

PROPIEDADES TERMOFÍSICAS DE LA CARNE REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF MEAT – A REVIEW

OSCAR OCHOA

*Doctorado en Ingeniería – Instituto de Energía Universidad Pontificia Bolivariana,
Industria de Alimentos Zenú S.A., AA 3486 Medellín, Colombia
e-mail oaochoa@noel.com.co*

ALEJANDRO AMÉZQUITA

Department of Biological Systems Engineering, University of Nebraska - Lincoln, Nebraska USA

FARID CHEJNE

*Instituto de Energía-Escuela de Procesos y Energía, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín,
Colombia*

Recibido para revisar 19 de Octubre de 2004, aceptado 29 de Agosto de 2005, versión final 1 de Octubre de 2005

RESUMEN: Una recopilación de las publicaciones sobre los métodos utilizados para medir las propiedades termofísicas de la carne, los modelos matemáticos asociados y los valores publicados se presenta en este trabajo. Se incluyen propiedades como: la conductividad térmica, la difusividad térmica, el calor específico y la temperatura inicial de congelación. Se halló que el estudio de las propiedades termofísicas de la carne carece de modelos confiables que permitan predecir su comportamiento en diferentes condiciones de procesamiento, además los valores publicados presentan una dispersión que afecta su precisión.

PALABRAS CLAVE: Carnes, propiedades termofísicas, rango de congelación, conductividad térmica, difusividad térmica, calor específico.

ABSTRACT: A review of publications on methods used for measuring thermophysical properties of meat, mathematical models associated and published values is presented in this paper. Some of the properties included are: thermal conductivity, thermal diffusivity, heat capacity and freezing point. It was found that the study of the thermophysical properties of meat lacks reliable models that allow to predict their behavior under different processing conditions and that published values present a dispersion that affects their precision.

KEY WORDS: Meats, thermophysical properties, freezing point, thermal conductivity, thermal diffusivity, heat capacity.

1. INTRODUCCIÓN

Diferentes estudios se han realizado con el objeto de conocer las propiedades termofísicas de los alimentos, en estos se han obtenido valores para cada una de las propiedades y se han desarrollado modelos matemáticos para predecir su comportamiento a partir de la relación con la temperatura y características del material como: la composición química, el contenido de humedad, la estructura, entre otras

(Nesvadba, et al., 2004). Entre los estudios realizados en los últimos años sobre el tema se destacan: el estudio de la conductividad térmica y punto de congelación del jugo de naranja (Gabas, et al., 2003), la determinación y modelo de las propiedades térmicas del tofu (Baik y Mittal, 2003), nuevos métodos para congelar y descongelar alimentos (Li y Sun, 2002), la medida de las propiedades termofísicas de pescados como el atún (Zhang, et al., 2001), la congelación de alimentos por medio de líquidos

criogénicos (Agnelli y Mascheroni, 2001), la construcción y validación experimental de un modelo matemático para predecir las propiedades del queso (Marschoun, et al., 2001), entre otros. En el caso específico de la carne, los trabajos se han dedicado a determinar el valor de sus propiedades termofísicas y modelar su comportamiento térmico y mecánico (Choi y Okos, 1986, Lind, 1991, Rahman, 1995), modelos matemáticos basados en métodos numéricos que se aproximan a la representación del fenómeno físico (Franke, 2000, Saad y Scott, 1996, Sanz, et al., 1999, Sun y Zhu, 1999).

Las propiedades termofísicas de la carne han sido estudiadas por diferentes investigadores, sin embargo, la información disponible es dispersa, fraccionada y tiene un alto grado de variación, lo que dificulta el uso de los valores publicados y de los modelos propuestos en aplicaciones industriales. Por esto se hace necesario una revisión del estado del arte sobre este tema que permita determinar las dificultades que se presentan e identificar las oportunidades de hacer nuevos aportes y disponer de modelos y valores experimentales confiables.

El objetivo de este trabajo es presentar el estado en que se encuentra el estudio de las propiedades de la carne, el cual se realizara a partir de la revisión de las publicaciones hechas en los últimos 10 años por las principales revistas especializadas. Las revistas consultadas fueron: Journal of Food Engineering, Meat Sciences, International Journal of Food Sciences, Food Technology, International Journal of Food Sciences and Technology y International Journal of Food Properties. Las propiedades objeto de estudio son: la conductividad térmica, la difusividad térmica, la temperatura inicial de congelación y el calor específico. Para cada una de ellas se presenta una recopilación de los valores obtenidos y los modelos presentados por diferentes investigadores.

2. MÉTODOS USADOS PARA MEDIR LAS PROPIEDADES

TERMOFÍSICAS DE LA CARNE Y LOS MODELOS ASOCIADOS

Las propiedades termofísicas de la carne dependen de diferentes variables propias de su composición y estructura, además, algunas de ellas son altamente dependientes de la temperatura, especialmente en la zona donde se produce el cambio de fase del agua durante la congelación. A medida que la temperatura desciende por debajo del punto inicial de congelación la parte de agua en estado líquido que hace parte del material se reduce, convirtiéndose en cristales de hielo, este cambio hace que se modifiquen las propiedades de los alimentos congelados (Chavalier, et al., 2000a, Chavalier, et al., 2000b, Delgado y Sun, 2001, Karunakar, et al., 1998). Estos cambios se deben a las diferencias en las propiedades termofísicas del agua cuando se encuentra en su fase líquida y en su fase sólida.

2.1 TEMPERATURA INICIAL DE CONGELACIÓN

La temperatura inicial de congelación de la carne es inferior a la del agua pura, debido a que en el agua que hace parte de la carne se encuentran diluidos componentes menores como: carbohidratos, sodio, potasio, fósforo, calcio, magnesio, entre otros, que reducen su punto de congelación (Gabas, et al., 2003, Honikel, 1989, Lawrie, 1998, Mannapperuma y Singh, 1989, Price, 1994, Price y Schwigert, 1971). Se hace referencia a una temperatura inicial de congelación porque el fenómeno de cambio de estado del agua en los alimentos se presenta en un rango de temperaturas, provocado por el aumento en la concentración de los solutos a medida que el agua cambia de la fase líquida a la sólida (Franke, 2000).

Los valores de la temperatura inicial de congelación se han obtenido en forma experimental y utilizando herramientas estadísticas se derivan expresiones empíricas que relacionan su valor con alguno de sus componentes: la cantidad de agua, en la mayoría de los casos (Chang y Tao, 1981,

Chen, 1987, Chen y Nagy, 1987, Levy, 1979, Murakami y Okos, 1989, Rahman y Driscoll, 1994, Sanz, et al., 1989, Schwartzberg, 1976b, Sheard, et al., 1990). Los primeros valores sobre este tema fueron presentados por Dickerson y Read, quienes publicaron valores para diferentes alimentos (*Dickerson y Read, 1968*).

