#). La malla utilizada para discretizar el volumen de carne se adapta para conseguir un mayor refinamiento cerca de la superficie, con el fin de modelar correctamente la difusión de masa, sin aumentar excesivamente el tiempo de cómputo.

## 2.1. Ecuaciones que gobiernan los fenómenos

La transferencia de calor dentro de la carne se modela mediante la ecuación de calor transitorio para un sólido (carne que contiene agua). En las condiciones de enfriamiento del experimento, no tienen lugar reacciones que liberen calor como en el proceso de enfriamiento postmortem, por lo que no se incluye un término de fuente de calor. Con el objetivo de simplificar el modelo y considerando los tiempos del experimento, no se consideran los efectos de la formación de corteza como barrera a la transferencia de agua. En consecuencia, se utiliza la ecuación 1:

$$\rho c_P \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (k \nabla T) = 0 \quad (1)$$

donde  $\rho$ ,  $c_P$  y  $k$  representan, respectivamente, la densidad media, el calor específico medio y la conductividad térmica media de la carne. Los valores de estas propiedades se presentan en la Tabla 1 y se calculan a partir de información obtenida de [ASHRAE \(2006\)](#).

Propiedades de la carne	Valor
$\rho$	1074 kg/m <sup>3</sup>
$c_P$	3498 J/kgK
$k$	0.43 W/m <sup>2</sup> K

Tabla 1: Propiedades de la carne.

Si bien muchos trabajos no consideran la variación de la actividad del agua durante el enfriamiento de carne vacuna ([Davey y Pham \(1997, 2000\); Kuffi et al. \(2016\)](#)), esta puede variar

considerablemente a lo largo del proceso de enfriamiento ([Trujillo y Pham \(2006\)](#)). Dado que la actividad de agua depende del contenido de agua del tejido, es fundamental modelar dicho contenido en el interior de la carne para obtener adecuadamente sus variaciones superficiales. Por consiguiente, en el presente estudio se considera que el movimiento del agua dentro de la carne ocurre por difusión de masa, y se modela mediante la ecuación [2](#):

$$\frac{\partial \rho_l}{\partial t} - \nabla \cdot (D_m \nabla \rho_l) = 0 \quad (2)$$

donde  $\rho_l$  es el contenido de agua de la carne ( $\text{kg/m}^3$ ) y  $D_m$  es la difusividad mísica equivalente, la cual representa todos los mecanismos de transporte de agua en el interior de la carne ([Trujillo et al. \(2007\)](#)). Para el cálculo de  $D_m$ , se emplea la correlación propuesta por [Trujillo et al. \(2007\)](#),  $D_m [\text{m}^2/\text{s}] = 4,67 \times 10^{-5} \exp(-3757,26/T)$ .

## 2.2. Condiciones de borde

La condición del aire alrededor de la muestra de carne se obtiene a partir de mediciones experimentales y se asumen uniformes. La humedad específica del aire se obtiene a partir de la medición de temperatura y humedad relativa del aire ambiente y se asume constante durante todo el experimento.

La pérdida de calor desde la superficie de la carne se debe a la convección, la radiación y la evaporación de agua, por lo que la condición de frontera puede expresarse mediante la Ley de Fourier, como se indica en la ecuación [3](#):

$$-k \nabla T \cdot \hat{n} = \dot{Q''}_C + \dot{Q''}_R + \dot{Q''}_E \quad (3)$$

donde  $\hat{n}$  es la normal saliente de la superficie y los  $Q''$  representan los flujos de calor por unidad de área de convección, radiación y evaporación, respectivamente; definidos como positivos si son salientes del volumen de carne.

