

**TRANSFERENCIA DE CALOR Y MATERIA EN CONGELACIÓN Y
ALMACENAMIENTO DE ALIMENTOS, SUBLIMACIÓN DE HIELO,
CALIDAD, OPTIMIZACIÓN DE CONDICIONES DE PROCESO.**

LAURA ANALÍA CAMPAÑONE

**Tesis presentada para el grado de
DOCTOR EN INGENIERÍA**

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA

Facultad de Ingeniería, U.N.L.P.

Marzo , 2001

DPTO. DE INGENIERÍA QUÍMICA

FACULTAD DE INGENIERÍA

- UNLP -

Inventario Biblioteca: 1688

Signatura Topográfica: 532:536

C1

El presente trabajo de Tesis para optar al título de Doctor en Ingeniería, fue realizado en el Centro de Investigación y Desarrollo en Criotecología de Alimentos, Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de La Plata, bajo la dirección del Dr. Rodolfo H. Mascheroni y la co-dirección de la Dra. Viviana O. Salvadori.

A mis hijos.

AGRADECIMIENTOS

A la Dra. María Cristina Añón por haberme permitido la realización de este trabajo de Tesis en las instalaciones del CIDCA.

Al Dr. Rodolfo Mascheroni, por haber realizado la dirección de este trabajo, por haber sido la primera persona en brindarme la oportunidad de trabajar en Investigación, por su calidad humana y su apoyo permanente hacia mi trabajo.

A la Dra. Viviana Salvadori, por haber aceptado y realizado la co-dirección de este trabajo, por su ayuda para la realización de esta Tesis doctoral y porque desde hace cinco años me brinda su amistad y compañerismo.

Al Ing. Luis Roche, por su colaboración en la realización del trabajo experimental y por la amistad que me brinda desde hace muchos años.

A Pablo Mulán, Vicente Valenti y Eduardo Denisienia por la colaboración en la realización del trabajo experimental.

A todos mis compañeros del CIDCA.

Parte de los resultados presentados en este trabajo de Tesis, se han publicado en los siguientes trabajos:

“Finite Differences Method to solve the coupled heat and mass transfer balances during freezing with simultaneous surface dehydration”, L.A.Campañone, V.O.Salvadori y R.H Mascheroni. Fourth World Congress on Computational Mechanics, (Compact Disc) 14 (1998).

“A Finite-Differences method to solve coupled heat and mass balances with simultaneous surface dehydration during freezing” , L.A.Campañone, V.O.Salvadori y R.H Mascheroni, Latin American Applied Research, 28, 83-88 (1998).

“Modelling and simulation of heat and mass transfer during freezing and storage of unpackaged foods”, L.A.Campañone, V.O.Salvadori y R.H Mascheroni. Permafrost and actions of natural or artificial cooling, IIR, 180-187 (1998).

“Determinación de coeficientes de transferencia de materia en congelación y almacenamiento de alimentos”, L.A.Campañone, V.O.Salvadori y R.H Mascheroni. VIII Congreso Argentino de Ciencia y Tecnología de Alimentos (Compact Disc). (1999).

“Análisis comparativo de congeladores de cinta convencionales y tipo impingement”, L.A.Campañone, V.O.Salvadori y R.H Mascheroni. VIII Congreso Argentino de Ciencia y Tecnología de Alimentos (Compact Disc). (1999).

“Determination of mass transfer coefficients in refrigerated storage” ,L.A.Campañone, L.A. Roche, V.O.Salvadori y R.H Mascheroni. VIII International Congress on Engineering and Food (2000).

“Weight loss during freezing and storage of unpackaged foods”, L.A.Campañone, V.O.Salvadori y R.H Mascheroni, Journal of Food Engineering, 47, 69-79 (2001).