Chang y Tao analizaron los datos publicados por Dickerson y presentaron una expresión empírica que trataba de explicar el comportamiento de la temperatura inicial de congelación en diferentes alimentos a partir de su contenido de humedad (*Chang y Tao, 1981*). La precisión de este modelo fue baja, debido a que se utilizaron en el análisis valores de la temperatura de congelación de los alimentos en forma general, sin tener en cuenta las diferencias en el tipo de material ni en su estructura y composición.

Posteriormente, Sanz realizó pruebas con carnes de diferentes animales y presentó una ecuación empírica para calcular su temperatura inicial de congelación a partir del contenido de humedad de la muestra (*Sanz, et al., 1989*). Este modelo presentó errores cercanos al 46%, debido a que no se consideró que las muestras provenían de diferentes especies de animales. Más tarde la expresión propuesta por Sanz fue revisada utilizando sólo los datos para la carne de bovino y se obtuvo un porcentaje de error del 24% (*Rahman, 1994*).

Rahman and Driscoll utilizaron un método para medir el punto de congelación el cual consistía en ubicar la muestra en un cilindro de acero inoxidable y luego colocar éste en un baño de etilen glicol a una temperatura de -20°C , la temperatura de la muestra era medida en intervalos de 1 minuto utilizando una termocupla. Con este procedimiento se midieron muestras de carnes, pescado y alimentos frescos de origen marino (*Rahman y Driscoll, 1994*).

Las expresiones propuestas hasta el año 1994 utilizaban el contenido de humedad como único parámetro para predecir la temperatura

donde se inicia la congelación, luego Pham incluyó en la expresión otros componentes, como el porcentaje de carbohidratos y de cenizas presentes en la muestra y que se encuentran disueltos en el agua que hace parte de la carne, obteniendo una mejor precisión en la representación de los datos (*Pham, et al., 1994a*).

En la Tabla 1 se presentan las expresiones propuestas para predecir el valor de la temperatura inicial de congelación y en la Tabla 2 los coeficientes utilizados por los diferentes modelos. Es de resaltar la tendencia a utilizar la cantidad de agua como el parámetro para predecir la temperatura inicial de congelación y la escasa información sobre modelos para calcular la temperatura en carne de cerdo.

2.2 CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

La conductividad térmica es otra de las propiedades que determinan el comportamiento termofísico de las carnes, para medir esta propiedad existen métodos en estado transitorio y en estado estable. Los métodos utilizados en estado transitorio son: el pulso de calor, la sonda caliente y la banda caliente.

El método del pulso de calor consiste en someter una de las superficies de la muestra a un flujo de calor conocido y medir la variación de la temperatura en la superficie del lado opuesto. En este método es importante mantener la muestra en condiciones isotérmicas para evitar errores debidos a fugas de calor no controladas (*Lind, 1991*).

El método de la sonda caliente consiste en suministrar un flujo de calor a la muestra mediante una fuente de calor ubicada en su interior y medir la variación de la temperatura a una distancia conocida de esta, el flujo de calor puede ser constante o variar con una rata controlada. La sonda es fabricada en diferentes formas para que su geometría no modifique la estructura del material en forma considerable y evitar que se afecte el

comportamiento térmico de la muestra (*Baghe-Khandan, et al., 1982, Barrera y Zaritzky, 1983, Califano, et al., 1997, Elustondo, et al., 2001, Lind, 1991, Schmalko, et al., 1997, Shariaty-Niassar, et al., 2000, Tavman y Tavman, 1999*). Un caso específico de este método es la fuente lineal de calor, donde la fuente de calor y el

elemento sensor están ubicados en una aguja de un diámetro pequeño en comparación con el diámetro de la muestra (*Baghe-Khandan, et al., 1982, Califano, et al., 1997, Delgado, et al., 1997, Elustondo, et al., 2001, Fontana, et al., 2001a, Karunakar, et al., 1998, Murakami, et al., 1996, Schmalko, et al., 1997*).

Tabla 1. Modelos matemáticos para calcular la Temperatura Inicial de Congelación
Table 1. Mathematical models for calculating Initial Freezing Temperature

| Modelo | Referencia |
|---|---------------------------|
| $(T_a - T_m) = -\frac{\beta}{M_a} \ln \left[\frac{(X_a - BX_s)}{(X_a - BX_s) + EX_s} \right]$ | (Schwarzberg, 1976) |
| $(T_a - T_m) = a_1 + a_2 * X_a$ | (Chang y Tao, 1981) |
| $(T_a - T_m) = A_1 + A_2 X_a + A_3 X_a^2$ | (Chang y Tao, 1981) |
| $(T_a - T_m) = C_1 X_s + C_2 X_s^2 + C_3 X_s^3$ | (Chen y Nagy, 1987) |
| $(T_a - T_m) = -\frac{\beta}{M_a} \ln \left[\frac{(X_a - BX_s)}{(X_a - BX_s) + EX_s (1 + fX_s)} \right]$ | (Chen, 1987) |
| $(T_a - T_m) = \frac{(X_a - 1)}{(d_1 + d_2 X_a)}$ | (Sanz et al., 1989) |
| $(T_a - T_m) = \frac{(X_a - 1)}{(c_1 - c_2 X_a)}$ | (Rahman y Driscoll, 1994) |
| $(T_a - T_m) = b_1 \frac{X_{ca}}{X_a} + b_2 \frac{X_{ce}}{X_a}$ | (Pham et al., 1994) |

Tabla 2. Parámetros utilizados en los modelos presentados en la Tabla 1
Table 2. Parameter Estimate of the Models Presented in Table 1

| Parámetro | Modelo General | Modelo Bovino |
|-----------|----------------|---------------|
| a 1 | 5,76 | 10,67 |
| a 2 | -5,98 | -13,18 |
| b 1 | 4,66 | |
| b 2 | 46,40 | |
| c 1 | 0,078 | |
| c 2 | 0,140 | |
| d 1 | 0,084 | 0,072 |
| d 2 | -0,548 | -0,488 |
| A 1 | 19,29 | 30,97 |
| A 2 | -51,53 | -88,13 |
| A 3 | 36,54 | 64,49 |
| C 1 | 18,94 | 16,94 |
| C 2 | -77,57 | -74,04 |
| C 3 | 97,26 | 101,74 |
| B | 0,192 | 0,185 |
| E | 0,021 | 0,023 |
| f | -0,077 | 0,0023 |

El tercer método, de la banda caliente, consiste en colocar una banda metálica delgada entre dos piezas del material en estudio y por medio de una resistencia eléctrica suministrar un flujo de calor conocido a la vez que se mide la temperatura en el material. Este método requiere que el material en estudio esté en un medio isotérmico para evitar cambios no controlados de la temperatura que modifiquen las medidas (Lind, 1991).