El flujo de calor transferido por convección ( $\dot{Q''}_C$ ) se calcula utilizando la ecuación [4](#):

$$\dot{Q''}_C = h(T_s - T_a) \quad (4)$$

donde  $T_s$  es la temperatura en la superficie de la carne,  $T_a$  es la temperatura del aire circundante, y  $h$  es el coeficiente de transferencia de calor por convección. Este coeficiente, asumido constante y uniforme, es estimado a partir de mediciones experimentales en el laboratorio, mediante el enfriamiento de una pieza metálica de igual geometría que la carne, sometido a idénticas condiciones de operación: velocidad del flujo de aire, temperatura del aire y temperaturas de paredes del recinto siguiendo una estrategia similar a la de [Urquiola et al. \(2017\)](#). El valor obtenido para el coeficiente de convección es  $7.9 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

El calor intercambiado por radiación ( $\dot{Q''}_R$ ) se modela a partir del modelo de intercambio de radiación entre superficies de un recinto cerrado, aplicable superficies opacas, difusas y grises ([Bergman y Lavine \(2017\)](#)). Las superficies que participan del intercambio por radiación son: la muestra de carne (Sup. 1), la pared del recinto (Sup. 2) y las "tapas" del recinto por donde entra y sale el aire (Sup. 3 y Sup. 4 respectivamente). Utilizando el software COMSOL Multiphysics se determinaron los factores de vista entre las cuatro superficies, que se presentan en la Tabla [2](#). Como se ve, el factor de vista de la carne con la pared del recinto es grande en relación al de la carne con las "tapas", por lo que las Sup. 3 y Sup. 4 tienen poco impacto en el intercambio radiativo. Estas superficies se modelan como cuerpo negro ( $\varepsilon_3=\varepsilon_4=1$ ), lo cual se justifica dado que se trata de "superficies" con huecos (y por ende pequeñas cavidades que tienden a ser

$F_{i,j}$	1	2	3	4
1	0	0.926	0.037	0.037
2	0.206	0.600	0.097	0.097
3	0.077	0.910	0	0.013
4	0.077	0.910	0.013	0

Tabla 2: Factores de vista entre las superficies.

cuerpos negros) y que son superficies no metálicas. Cada una de estas tapas se asumen a la temperatura del aire de entrada y salida respectivamente. La emisividad de la carne se asume  $\varepsilon_1=0.9$ , obtenido de [Bergman y Lavine \(2017\)](#). La emisividad de la pared del recinto se estima experimentalmente mediante termografía (cámara FLIR 1020), y el valor obtenido es  $\varepsilon_2=0.9$ , verificando además el comportamiento de superficie difusa.

La pérdida de calor por evaporación ( $\dot{Q}_E''$ ) corresponde a la energía requerida para evaporar el agua desde la superficie del producto. Esta pérdida se calcula como la masa evaporada multiplicada por la entalpía de cambio de fase  $h_{fg}$ , según la Ec. 5:

$$\dot{Q}_E'' = \dot{m}_{\text{evap}}'' h_{fg} = h_m (\rho_{v,s} - \rho_{v,a}) h_{fg} \quad (5)$$

donde  $h_m$  es el coeficiente de transferencia de masa por convección, y  $\rho_{v,s}$  y  $\rho_{v,a}$  son las densidades de vapor de agua en la superficie de la carne y en el aire, respectivamente. El coeficiente de convección de masa  $h_m$  se determina mediante la analogía de Lewis, expresada en la Ec. 6:

$$h_m = \frac{h}{\rho_{as} c_{PAH}} L e^{1-n} \quad (6)$$

la cual es válida bajo condiciones de convección forzada. Aquí,  $c_{PAH}$  representa el calor específico del aire húmedo, y  $\rho_{as}$  es la densidad del aire seco. El valor utilizado de  $h_m$  es 0.00633 m/s.

La condición de frontera para la ecuación de transferencia de masa (2) se establece mediante la Ley de Fick, e iguala el flujo difusivo con la masa de agua transferida por convección en la superficie, tal como se expresa en la Ec. 7:

$$-D_m \nabla \rho_l \cdot \hat{n} = h_m (\rho_{v,s} - \rho_{v,a}) \quad (7)$$

Las densidades de vapor en la superficie de la carne y en el aire se calculan mediante las ecuaciones 8 y 9, respectivamente:

$$\rho_{v,s} = \frac{M_{as}}{M_a} \frac{a_w \left( \frac{p_{v,sat}}{p_T} \right)}{1 - a_w \left( \frac{p_{v,sat}}{p_T} \right)} \rho_{as} \quad (8)$$