INDICE

Capítulo 1: Introducción	
1.1 Presentación del tema	1
1.2 Antecedentes	2
1.3 El mercado de los productos congelados	10
1.4 Descripción de contenidos y objetivos	14
Capítulo 2: Modelo Matemático	
2.1 Teoría	16
2.2 Método Numérico	22
2.2.1 Etapa 1	24
2.2.2 Etapa 2	29
2.3 Análisis de estabilidad	40
2.3.1 Método matricial	41
Capítulo 3: Descripción de las medidas experimentales	
3.1 Equipo experimental	46
3.2 Variables operativas	48
Capítulo 4: Coeficientes de transferencia de calor y materia	
4.1 Antecedentes	52
4.2 Teoría	53
4.3 Materiales y métodos	54
4.4 Resultados	57
Capítulo 5: Determinación experimental de pérdida de peso	
5.1 Técnica experimental	63
5.2 Resultados	64
5.2.1 Condiciones operativas constantes	65

5.2.2 Condiciones operativas variables	90
Capítulo 6: Verificación del modelo matemático	
6.1 Validación del modelo matemático	93
6.1.1 Propiedades generales	94
6.1.2. Propiedades particulares	97
6.1.2.1 Carne vacuna	97
6.1.2.2 Tilosa	101
6.1.2.3 Papa	103
6.2 Validación contra datos de literatura	105
6.2.1 Tiempos de congelación	105
6.2.2 Pérdida de peso durante el almacenamiento congelado	106
6.3 Validación contra datos experimentales propios	112
6.3.1 Perfil de temperaturas	112
6.3.2 Pérdida de peso	115
6.3.2.1 Condiciones operativas constantes	115
6.3.2.2 Condiciones operativas variables	134
6.3.3 Capa deshidratada superficial	136
Capítulo 7: Predicciones teóricas	
7.1 Predicciones teóricas del modelo matemático	140
7.1.1 Perfiles de temperatura	140
7.1.2 Pérdida de peso	141
7.1.3 Espesor de la capa deshidratada superficial	142
7.2 Análisis paramétrico	144
7.2.1 Temperatura del aire	145
7.2.2 Velocidad del aire	148
7.2.3 Humedad relativa ambiente	151
7.2.4 Temperatura inicial del producto	154
7.2.5 Efecto de las condiciones de congelación en el almacenamiento congelado	156
7.3 Conclusiones	158

Capítulo 8: Conclusiones	159
Apéndice I	161
Nomenclatura	186
Referencias Bibliográficas	190

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 PRESENTACIÓN DEL TEMA

Uno de los principales propósitos de la industria alimentaria es la conservación de los alimentos. Con este fin, históricamente se han desarrollado diferentes procesos que intentan prolongar el período en que los mismos permanecen aptos para su consumo, permitiendo la disponibilidad de una gran variedad de productos en cualquier época del año.

La selección de los métodos de conservación se realiza en función del tipo de producto y de la calidad final que se pretende obtener. Entre los procedimientos más empleados desempeñan un papel importante los métodos basados en la acción de las bajas temperaturas, entendiendo como tales la refrigeración y la congelación.

En el proceso de congelación se asocian fundamentalmente los efectos favorables de las bajas temperaturas a los de la transformación del agua en hielo. En efecto, ningún microorganismo puede desarrollarse a temperaturas menores que -10°C , por lo tanto, el almacenamiento usual de los productos congelados a -18°C impide toda actividad microbiana (Brown, 1991). Otro efecto positivo del empleo de bajas temperaturas es el descenso de las velocidades de las reacciones químicas de deterioro. En este sentido, las leyes de la cinética química indican en términos generales que un descenso de 10°C de la temperatura, disminuye en un factor de dos o tres la velocidad de las alteraciones que acontecen en el seno del producto.

Además, la transición agua-hielo tiene la ventaja de fijar la estructura del tejido y aislar el agua bajo la forma de cristales de hielo, agua que no está disponible como solvente ni como reactivo. Por ello, la difusión de otras especies químicas en el seno de tejido es muy lenta lo que contribuye, al mismo tiempo que el descenso de la temperatura, a disminuir la velocidad de la mayoría de las reacciones químicas. Un efecto desfavorable es la formación de los cristales de hielo. Tamaños importantes de los mismos pueden originar un deterioro mecánico de la textura del tejido. La selección óptima de las condiciones de operación permiten minimizar dicho tamaño y evitar el efecto negativo en la estructura del alimento.