Entre los métodos para medir la conductividad térmica en estado estable se tiene: el método de las placas calientes, los cilindros concéntricos y el pulso de calor. El más usado para realizar las medidas, en el caso de los alimentos, es el de las placas calientes.

El método de las placas calientes consiste en colocar una muestra rectangular entre dos placas paralelas calientes que suministran energía en forma de calor a la muestra y medir la variación de la temperatura en un punto conocido de la muestra. El método parte de resolver la ecuación de calor en estado estable y en una dirección (Pham y Willix, 1989, Rahman, 1995, Sweat, 1975, Tong, et al., 1993, Willix, et al., 1998). Este método tiene una variación usada para la medida en materiales sólidos, en la cual se utiliza un material de referencia, con

conductividad térmica conocida, para determinar el valor para la muestra por medio de la comparación (ASTM, 1999).

El método de los cilindros concéntricos utiliza un principio similar al anterior, el flujo de calor, a través de la muestra, se logra haciendo circular un fluido a baja temperatura a través del cilindro interior y otro fluido a alta temperatura en el cilindro exterior. Igual que en el método anterior se resuelve la ecuación de calor en estado estable, en una dirección y en coordenadas cilíndricas (Gabas, et al., 2003, Rahman, 1995).

El método del flujo de calor consiste en inducir un flujo de calor a través de la muestra, medir este flujo y determinar los gradientes de temperatura que se dan en una distancia conocida. Igual que en los métodos anteriores se resuelve la ecuación de calor en estado estable (Rahman, 1995).

Los modelos matemáticos propuestos para predecir la conductividad térmica de la carne se presentan en la Tabla 3, estos modelos, además de considerar la composición de la carne (Sweat, 1995), tienen en cuenta su variación con la temperatura y la temperatura inicial de congelación. Sin embargo, es necesario incluir la temperatura donde finaliza el cambio de fase de los líquidos que hacen parte del material debido a que en este

rango de temperaturas las propiedades termofísicas son afectadas por el cambio de fase del agua.

2.3 DIFUSIVIDAD TÉRMICA

Para la medición de la difusividad térmica los métodos usados son similares a los utilizados para determinar la conductividad térmica en estado transitorio, los cuales parten de resolver la ecuación de transferencia de calor por conducción (Carciofi, et al., 2002, Fontana, et al., 2001b, Jaramillo-Flores y Hernandez-Sanchez, 2000, Kee, et al., 2002, Magee y Bransburg, 1995, Riedel, 1969, Schwartzberg, 1976a, Singh, 1982). Los modelos disponibles en la literatura para predecir la difusividad térmica se presentan en la Tabla 4, es de anotar que los modelos y a partir de un perfil de temperaturas determinar el valor de la propiedad para la muestra (Mohsenin, 1980)

para el estudio de esta propiedad son escasos, normalmente se estudia la conductividad térmica y luego se obtiene la difusividad a partir ella.

2.4 CALOR ESPECÍFICO

Los métodos utilizados para medir el calor específico en los alimentos son los siguientes: método de la mezcla, método por comparación, método adiabático y el calorímetro de barrido diferencial (DSC, por sus iniciales en ingles) (Rahman, 1995).

El método de la mezcla consiste en sumergir la muestra en un calorímetro de calor específico conocido el cual contiene agua o un líquido con temperatura y masa conocidos

Tabla 3 . Modelos matemáticos para calcular la Conductividad Térmica
Table 3. Mathematical models for calculating Thermal Conductivity

| Modelos | Condiciones | Referencia |
|--|--|--------------------------|
| $k = 2,44 X_a + 0,26(1 - X_a)$ | $T \leq T_{ic}$ | Comini y Bonacina, 1974) |
| $k = 1,745 X_a (1 - T_{ic}/T) + 0,233$ | $T \leq T_{ic}$ | (Finkiin, 1974) |
| $k = 0,08 + 0,52 X_a$ | $0 \leq T \leq 60^\circ C$ $0,6 \leq X_a \leq 0,8$ | (Sweat, 1975) |
| $k = 0,344 X_a - 0,0644 X_p - 0,1334 X_g + 0,0008T$ | $T \geq T_{ic}$ | (Hermans, 1979) |
| $k = k_c + (k_d - k_c)(T_0 - T_{ic})/(T_0 - T)$ $k = k'_c + m(T_{ic} - T) + (k_d - k'_c)(T_0 - T_{ic})/(T_0 - T)$ | $T \leq T_{ic}$ | (Schawartzberg, 1981) |
| $k = -0,28 + 1,8 X_a - 0,0092T$ | $-40 \leq T \leq 5^\circ C$ $0,65 \leq X_a \leq 0,85$ | (Sweat, 1995) |
| $k = k_{ic} + a(T - T_{ic}) + c \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ic}} \right)$ | $T \leq T_{ic}$ | (Willix et al, 1998) |
| $k = k_{ic} + d(T - T_{ic})$ | $T \geq T_{ic}$ | (Willix et al, 1998) |

Tabla 4 . Modelos matemáticos para calcular la Difusividad Térmica
Table 4. Mathematical models for calculating Thermal Diffusivity

| Modelos | Condiciones | Referencia |
|--|-----------------|-----------------|
| $\alpha = 0,088 \times 10^{-6} + (a_w - 0.088 \times 10^{-6}) X_a$ | $T \geq T_{ic}$ | (Riedel, 1969) |
| $\alpha = (0,0572 X_a + 0,0138 X_g + 0,0003T) \times 10^{-6}$ | $T \geq T_{ic}$ | (Hermans, 1979) |

El calorímetro por comparación esta compuesto por dos compartimentos de características similares, uno de ellos es llenado con agua destilada u otro líquido con calor específico conocido, en el otro compartimiento se ubica el líquido que se desea estudiar con una masa similar a la del líquido de referencia. Las dos muestras se calientan a la misma temperatura y luego se ubican en el calorímetro para ser enfriadas en condiciones similares, luego comparando los

perfiles de temperatura se determina el calor específico de la muestra.

El método adiabático puede ser desarrollado de tres formas diferentes, una de ellas, propuesta por Moline, se utiliza para medir el calor específico en alimentos congelados y consiste en llenar un cilindro de aluminio con la muestra, luego enfriarla con nitrógeno líquido y posteriormente introducirla en el calorímetro de Moline para permitir su calentamiento. Durante el proceso se registra la temperatura en el centro de la muestra (Moline, et al., 1961).