$$\rho_{v,a} = \frac{M_{as}}{M_a} \frac{HR \left( \frac{p_{v,sat}}{p_T} \right)}{1 - HR \left( \frac{p_{v,sat}}{p_T} \right)} \rho_{as} \quad (9)$$

dónde  $M_{as}$  y  $M_a$  son las masas molares del aire seco y del aire, y  $p_{v,sat}$  y  $p_T$  son la presión de vapor saturado a la temperatura correspondiente y la presión total (presión atmosférica) respectivamente. La densidad de vapor en la superficie depende de la actividad de agua en la superficie de la carne ( $a_w$ ) y la densidad de vapor del aire de la humedad relativa del aire ( $HR$ ) lejos de la superficie. Para la actividad del agua se utiliza la Ec. 10, presentada por [Urquiola et al. \(2024\)](#).

$$a_w = e^{0,2619 - \frac{45,56}{\rho_l} - 0,0328 \ln(\rho_l)} \quad (10)$$

### 2.3. Condiciones iniciales

Con el fin de asemejarse al proceso de enfriamiento postmortem, la muestra de carne parte de una temperatura inicial entre 35 y 40°C, obtenida a partir del calentamiento en un baño de agua. La temperatura de la muestra se obtienen de la medición experimental y se asume uniforme.

Para la ecuación de difusión de masa, la condición inicial se obtiene a partir de la medición del contenido de humedad de la muestra de carne, realizado siguiendo el método AOAC 950.46B, [AOAC \(1991\)](#), de secado en estufa. Se realizaron 14 mediciones y se obtuvo que el contenido de humedad es  $76.43 \pm 0.43\%$  en base húmeda. Este valor concuerda con los valores recopilados en [ASHRAE \(2006\)](#) para carne vacuna magra, que varían entre 75 y 79 % dependiendo del contenido de grasa.

### 2.4. Resolución numérica e independencia de malla

El modelo se implementa en el software COMSOL Multiphysics® que utiliza un método de cálculo implícito de elementos finitos. El paso de tiempo es calculado automáticamente a partir del número de Fourier. Las salidas del modelo, temperatura y contenido de agua de la carne, se registran cada 1 segundo.

Dado que la difusión de agua en la carne es relevante únicamente en una delgada capa superficial ([Trujillo y Pham \(2006\)](#); [Pham et al. \(2009\)](#); [Lovett et al. \(1978\)](#)), en el presente modelo se combinan dos mallas ([Urquiola et al. \(2024\)](#)).

En este trabajo se utiliza una malla tetraédrica automática controlada por la física para todo el dominio, como se muestra en la Fig. 2(a). Para el cilindro interior (carne), se incorpora además una malla de capa límite únicamente para la capa superficial. Esta combinación permite trabajar con un mayor refinamiento cerca de la superficie, manteniendo una malla más gruesa en el resto del dominio, adecuada para modelar la difusión de calor (Fig. 2(b)). La discretización del cilindro exterior (pared lateral del recinto) así como la de las tapas únicamente incide en el cálculo de los factores de vista y de la transferencia de calor por radiación. No se resuelven las temperaturas de dichas superficies sino que son impuestas, al igual que las condiciones del aire.

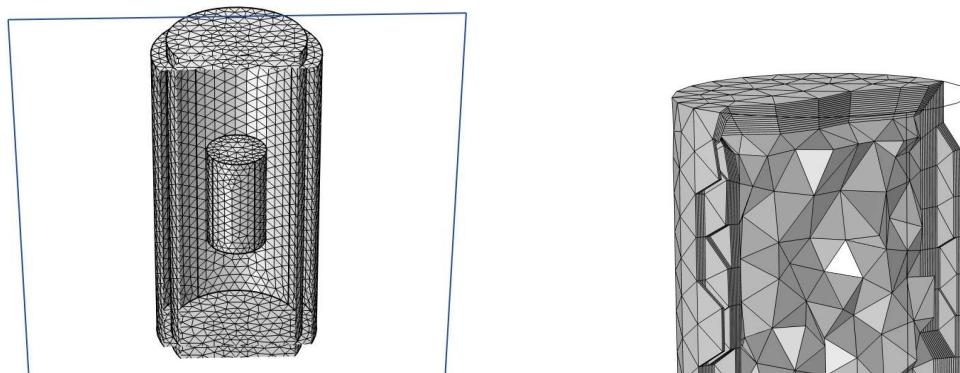


Figura 2: (a) Malla tetraédrica sobre toda la geometría. (b) Malla de capa límite en la superficie de la carne.