Como se puede advertir, al implementar un proceso tecnológico como es la congelación, se debe operar adecuadamente con el fin de obtener un producto de calidad que posteriormente se ofrecerá al consumidor. Un parámetro de calidad substancial que se debe cuantificar es el grado de deshidratación de los productos. Los alimentos al ser congelados sin

envoltorio, práctica que se lleva a cabo independientemente del método de congelación seleccionado, pierden humedad al poseer la superficie expuesta al intercambio de energía y de materia con el medio ambiente, con una actividad acuosa mayor que el mismo.

En efecto, la diferencia de temperaturas entre el producto y el medio y la diferencia entre la presión de vapor en la superficie del alimento y la humedad relativa en el seno del aire, originan fuerzas impulsoras para la deshidratación.

En el caso particular de almacenamiento congelado, las fluctuaciones de temperatura en el medio ambiente se transfieren a los productos. Entonces se alternan períodos donde la temperatura superficial es mayor que la temperatura ambiente con lapsos donde ocurre la situación inversa, constituyendo este un efecto positivo para la pérdida de peso.

En ambos casos, cuando el hielo de la superficie sublima, se forma una capa seca porosa que cambia las características organolépticas de los productos, provocando principalmente una pérdida de calidad debida al desmerecimiento de la apariencia y a cambios en el sabor y consistencia.

La pérdida de peso que se origina por sublimación varía en un rango muy amplio teniendo en cuenta el tiempo de congelación, pero hemos encontrado en bibliografía que su valor mínimo es de aproximadamente del 1% (Aström, 1972), pudiendo ser mucho mayor, transformándose en una pérdida económica importante.

El grado de desecación de los productos depende del proceso seleccionado y para cada proceso, de las condiciones operativas aplicadas.

En el presente trabajo de Tesis se analiza y cuantifica la deshidratación de los alimentos que se congelan o almacenan congelados. También se estudia el efecto de las condiciones de operación en la pérdida de peso y como esto influye en la calidad del producto final.

Como paso previo al desarrollo de los contenidos de este trabajo, se presenta una revisión de los temas relacionados con la congelación y la pérdida de peso de alimentos.

1.2 ANTECEDENTES

Existen hasta el momento ciertos temas que se encuentran muy estudiados en el campo de la congelación de alimentos. Entre estos se pueden considerar:

Propiedades Térmicas: existen determinaciones experimentales de todas las propiedades térmicas en los productos simples que se congelan, pero el énfasis en estos años ha sido desarrollar modelos matemáticos para predecir propiedades termofísicas en función de la composición de los alimentos, en especial del contenido de agua. Los datos publicados experimentales son regresionados con estos modelos.

En literatura se encuentran numerosos métodos de predicción de propiedades (Miles y col., 1983; Succar, 1986; Lind, 1991). En particular, el trabajo de investigación publicado por Miles y col. (1983) tuvo como resultado la creación de un software conocido como Costherm. Este predice propiedades de una amplia variedad de productos. Existe evidencia que este paquete fue muy empleado en la industria, particularmente en Europa y que las predicciones son adecuadas para estos propósitos.

Actualmente se disponen de programas para el cálculo de propiedades en distintas situaciones (Página web: www.nelfood.com):

- Predicción de propiedades térmicas y temperatura inicial de congelación: Costherm2,
- Bases de datos de ecuaciones para la predicción de coeficientes de transferencia de calor: Surfheat,
- Predicción y modelado de procesos térmicos en alimentos: Food Product Modeller,
- Modelado de transferencia térmica en alimentos sólidos: Heatsolv,
- Simulación del enfriamiento y congelación de productos de panadería: Baktix.