La segunda forma del método adiabático es la placa aislada, este método es utilizado para medir el calor específico en alimentos y materiales de origen agrícola, consiste en rodear la muestra con un calentador eléctrico con el propósito de mantener las placas que rodean la muestra a la misma temperatura de ésta, evitando las pérdidas de calor. La temperatura es mantenida constante suministrando calor con el calentador eléctrico, al cual se le mide tanto el voltaje presentan los modelos propuestos para calcular el valor del calor específico y el calor específico aparente

como la corriente que circula a través de él, de esta forma, por medio de un balance de la energía absorbida por la muestra y la suministrada por el calentador, se determina el valor del calor específico (Mohsenin, 1980).

La tercera forma del método adiabático es la cámara adiabática la cual consiste en suministrar un flujo de calor conocido a la cámara y, por un balance de energía, determinar el calor específico de la muestra (Fleming, 1969, Mohsenin, 1980, Pham, et al., 1994b).

El método del calorímetro de barrido diferencial es el más utilizado en los últimos años y consiste en incrementar la temperatura de la muestra a una tasa constante y en un medio isotérmico, mientras esto ocurre se mide el flujo de calor que se requiere para incrementar la temperatura (Karunakar, et al., 1998, Rahman, 1995). El calor específico es medido con el DSC utilizando un material de referencia, este material y la muestra son sometidos a un programa de calentamiento, o enfriamiento, similar y por medio de la comparación de los datos obtenidos se calcula el valor de la propiedad (ASTM, 2002).

El calor específico de la carne, igual que las demás propiedades, debe ser medido tanto a temperaturas inferiores a la temperatura de congelación (Finkiin, 1974, Van Beek, 1983) como a temperaturas superiores a ella (Leninger y Baverloo, 1975, Milles, et al., 1983, Schwartzberg, 1976a), debido a los cambios que provoca el paso del agua de su fase líquida a la fase sólida. En la Tabla 5 se calcula el valor de la propiedad (ASTM, 2002).

para

carnes.

Tabla 5 Modelos matemáticos para calcular el Calor Específico
Table 5 Mathematical models for calculating Specific Heat

| Modelos | Condiciones | Referencia |
|---|--|---|
| $C_p = [2093(T_{ic}/T) + 837]X_a + 1382$ | $T < T_{ic}$ | (Finkiin, 1974) |
| $C_p = 4180(0,5X_g + 0,3X_s + X_a)$ Cp de la grasa es 0,5 el Cp del agua Cp de la parte sólida es 0,3 el Cp del agua | $T > T_{ic}$ | (Leniger y Beverloo, 1975) |
| $C_p = 4187[X_a + (\alpha + 0,001T)(1 - X_a) - \beta \exp(-43X_a^{2/3})]$ | $T > T_{ic}$ $\beta_{bovino} = 0,08$ $\alpha_{bovino} = 0,385$ | (Riedel, 1978) |
| $C_p = \sum C_{p_i} X_i$ | $T > T_{ic}$ | (Miles et al., 1983; Choi y Okos, 1986) |
| $C_p = C_{p_f} + (X_w - bX_s)\Delta H_{f,0}(T_0 - T_{ic})(T_0 - T)^2$ | | (Schwartzberg, 1981) |
| $C_{p_{app}} = C_{p_d} [X_w(1 + X_b/X_s) - X_b/X_s] * [\Delta H_{f,0}(T_0 - T_{ic}) / (T_0 - T)^2 - C_{p_a} + C_{p_{hieto}}]$ | $X_b = 0,5X_p + 0,3X_c$ $X_b = 0,5X_p + 0,3X_c$ | (Schwartzberg, 1976) |
| $C_{p_{app}} = C_{p_m}(1 - X_w) + C_{p_a}W_a(T_{ic}/T) + C_{p_{hieto}}(1 - T_{ic}/T)X_a - \Delta H_c X_a(T_{ic}/T^2)$ | $T < T_{ic}$ | (Van Beek, 1983) |

3. VALORES REPORTADOS

Los valores de las propiedades termofísicas de la carne de bovino y cerdo que han sido publicados hasta la fecha, son parte de trabajos experimentales realizados con el objetivo de determinar los modelos matemáticos que permiten predecir el comportamiento de estas propiedades. En la tabla 6 se presentan los valores de las temperatura inicial de congelación.

Los valores para la conductividad térmica de la carne de bovino como función de la temperatura se presentan la Figura 1 (Baghe-Khandan, et al., 1982, Califano, et al., 1997, Fontana, et al., 2001b, Marinos-Kouris y Maroulis, 1995, Perez y Calvelo, 1984, Rahman, 1991, Sanz, et al., 1987, Willix, et al., 1998). En la Figura 2 se presentan los valores de la conductividad térmica para muestras de cerdo (Sanz, et al., 1987).

Los datos sobre la conductividad térmica para muestras de res y cerdo muestran una variación alta debido a factores como: diversidad en los métodos experimentales usados, variación en la composición de las muestras y las diferencias en la estructura del material (Krokida, et al., 2001).

Los datos reportados para la difusividad térmica de carnes de bovino y su relación con la temperatura se presentan en la Figura 3 (Dickerson y Read, 1975, Dickerson y Read, 1968, Fontana, et al., 2001b, Hayakawa, 1973, Honikel, 1989, Morley, 1972). En la Figura 4 se presentan los valores para carnes de cerdo (Morley, 1972).

Los valores reportados sobre el calor específico para carnes de bovino y su relación con la temperatura se presentan en la Figura 5 (Morley, 1972). Los valores para la carne de cerdo se presentan en la Figura 6 (Mellor, 1983, Morley, 1972, Rahman, 1995).