Para determinar la malla a utilizar se evaluó la independencia de malla a partir de comparar la pérdida de peso acumulado (masa de agua evaporada) al cabo de una hora. En la Tabla 3 se muestran las cinco mallas testeadas, con los números de elementos, tiempos de cálculo, y el error obtenido en la masa evaporada tomando como referencia la Malla 5, que es la más refinada. En todos los casos el error es pequeño, pero dados los cortos tiempos de cálculo, se opta por trabajar con la Malla 4.

	Malla 1	Malla 2	Malla 3	Malla 4	Malla 5
Nº elementos dominio	6143	7925	13129	36137	171709
Nº elementos borde	1552	2088	3344	7448	21844
Tiempo de cálculo (s)	75	97	139	228	714
$m_{evap}$ (g)	2.430	2.446	2.464	2.476	2.488
Error en $m_{evap}$ (%)	2.31	1.68	0.95	0.46	-

Tabla 3: Independencia de malla.

### 3. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL Y RESULTADOS

#### 3.1. Descripción del montaje experimental

Se implementa un montaje experimental que permite hacer mediciones de corta duración (aprox. 1 hora), en las que las variaciones del peso de la muestra debido a la evaporación sean medibles. Se implementa un dispositivo experimental en el que un trozo de carne de forma cilíndrica se coloca suspendido dentro de un recinto también cilíndrico y entre los cuales se hace circular un flujo de aire de forma descendente, como se esquematiza en la Fig. 3(a). La muestra de carne (de aproximadamente 50 mm de diámetro y 70 mm de altura) se coloca sobre un platillo del mismo diámetro y se sujet a travs de una varilla que lo atraviesa por su eje y que se cuelga desde una balanza de precisión (ver Fig. 3(a) y 3(b)). La muestra de carne se posiciona centrada en el recinto cilíndrico (cilindro exterior). Un pequeño ventilador de 12V se monta en la base del cilindro exterior, el cual se conecta a una fuente. En la entrada del aire, “tapa superior” del cilindro, se coloca un director de flujo de entrada. La pared cilíndrica exterior es de aluminio anodizado, de diámetro 96 mm y altura 225 mm.

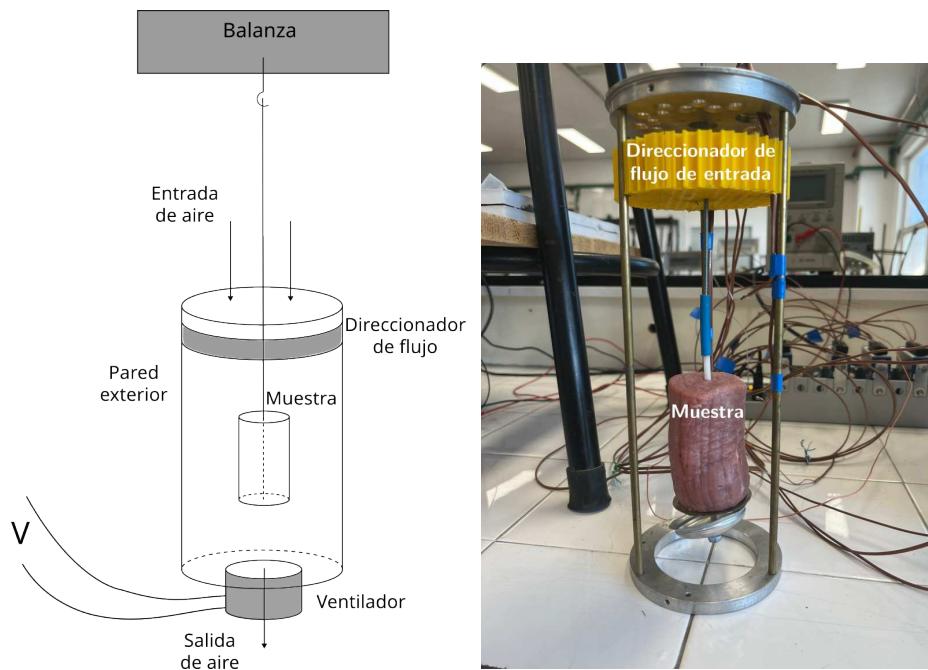


Figura 3: (a) Esquema del montaje experimental. (b) Parte del dispositivo experimental implementado.