En el caso que no se disponga de estos programas comerciales o que el problema que se desea resolver no se encuentre contemplado por los mismos, se debe realizar una selección de las propiedades que se emplearán en los cálculos de transferencia térmica. Una elección incorrecta de las mismas origina errores en la determinación, por ejemplo, de tiempos de congelación. Tocci y Mascheroni (1994) aplican tres grupos de propiedades térmicas para carne picada vacuna y comparan las predicciones de tiempos de congelación con los valores experimentales. Se obtiene una desviación del 10% en la predicción, dependiendo del grupo de propiedades utilizado.

Coefficientes de Transferencia de Energía: este es un campo que se ha desarrollado ampliamente en distintas ramas de la ingeniería. Varios autores han publicado correlaciones de los coeficientes de transferencia de energía válidas para diversas geometrías, considerando objetos sumergidos en un fluido en movimiento (Treybal, 1968; Welty, 1974; Perry y Chilton, 1985). También existen correlaciones obtenidas para las condiciones específicas encontradas

en equipos de congelación (Pham y Willix, 1987; Flores y Mascheroni, 1988; Tocci y Macheroni, 1995).

Tiempos de Congelación: la predicción de tiempos de congelación es el aspecto que se ha desarrollado con mayor éxito.

Para la resolución del problema de transferencia térmica, se han empleado soluciones numéricas y soluciones aproximadas. En ambos casos, los modelos más exactos son los que consideran las propiedades variables con la temperatura.

En el caso de soluciones numéricas, las propiedades variables pueden ser implementadas tanto en el esquema de diferencias finitas, como en el método de los elementos finitos. Se elige un método que sea sencillo y con poco error en la estimación.

El método de diferencias finitas es un método simple y se obtienen buenos resultados en formas regulares. Los esquemas a diferencias finitas se basan en el reemplazo de las derivadas de las ecuaciones diferenciales por cocientes incrementales. Estos cocientes tienden al valor de la derivada cuando los incrementos se hacen muy pequeños. La expresión de los cocientes se obtienen del desarrollo de la función en Series de Taylor. Dentro del método de diferencias finitas, se puede seleccionar diferentes esquemas de cálculo: implícito, explícito, Crank Nicolson (1947), esquema de Lees (1966) y esquema entálpico.

Para ejemplificar, se pueden considerar las predicciones de tiempos de congelación realizadas por los cinco métodos de diferencias finitas antes mencionados. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 1.1 (Cleland y Earle, 1984). Se puede observar que cuando el tamaño del incremento es muy pequeño, los cinco esquemas tienden al mismo resultado. En la misma Tabla se puede advertir que algunos resultados no se informan y esto se debe a que los métodos en esos valores de incrementos temporales no cumplen las condiciones de estabilidad.

Muchos son los autores que emplean el método de diferencias finitas para la resolución de problemas térmicos.

Mascheroni y Calvelo (1982) y Bazán y Mascheroni (1984) utilizan un esquema de diferencias finitas explícito para placa plana infinita, con propiedades de carne vacuna y ovina respectivamente, que han sido contrastados con valores experimentales de tiempos de congelación. De Michelis y Calvelo (1982) emplean un esquema similar para modelar la congelación de placa plana en condiciones de contorno asimétricas.

Wilson y Singh (1987) utilizan el esquema presentado por Lees en el caso de partículas esféricas.

Succar y Hayakawa (1984) utilizan el esquema de Crank Nicolson para modelar la congelación de placa plana. Experimentalmente ha sido verificado contra datos de tiempos de congelación de muestras de tilosa.

Joshi y Tao (1974) emplean el método entálpico para la congelación en placa plana de carne.

Mannapperuma y Singh (1988) desarrollan un método basado en una transformación de entalpías.

Cleland y Earle (1977) presentan perfiles de temperatura en función del tiempo predichos por el esquema de Lees con condiciones de contorno convectivas para diversas formas de producto: placas, cilindros, esferas.