Tabla 6. Valores temperatura inicial de congelación
Table 6. Initial Freezing Temperatura Data

| Material | % Humedad | % Grasa | % Proteina | % Cenizas | Temperatura Inicial Congelación (°C) | Referencia |
|--------------|-----------|---------|------------|-----------|--------------------------------------|--------------------------------|
| Bovino | 80,00 | nd | nd | nd | -0,80 | (Rahman y Driscoll, 1994) |
| | 75,90 | 3,20 | 19,80 | 1,00 | -0,70 | (Pham et al., 1994) |
| | 75,00 | nd | nd | nd | -0,82 | (Sheard et al.,1990) |
| | 74,50 | nd | nd | nd | -0,63 | (Dickerson,1968) |
| | 74,50 | nd | nd | nd | -1,75 | (Murakami y Okos,1989) |
| | 74,00 | nd | nd | nd | -1,00 | (Murakami y Okos,1989) |
| | 70,00 | n/d | n/d | n/d | -1,01 | (Rahman y Driscoll, 1994) |
| | 68,30 | 10,00 | 20,70 | 1,00 | -1,00 | (Mannapperuma and Singh, 1989) |
| | 60,00 | nd | nd | nd | -2,00 | (Rahman y Driscoll, 1994) |
| 50,00 | nd | nd | nd | -2,80 | (Rahman y Driscoll, 1994) | |
| Grasa Bovino | 17,60 | 79,50 | 1,80 | 0,30 | -2,69 | (Pham et al., 1994) |
| Cerdo | 72,50 | nd | nd | nd | -0,90 | (Levy,1979) |
| | 74,00 | nd | nd | nd | -1,00 | (Murakami y Okos,1989) |
| | 74,50 | nd | nd | nd | -1,75 | (Rahman y Driscoll, 1994) |
| | 76,40 | 0,40 | 21,80 | 1,20 | -0,79 | (Pham et al., 1994) |
| Grasa Cerdo | 11,80 | 84,30 | 0,80 | 0,20 | -1,87 | (Pham et al., 1994) |

nd Información no disponible

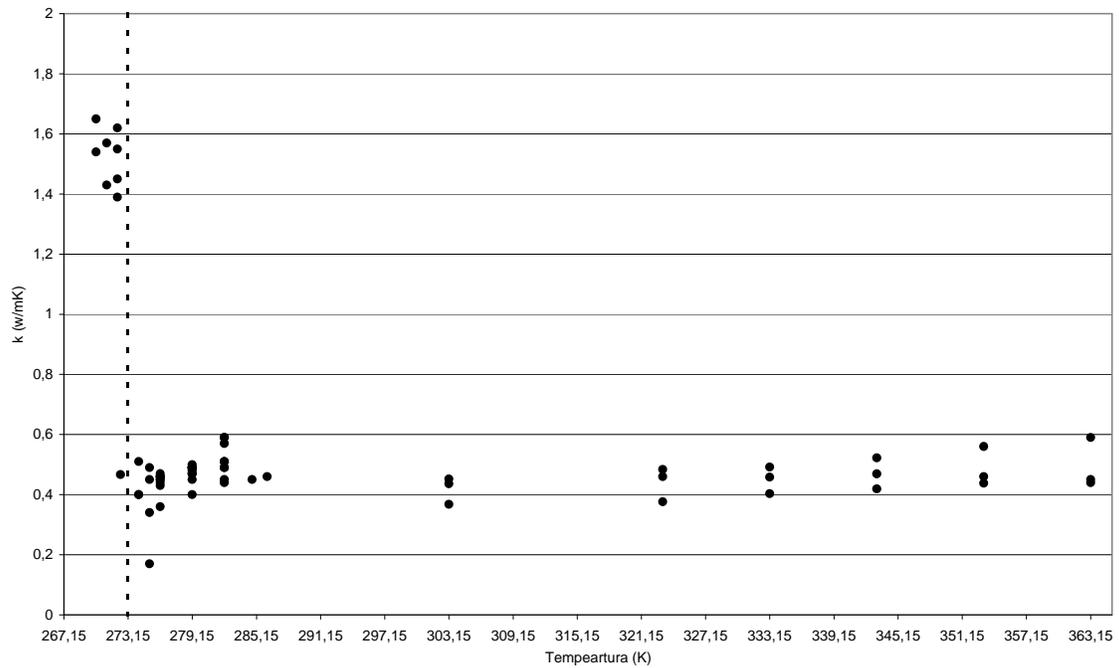


Figura 1. Valores Conductividad Térmica para muestras de res
Figure 1. Thermal Conductivity data for beef meat

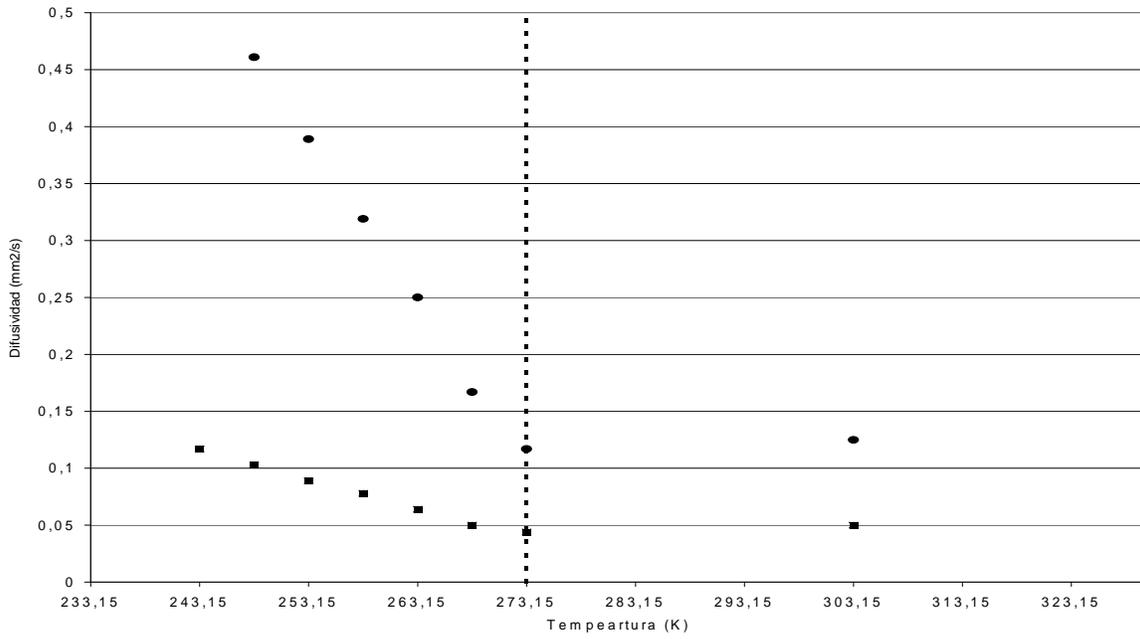


Figura 4. Valores Difusividad Térmica para carne de cerdo
Figure 4. Thermal Diffusivity data for pork meat