La perdida de peso a lo largo del experimento es medida utilizando una balanza marca Radwag, modelo WLC 6/A2/C/2, cuya capacidad máxima es de 6 kg y su resolución es 0.1 g. El registro del peso se realiza utilizando el software RLab, tomando un valor cada 60 segundos.

En el experimento se miden temperaturas que serán introducidas como datos de entrada del modelo, como la temperatura de la pared del recinto y las del aire en distintos puntos. La temperatura del centro de la muestra de carne se mide en algunos experimentos con el fin de validar el modelo. En aquellos experimentos en que se mide la temperatura de la muestra, no se puede llevar a cabo la medición de la pérdida de peso, ya que la termocupla interfiere en la medición de masa. Para esto se montan termocuplas tipo J que se conectan a un adquisidor de datos DAQ de National Instruments, y son registradas mediante un programa implementado en el software LabView, con el que se guarda un valor por segundo.

La condición del aire ambiente se mide utilizando un data logger marca HOBO para interiores, que registra temperatura y humedad relativa. A partir de estos se obtienen la humedad específica que se asume igual a la del aire que se hace circular por el recinto.

### 3.2. Validación del modelo

Se realizaron varios experimentos, por un lado tomando registro de la evolución de la temperatura de la muestra a lo largo del enfriamiento y por otro lado registrando la pérdida de peso al cabo de una hora. Estas mediciones se realizan de forma independiente, ya que (como se