Finalmente, Bonacina y Comini (1971), Bonacina y col. (1974) y Comini y col. (1974), emplean el esquema de Lees para la predicción de perfiles temperatura en función del tiempo, con condiciones de contorno de cuarta clase.

Tabla 1.1: Tiempos de congelación de frutillas. Condición operativa: espesor 0.02 m, temperatura inicial 10°C, temperatura final -25°C, temperatura del aire -35°C y coeficiente de transferencia de energía 70 W/m² °K.

Δt (s)	Lees	Crank-Nicolson	Implícito	Explícito	Entálpico
12	-	-	-	-	-
6	-	35.82	35.76	-	-
3	-	35.75	35.73	-	-
1.5	35.57	35.70	35.71	-	-
0.75	35.63	35.68	35.68	-	-
0.5	35.64	35.67	35.67	35.67	35.65
0.25	35.64	35.65	35.65	35.66	35.65

Es importante señalar que el método de diferencias finitas es más difícil de implementar para formas irregulares; en cambio el método de elementos finitos se adapta fácilmente a este tipo de situaciones. El mismo, a diferencia del método de diferencias finitas, emplea el cálculo variacional para encontrar la solución de la ecuación diferencial de calor. En el campo de la transferencia térmica ha sido muy empleado.

Misra y Young (1979) dan un completo desarrollo del modelado de conducción en una esfera, con propiedades constantes.

Cleland y col. (1984) compararon las predicciones de los métodos de diferencias finitas y elementos finitos, para placas, cilindros y esferas durante la descongelación. Ellos probaron con diferentes tipos de elementos y obtuvieron que el peor coeficiente de correlación entre los dos métodos fue 0.94. Cleland (1985) presenta predicciones de tiempo de congelación realizadas por los dos métodos y los resultados obtenidos fueron idénticos.

Un método numérico alternativo a los mencionados para abordar problemas térmicos es el método de elementos de contorno. Básicamente, el método se implementa en los sistemas donde el interés está en el cálculo del borde y no del interior del producto (Brebbia y Walker, 1979). El método se puede generalizar para conocer variables en el interior, pero el trabajo que demanda supera las ventajas de la aplicación.

En general, los métodos numéricos requieren un desarrollo matemático laborioso para caracterizar un proceso específico, pero ofrecen un detalle exhaustivo de los perfiles de temperatura en todo el alimento durante el proceso completo. Si, en cambio, sólo interesa conocer el tiempo total de proceso, existen métodos aproximados que ofrecen similar precisión a la de los métodos numéricos en la determinación del tiempo de congelación y en general cubren ampliamente las condiciones de operación encontradas en la práctica industrial.

Los métodos aproximados, a través de simplificaciones del problema original, llegan a ecuaciones de predicción. En general, estas ecuaciones contienen parámetros que se calculan mediante el ajuste de datos experimentales o datos teóricos obtenidos aplicando métodos numéricos. En la mayoría de las soluciones se emplean datos constantes, tanto de propiedades como de condiciones de operación. Aunque esto no ocurre frecuentemente en la práctica, tienen como ventaja que con sólo el empleo de una fórmula, se puede estimar rápidamente el tiempo de congelación.

Cleland (1990) presenta una revisión de soluciones aproximadas, detallando los rangos de validez de cada una de ellas.

De los métodos aproximados, el más importante por su fundamento teórico y porque dio origen a numerosos métodos mejorados es el de Plank (1913). Para encontrar la fórmula de predicción de tiempos de congelación, el autor realizó las siguientes suposiciones:

- El alimento posee una temperatura inicial igual a la de cambio de fase, que además es única,

- El cambio de fase ocurre a temperatura constante, no se considera el subenfriamiento luego del cambio de fase,
- Emplea propiedades constantes y un estado pseudo estacionario en la zona congelada que origina un perfil lineal de temperaturas.