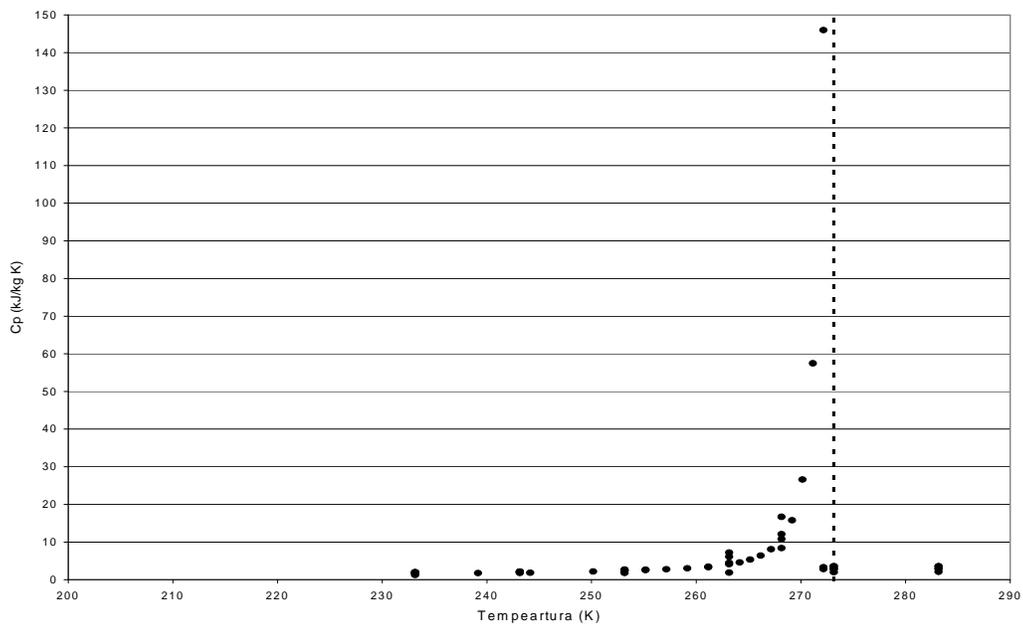


Figura 5 Valores calor específico para carne de res
Figure 5. Specific Heat data for beef meat

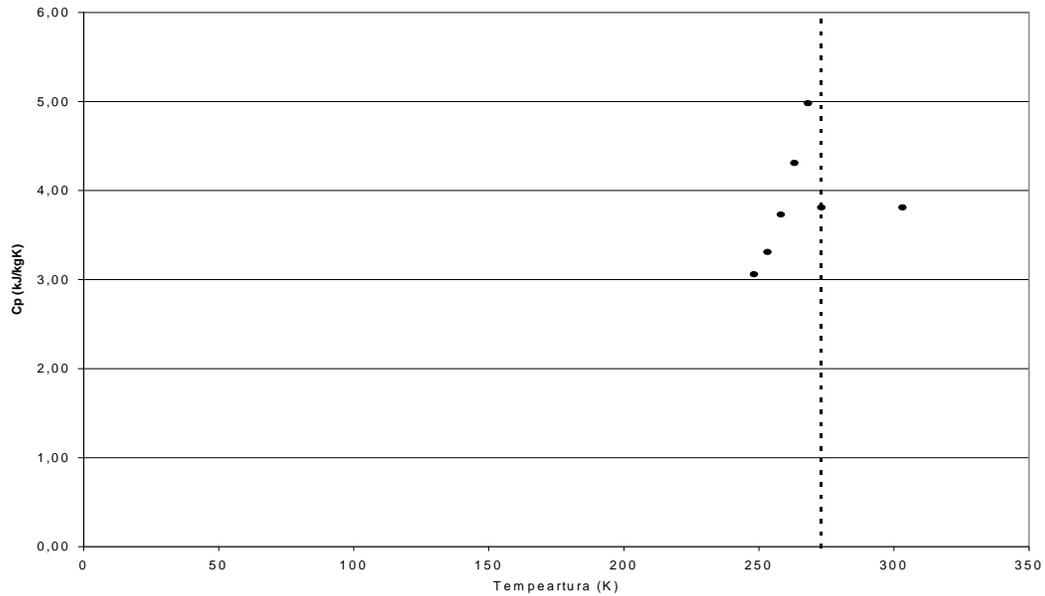


Figura 6 Valores calor específico para carne de cerdo
Figure 6. Specific Heat data for pork meat

4. CONCLUSIONES

Los modelos para predecir el comportamiento de las propiedades termofísicas de la carne han sido relacionados, en un alto porcentaje, con su contenido de humedad, sin embargo, es necesario explorar relaciones que incluyan otros elementos que hacen parte de la composición de la muestra como son: la grasa, la proteína y las cenizas. Adicionalmente es necesario profundizar en el estudio de estas propiedades en temperaturas por debajo de la congelación, ya que en el momento no se dispone de información suficiente y confiable.

Se encuentra una alta tendencia a estudiar la carne de bovino y en pocos casos estudiar la carne de cerdo, este material debe ser estudiado con más detalle debido a que en la actualidad es una materia prima importante para las industrias procesadoras de carnes. Es necesario desarrollar modelos particulares para predecir su comportamiento, así como medir los valores en los diferentes intervalos de temperatura.

Una oportunidad adicional relacionada con el tema de la congelación de la carne, y de los

alimentos en general, es el estudio del rango de temperaturas donde se presenta el cambio de fase de los líquidos que la componen. Esta información tiene un campo de aplicación importante por el cambio en el comportamiento de las propiedades térmicas que se presenta antes y después de este rango.

Nomenclatura

Letras Principales

| | |
|------------|--|
| a_w | Actividad del agua |
| a, c, d | Parámetros correlación |
| b | Masa de agua (kg) |
| C_p | Calor Específico (J / kg K) |
| ΔH | Calor latente (J / kg) |
| k | Conductividad Térmica (W / m K) |
| T | Temperatura (°C) |
| t | Tiempo (s) |
| X | Contenido de humedad - Base Seca (kg / kg) |
| W | Masa (kg) |
| ∞ | Difusividad Térmica (m ² / s) |
| ρ | Densidad (kg / m ³) |

Subíndices

| | |
|-----|---------------|
| a | Agua |
| app | Aparente |
| c | Congelado |
| ca | Carbohidratos |
| ce | Cenizas |
| d | Descongelado |

| | |
|----|------------------------|
| f | Congelado |
| g | Grasa |
| i | Término i-ésimo |
| ic | Inicial de congelación |
| m | Muestra |
| p | Proteína |
| s | Parte sólida |