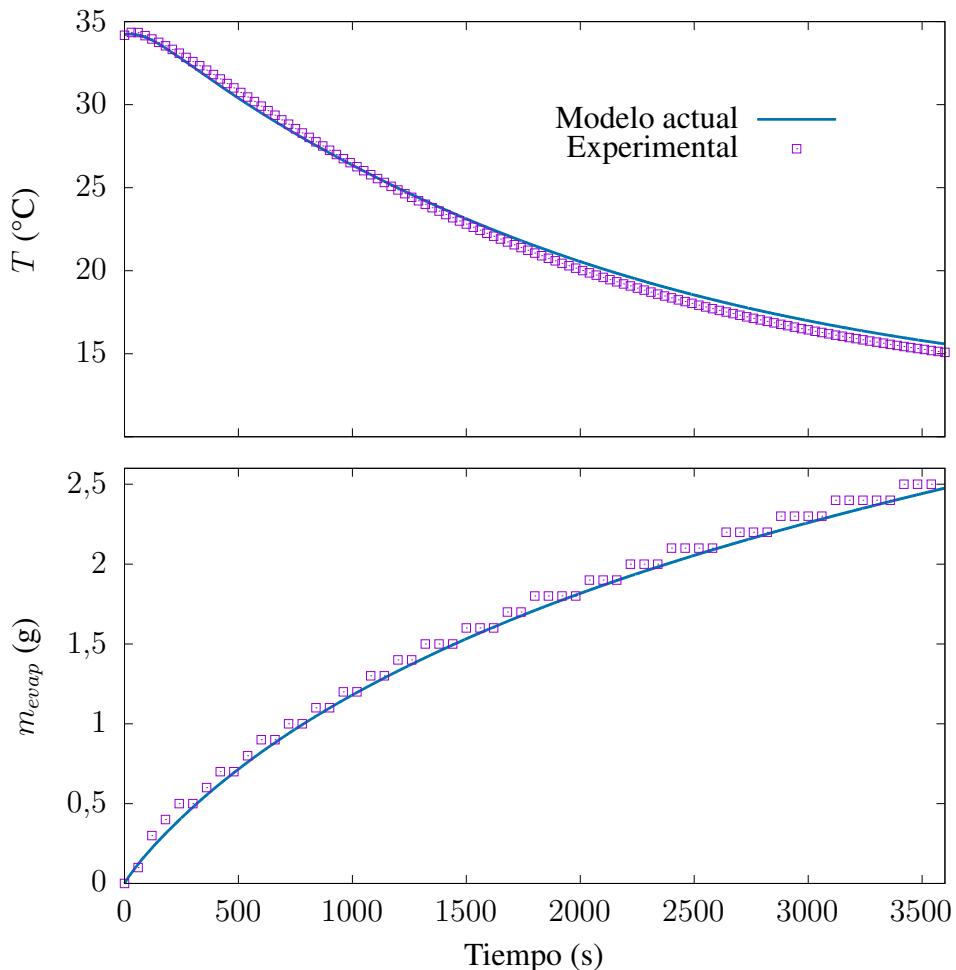


Figura 4: Comparación de los resultados del modelo y las mediciones experimentales, temperatura del centro de la carne y masa de agua evaporada.

mencionó anteriormente) no es posible medir las dos simultáneamente sin que la sujeción de la termocupla interfiera con la medición del peso.

A continuación se presentan dos de los experimentos realizados para la validación del modelo, ya que todos dieron resultados muy similares entre ellos. En la Tabla 4 se listan las condiciones de los experimentos: temperatura inicial de la carne, dimensiones y masa inicial de la muestra, y condiciones del aire ambiente. En el experimento 1 se mide la temperatura de la carne y en el experimento 2 se mide la pérdida de masa por evaporación.

Tabla 4: Condiciones de los experimentos.

Experimento	$T_{inicial}$ (°C)	$\phi$ (mm)	$L$ (mm)	$m_{inicial}$ (g)	$T_{amb}$ (°C)	$HR$ (%)
Exp 1 (con termocupla)	34.25	43.3	75.5	122.3	17.2	51.7
Exp 2 (sin termocupla)	34.73	42.0	72.8	112.4	15.6	57.9

En la Fig. 4 se muestran los resultados del modelo y su comparación con las mediciones experimentales. En la Fig. 4(a) se presenta la evolución de la temperatura del centro de la carne en las condiciones del experimento 1, en la que se ve que el modelo se ajusta de forma adecuada a los valores medidos experimentalmente, con una diferencia máxima de 0.55 °C. En la Fig. 4(b) se muestra la masa de agua evaporada acumulada en las condiciones del experimento 2. Nuevamente el modelo ajusta muy bien los valores medidos, alcanzando un masa total evaporada al cabo de 1 hora de 2.48 g en el modelo, cuando se midió experimentalmente una pérdida de peso de 2.5 g (el error relativo es 0.8 %). En esta curva se observa que los valores experimentales están escalonados, lo cual se debe a la resolución de la balanza, que es 0.1 g.

#### 4. CONCLUSIONES

Se implementó un modelo de transferencia de calor y masa incorporando el intercambio de calor por radiación entre superficies en un recinto para predecir la evolución de la temperatura y contenido de humedad en una muestra de carne, utilizando el software COMSOL Multiphysics. Se diseñó y se construyó un montaje experimental que permite medir la pérdida de peso por evaporación de agua al cabo de una hora. Los resultados obtenidos del modelo y del experimento son muy similares, con un error relativo máximo para la masa evaporada de menos del 1 %, con lo cual se considera validado el modelo. El modelo resulta una herramienta útil para evaluar en un futuro otros escenarios de enfriamiento radiativo, por ejemplo variando la temperatura de la pared del recinto, con el objetivo de evaluar diversas condiciones de enfriamiento, por ejemplo, para minimizar las pérdidas evaporativas en cámaras frigoríficas.