Su mayor contribución fue la siguiente fórmula para el cálculo del tiempo de congelación:

$$t_c = \frac{L_f L^2}{k_f (T_f - T_a)} \left(\frac{P}{Bi} + Q \right) \quad (1.1)$$

El parámetro P es un factor de forma que prevalece cuando la transferencia de energía es controlada externamente ($Bi \rightarrow 0$) y el parámetro Q es el factor de forma que predomina cuando la transferencia de calor es controlada internamente ($Bi \rightarrow \infty$). La ecuación provee un factor de peso entre las dos formas de control. En su trabajo, Plank sugiere valores de P y Q obtenidos analíticamente para distintas geometrías regulares: placa infinita, cilindro infinito, esfera.

A partir de esta ecuación, los métodos aproximados que se generaron, se pueden agrupar en dos categorías:

- Mejoras de la ecuación original de Plank,
- Regresiones empíricas.

Las mejoras de la ecuación de Plank consisten en:

- Agregado de factores que corrigen la fórmula original (Plank, 1963, Cleland y Earle 1977, 1979),
- Suma de términos que tienen en cuenta los tiempos de preenfriamiento y atemperado para considerar que el producto tiene inicialmente una temperatura distinta a la temperatura de cambio de estado (Mascheroni y Calvelo, 1982),
- Cambios en los valores de las constantes o de los parámetros (Pham, 1984).

Por otro lado, las ecuaciones empíricas se obtienen regresionando los valores experimentales, teóricos o numéricos con una ecuación que generalmente tiene la forma propuesta inicialmente por Plank.

Bazán y Mascheroni (1984) regresionan resultados de tiempos de congelación obtenidos por diferencias finitas para placa plana.

Succar y Hayakawa (1984) obtienen para placa plana una regresión en función de los parámetros relevantes de proceso.

Tocci y Mascheroni (1994) desarrollan una regresión no lineal para resultados de congelación de carne vacuna.

Por último, Salvadori y Mascheroni (1991, 1997) obtienen una regresión del tiempo de congelación en función de los parámetros relevantes del proceso basada en los diagramas térmicos generalizados. La misma, se puede aplicar a geometrías regulares y multidimensionales.

Finalmente, se puede concluir que el tiempo de congelación pueden ser calculado a través de una gran variedad de metodologías. Cabe señalar que todos estos modelos se restringen a resolver el problema considerando solamente la conducción de calor con cambio de fase. Hasta el momento, la transferencia de materia que ocurre durante la congelación debido a la sublimación del hielo superficial no ha sido incorporada a la determinación de tiempos de congelación.

La sublimación de hielo ha sido ampliamente descripta durante el proceso de liofilización. En dicho proceso, el alimento se congela y en un paso posterior, se deshidrata realizando vacío y permitiendo que los cristales de hielo sublimen. La liofilización se aplica en la industria alimenticia y en la farmacéutica y es una metodología importante para la conservación de productos. Los estudios realizados en este campo están relacionados al conocimiento del mecanismo de la sublimación del hielo a bajas presiones.

Sublimación del hielo: el primer paso en el estudio de la sublimación del hielo lo dio Carman (1948), cuya teoría tenía en cuenta ciertos parámetros como la velocidad absoluta de sublimación y el paso libre medio de las moléculas de vapor. Luego se realizaron una serie de experimentos con el fin de verificar la ecuación de Knudsen para la velocidad absoluta de sublimación del hielo G_s :

$$G_s = \beta p_s \left(\frac{M}{2\pi R_g T} \right)^{1/2} \quad (1.2)$$

donde β es el coeficiente de evaporación, p_s es la presión de saturación del hielo, M es el peso molecular del vapor de agua, R_g es la constante universal de los gases y T es la temperatura absoluta.

Esta ecuación se obtiene a partir de la teoría cinética, realizando dos suposiciones:

- El vapor se encuentra en equilibrio dinámico con la superficie del hielo,
- El número de moléculas que subliman escapando depende sólo de la temperatura del hielo; el número que retorna a la superficie de hielo y las que no escapan dependen de la presión y temperatura del vapor.