REFERENCIAS

- [1] Agnelli, M. E. y R. H. Mascheroni, Cryomechanical freezing. A model for the heat transfer process. *J. of Food Engineering*, 47, 263-270, 2001.
- [2] ASTM, Standard Test Method for Determining Specific Heat Capacity by Differential Scanning Calorimetry. *ASTM International*, 14, (02), 380-385, 2002.
- [3] ASTM, Standard test method for thermal conductivity of solids by means of the guarded-comparative-longitudinal heat flow technique. *ASTM International*, E-1212-99, 339-346, 1999.
- [4] Baghe-Khandan, M. S., M. R. Okos y V. E. Sweat, The thermal conductivity of beef as affected by temperature and composition. *Transactions of the ASAE*, 25, 1118-1122, 1982.
- [5] Baik, O.-D. y G. S. Mittal, Determination and modeling of thermal properties of tofu. *International J. of Food Properties*, 6, (1), 9-24, 2003.
- [6] Barrera, M. y N. E. Zaritzky, Thermal conductivity of frozen beef liver. *J. Food Sciences*, 48, 1179-1184, 1983.
- [7] Califano, A. N., et al., Effect of processing conditions on the hardness of cooked beef. *J. of Food Engineering*, 34, 41-54, 1997.
- [8] Carciofi, B. A. M., et al., Determination of thermal diffusivity of mortadella using actual cooking process data. *J. of Food Engineering*, 55, 89-94, 2002.
- [9] Chang, H. D. y L. C. Tao, Correlations of enthalpies of food systems. *J. of Food Science*, 46, 1493-1497, 1981.
- [10] Chavalier, D., A. L. Bail y M. Ghoul, Freezing and ice crystal formed in a cylindrical food model: Part II. Comparison between freezing at atmospheric pressure and pressure-shift freezing. *J. of Food Engineering*, 46, 287-293, 2000a.
- [11] Chavalier, D., A. L. Bail y M. Ghoul, Freezing and ice crystals formed in a cylindrical food model: part I Freezing at atmospheric pressure. *J. of Food Engineering*, 46, 277-285, 2000b.
- [12] Chen, C. S., Relationship between water activity and freezing point depression of food systems. *J. Food Sciences*, 55, (2), 494, 1987.
- [13] Chen, C. S. y S. Nagy, Prediction and correlation of freezing point depression of aqueous solutions. *Transactions of the ASAE*, 30, (4), 1176, 1987.
- [14] Choi, Y. y M. R. Okos, Effects of temperature and composition on the thermal properties of foods, ed. M. L. Maguer, and P. Jelen. *Mew York, NY, Elsevier Science Publishing Co*, pp. 93-101, 1986.
- [15] Delgado, A. E., et al., Thermal conductivity of unfrozen and frozen strawberry and spinach. *J. of Food Engineering*, 31, 137-146, 1997.
- [16] Delgado, A. E. y D.-W. Sun, Heat and mass transfer for predicting freezing processes -a review. *J. of Food Engineering*, 47, 157-174, 2001.
- [17] Dickerson, R. W. y R. B. Read, Thermal diffusivity of meat. *ASHRAE Trans*, 81, (1), 356, 1975.
- [18] Dickerson, R. W. y R. B. Read, Thermal properties of foods. *The Freezing Preservation of Food*. Edited by D. K. Tressler, W. B. V. Arsdell, and M. R. Copley. Westport CT: AVI Publishing Co, 1968.
- [19] Elustondo, D., M. P. Elustondo y M. J. Urbicain, New thermal conductivity probe desing based on the analysis of error sources. *J. of Food Engineering*, 48, 325-333, 2001.

- [20] Fleming, A. K., Calorimetric properties of lamb and other meats. *J. of Food Technology*, 4, 199-215, 1969.
- [21] Fontana, A. J., et al., Simultaneous thermal conductivity, thermal resistivity, and thermal diffusivity measurement of selected foods and solids, ed. ASAE. Sacramento, California, ASAE, pp. 1-7, 2001a.
- [22] Fontana, A. J., et al., Simultaneous thermal conductivity, thermal resistivity and thermal diffusivity measurement of selected foods and solids. Sacramento, California, The Society for engineering in agricultural, food and biological systems, pp. 1-7, 2001b.
- [23] Franke, K., A new approach for the numerical calculation of freezing and thawing processes of foods using a modified fictitious heat flow method. *J. of Food Engineering*, 44, 23-29, 2000.
- [24] Gabas, A. L., J. Telis-Romero y V. R. N. Telis, Influence of fluid concentration on freezing point depression and thermal conductivity of frozen orange juice. *International J. of Food Properties*, 6, (3), 543-556, 2003.
- [25] Hayakawa, K., New computational procedure for determining the apparent thermal diffusivity of a solid body approximated with an infinite slab. *J. Food Sciences*, 38, 623-626, 1973.
- [26] Honikel, K. O., *The Meat Aspects of Water and Food Quality*, ed. T. M. Hardman. New York, Elsevier Applied Science, pp. 277-304, 1989.
- [27] Jaramillo-Flores, M. E. y H. Hernandez-Sanchez, Thermal diffusivity of soursop (*annona muricata* L.) pulp. *J. of Food Engineering*, 46, 139-143, 2000.
- [28] Karunakar, B., S. K. Mishra y S. Bandyopadhyay, Specific heat and thermal conductivity of shrimp meat. *J. of Food Engineering*, 37, 345 - 351, 1998.
- [29] Kee, W. L., S. Ma y D. I. Wilson, Thermal diffusivity measurements of petfood. *International J. of Food Properties*, 5, (1), 145-151, 2002.
- [30] Krokida, M. K., et al., Thermal conductivity: Literature data compilation for foodstuffs. *International J. of Food Properties*, 4, (1), 111-137, 2001.
- [31] Lawrie, R. A. *Lawrie's meat sciences*. 6th ed: Cambridge Woodhead, 1998.
- [32] Leninger, J. M. y W. A. Baverloo. *Food Process Engineering*. Edited by D. Riedel: Dordrecht, 1975.
- [33] Levy, F. L., Enthalpy and specific heat of meat and fish in the freezing range. *J. of Food Technology*, 14, 549, 1979.
- [34] Li, B. y D.-W. Sun, Novel methods for rapid freezing and thawing of foods - a review. *J. of Food Engineering*, 54, 175-182, 2002.
- [35] Lind, I., The measurement and prediction of thermal properties of foods during freezing and thawing - A review with particular reference to meat and dough. *J. of Food Engineering*, 13, 285-319, 1991.
- [36] Magee, R. R. A. y T. Bransburg, Measurement of thermal diffusivity of potato, malt bread and wheat flour. *J. of Food Engineering*, 25, 223-232, 1995.
- [37] Mannapperuma, J. D. y R. P. Singh, A computer-aided method for the prediction of properties and freezing/thawing times of foods. *J. of Food Engineering*, 9, 275-304, 1989.
- [38] Marinos-Kouris, D. y Z. B. Maroulis, *Thermophysical properties for the drying of solid*, ed. A. S. Mujumdar. New York, Marcel Dekker, 1995.
- [39] Marschoun, L. T., K. Muthukumarappan y S. Gunasekaran, Thermal properties of cheddar cheese: Experimental and modeling. *International J. of Food Properties*, 4, (3), 383-403, 2001.
- [40] Mellor, J. D., *Critical evaluation of thermophysical properties of foodstuffs and outline of future development*, ed. R. Jowitt, et al. New York, Applied Sciences Publishers, 1983.
- [41] Milles, C. A., G. V. Beek y C. H. Veerkamp, *Calculation of thermophysical properties of foods*, ed. R. Jowitt. London, 1983.
- [42] Mohsenin, N. N. *Thermal properties of foods and agricultural materials*. Edited by G. a. B. S. Publisher, 1980.
- [43] Moline, S. W., et al., *Thermal properties of foods at low temperatures*. *Food Technology*, 15, (5), 228-231, 1961.