#### REFERENCIAS

- AOAC. Official method 950.46: Moisture in Meat, Association of Official Analytical Chemists. 1991.
- ASHRAE. 2006 ASHRAE Handbook: Refrigeration, capítulo 9, páginas 9.1–9.31. ASHRAE, Atlanta, Georgia (EE.UU.), 2006. ISBN 1-931862-88-5.
- Bergman T. y Lavine A. *Fundamentals of heat and mass transfer*. Wiley, 2017. ISBN 978-1-119-32042-5.
- Daudin J. y Kuitche A. Modelling of temperature and weight loss kinetics during meat chilling for time variable conditions using an analytical based method — iii. calculations versus measurements on pork carcass hindquarters. *Journal of Food Engineering*, 29 (1):39–62, 1996. [http://doi.org/https://doi.org/10.1016/0260-8774\(95\)00063-1](http://doi.org/https://doi.org/10.1016/0260-8774(95)00063-1).

- Davey L. y Pham Q. Predicting the dynamic product heat load and weight loss during beef chilling using a multi-region finite difference approach. *International Journal of Refrigeration*, 20 (7):470–482, 1997. [http://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0140-7007\(97\)00048-0](http://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0140-7007(97)00048-0).
- Davey L. y Pham Q. A multi-layered two-dimensional finite element model to calculate dynamic product heat load and weight loss during beef chilling. *International Journal of Refrigeration*, 23 (6):444–456, 2000. [http://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0140-7007\(99\)00074-2](http://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0140-7007(99)00074-2).
- Kuffi K.D., Defraeye T., Nicolai B.M., De Smet S., Geeraerd A., y Verboven P. Cfd modeling of industrial cooling of large beef carcasses. *International Journal of Refrigeration*, 69:324–339, 2016. <http://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2016.06.013>.
- Kuitche A., Daudin J., y Letang G. Modelling of temperature and weight loss kinetics during meat chilling for time-variable conditions using an analytical-based method — i. the model and its sensitivity to certain parameters. *Journal of Food Engineering*, 28 (1):55–84, 1996. [http://doi.org/https://doi.org/10.1016/0260-8774\(95\)00028-3](http://doi.org/https://doi.org/10.1016/0260-8774(95)00028-3).
- Lovett D., Herbert L., y Radford R. Carcass chilling-experimental investigation of weight loss from lean meat. *International Journal of Refrigeration*, 1 (1):27–32, 1978. [http://doi.org/https://doi.org/10.1016/0140-7007\(78\)90103-2](http://doi.org/https://doi.org/10.1016/0140-7007(78)90103-2).
- Mallikarjunan P. y Mittal G. Heat and mass transfer during beef carcass chilling — modelling and simulation. *Journal of Food Engineering*, 23 (3):277–292, 1994. [http://doi.org/https://doi.org/10.1016/0260-8774\(94\)90054-X](http://doi.org/https://doi.org/10.1016/0260-8774(94)90054-X).
- Mirade P.S., Kondjoyan A., y Daudin J.D. Three-dimensional cfd calculations for designing large food chillers. 34:67–88, 2002.
- Pham Q., Trujillo F., y McPhail N. Finite element model for beef chilling using cfd-generated heat transfer coefficients. *International Journal of Refrigeration*, 32 (1):102–113, 2009. <http://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2008.04.007>.
- Savell J., Mueller S., y Baird B. The chilling of carcasses. *Meat Science*, 70 (3):449–459, 2005. <http://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2004.06.027>.
- Toldra F. *Lawrie's Meat Science*. 2017.
- Trujillo F.J. y Pham Q.T. A computational fluid dynamic model of the heat and moisture transfer during beef chilling. *International Journal of Refrigeration*, 29 (6):998–1009, 2006. <http://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2006.05.001>.
- Trujillo F.J., Wiangkaew C., y Pham Q.T. Drying modeling and water diffusivity in beef meat. *Journal of Food Engineering*, 78 (1):74–85, 2007. <http://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.09.010>.
- Urquiola A., Alvarez G., y Flick D. Frost formation modeling during the storage of frozen vegetables exposed to temperature fluctuations. *Journal of Food Engineering*, 214:16–28, 2017. <http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.06.025>.
- Urquiola A., Galione P., y P.L. C.R. Effect of convective and radiative heat transfer in evaporative losses during beef cooling. *International Journal of Refrigeration*, 161:1–11, 2024. <http://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2024.01.029>.