- [44] Morley, M. J. Thermal Properties of Meat - Tabulated Data. Langford: Meat Research Institute, 1972.
- [45] Murakami, E. G. y M. R. Okos, Measurement and prediction of thermal properties of foods, ed. R. P. Singh, and A. G. Medina. New York, Kluwer Academic Publishers, 1989.
- [46] Murakami, E. G., et al., Recommended desing parameters for thermal conductivity probes for nonfrozen food materials. *J. of Food Engineering*, 27, 109-123, 1996.
- [47] Nesvadba, P., et al., Data base of physical properties of agro-food materials. *J. of Food Engineering*, 61, 497-503, 2004.
- [48] Perez, M. G. R. y A. Calvelo, Modeling the thermal conductivity of cooked meat. *J. Food Sciences*, 49, 152-156, 1984.
- [49] Pham, Q. T., et al., Determination of the enthalpy of foods by adiabatic calorimeter. *J. of Food Engineering*, 21, 137-156, 1994a.
- [50] Pham, Q. T., et al., Determination of the enthalpy of foods by an adiabatic calorimeter. *Journal of Food Engineering*, 21, 137-156, 1994b.
- [51] Pham, Q. T. y J. Willix, Thermal conductivity of fresh lamb meat, offals and fat in the range -40 to 30°C: Measurements and correlations. *J. Food Sciences*, 54, (3), 508-517, 1989.
- [52] Price, Meat Sciences. 1994.
- [53] Price, J. F. y B. S. Schwigert, The basic science of meat, ed. J. F. Price, and B. S. Schwigert, 2 Edition. San Francisco, W. H. Freeman and company, pp. 1 - 363, 1971.
- [54] Rahman, M. S., Thermal conductivity of four food materials as a single funtion of porosity and water content. *J. of Food Engineering*, 15, 261-268, 1991.
- [55] Rahman, M. S. y R. H. Driscoll, Freezing points of selected seafoods. *International J. of Food Sciences and Technology*, 29, 51-61, 1994.
- [56] Rahman, S., The accuracy of prediction of freezing point of meat from general models. *J. of Food Engineering*, 21, 127-136, 1994.
- [57] Rahman, S. Food properties handbook. Edited by C. R. C. S. i. C. F. Sciences. Amherst: Fergus M. Clydesdale, University of Massachusetts, 1995.
- [58] Riedel, L., Measurements of thermal diffusivity on foodstuffs rich in water. *Kaltetechnik*, 21, 315, 1969.
- [59] Saad, Z. y E. P. Scott, Analysis of accuracy in the numerical simulation of the freezing process in food materials. *J. of Food Engineering*, 31, 95-111, 1996.
- [60] Sanz, P. D., M. D. Alonso y R. H. Mascheroni, Thermophysical properties of meat products: General bibliography and experimental values. *Transactions of the ASAE*, 30, (1), 283-286, 1987.
- [61] Sanz, P. D., M. Dominguez y R. H. Mascheroni, Equation for the prediction of thermophysical properties of meat products. *Latin American Applied Research*, 19, 155-160, 1989.
- [62] Sanz, P. D., M. Ramos y J. Aguirre-Puente, One-stage model of foods freezing. *J. of Food Engineering*, 40, 233-239, 1999.
- [63] Schmalko, M. E., R. O. Morawicki y L. A. Ramallo, Simultaneous determination of specific heat capacity and thermal conductivity using the finite-difference method. *J. of Food Engineering*, 31, 531-540, 1997.
- [64] Schwartzberg, H., Effective heat capacities for the freezing and thawing of food. *J. Food Sciences*, 41, (1), 152, 1976a.
- [65] Schwartzberg, H. G., Effective heat capacities for the freezing and thawing of food. *J. Food Sciences*, 41, (1), 152, 1976b.
- [66] Shariaty-Niassar, M., M. Hozawa y T. Tsukada, Development of probe for thermal conductivity measurement of food materials under heated and pressurized conditions. *J. of Food Engineering*, 43, 133-139, 2000.
- [67] Sheard, P. R., et al., Influence of sodium chloride and sodium tripolyphosphate on the quality of UK-style grillsteaks: relation-ship to freezing point depression. *International J. of Food Science Technology*, 25, (6), 643, 1990.
- [68] Singh, R. P., Thermal diffusivity in food. *Food Technology*, February, 87-96, 1982.
- [69] Sun, D.-W. y X. Zhu, Effect of heat transfer direction on the numerical prediction

of beef freezing processes. *J. of Food Engineering*, 42, 45-50, 1999.

[70] Sweat, V. E., Modeling the thermal conductivity of meats. *Trans. ASAE*, 18, (3), 564, 1975.

[71] Sweat, V. E., *Thermal Properties of Foods*, ed. M. A. Rao, and S. S. H. Rizvi, Second Edition. New York, Marcel Dekker, Inc, pp. 99-138, 1995.

[72] Tavman, I. H. y S. Tavman, Measurement of thermal conductivity of dairy products. *J. of Food Engineering*, 41, 109-114, 1999.

[73] Tong, C. H., et al., Reference materials for calibrating probes used for measuring thermal conductivity of frozen foods. *J. Food Sciences*, 58, (1), 186-190, 1993.

[74] Willix, J., S. J. Lovatt y N. D. Amos, Additional thermal conductivity values of foods measured by a guarded hot plate. *J. of Food Engineering*, 37, 159-174, 1998.

[75] Zhang, J., B. E. Farkas y S. A. Hale, Thermal Properties of Skipjack Tuna. *International J. of Food Properties*, 4, (1), 81-90, 2001.