Los trabajos experimentales realizados sobre el tema estaban orientados a verificar esta ecuación o en encontrar un valor exacto de β .

Tschudin (1946) obtuvo valores de β de 0.96 ± 0.06 a -60°C hasta -85°C ; Kramers y Stemmerding (1951) obtuvieron un valor unitario desde -40°C hasta -60°C ; Strickland-Constable y Bruce (1954) obtuvieron valores de β de 0.44 a 0.63 a -40°C .

Los valores menores que la unidad fueron explicados por los autores en términos de una temperatura alta de trabajo y un pequeño paso libre medio a -40°C , comparado con el que se obtiene a -60°C , temperatura a la cual se obtuvieron mayores valores de β .

Kramers (1958) ha señalado que para satisfacer la fórmula de Knudsen para la sublimación del hielo a -30°C el gradiente de temperaturas debajo del hielo debe ser de $50^{\circ}\text{C}/\text{mm}$, lo cual es imposible. Por ello, la ecuación (1.2) ha sido modificada por varios autores, para que tenga en cuenta el paso libre medio de las moléculas, la temperatura y la presión ambiente, las condiciones de no-equilibrio durante la sublimación y varios factores más en el coeficiente de evaporación. Por lo dicho, el problema se estudia desde otro punto de vista distinto al de la teoría clásica. De todas formas, donde alcanzó su mayor desarrollo fue durante el estudio del proceso de liofilización.

Mellor (1978) es uno de los investigadores que se ocupó de la sublimación del hielo a bajas presiones y su aplicación específica a este proceso.

Es importante señalar que los resultados obtenidos en el estudio del proceso de liofilización no se pueden trasladar directamente al proceso de congelación, debido a que la liofilización se lleva a cabo a presiones muy bajas, mientras que la congelación y el almacenamiento congelado se realizan a presión ambiente.

Más recientemente, varias disciplinas estudiaron el tema de sublimación del hielo en esta situación. Así en las regiones de clima frío, se estudia la sublimación del hielo asociada a la congelación de lagos y suelos. Los científicos de la URSS y de distintos países de Europa en los años 70' abordaron el tema experimental y teóricamente con el fin de determinar las distribuciones de temperatura y humedad en suelos sujetos a temperaturas negativas (Aguirre-Puente y col., 1978; Ershov y col., 1975; 1978).

Por otro lado, la sublimación de hielo es un importante factor a ser considerado en la ingeniería civil, en especial en la construcción de instalaciones subterráneas cubiertas por suelos congelados: túneles, minas y reservorios de gases licuados.

En el caso particular de la conservación de alimentos, se analizó el fenómeno de sublimación del hielo para el almacenamiento congelado, con trabajos orientados a la determinación experimental de la pérdida de peso. En este sentido, Pham y Willix (1984) midieron la pérdida de peso durante el almacenamiento congelado de carne y propusieron ecuaciones simples basadas en la teoría de secado y en el uso de la carta psicrométrica.

Para la obtención de datos experimentales, Lambrinos y Aguirre Puentes (1983) construyeron un túnel de congelación en el cual han medido pérdida de peso durante el almacenamiento congelado de papa (Lambrinos y Aguirre Puentes, 1983), tilosa (Sukhwai y Aguirre Puentes, 1983) y hielo puro (Aguirre Puentes y Sukhwai, 1983).

Los balances de energía y materia que describen teóricamente las experiencias anteriores, fueron presentados por Sukhwai y Aguirre-Puentes (1983), pero no han sido resueltos matemáticamente, sólo se realiza una descripción cualitativa.

Méndez Bustabad (1999) presenta datos experimentales de pérdida de peso durante el almacenamiento congelado durante largos períodos de tiempo de carne vacuna.

En literatura existen escasos trabajos de determinación de pérdida de peso de alimentos durante el proceso de congelación.

En ese sentido, Lambrinos y Aguirre Puentes (1983) presentan los resultados de la pérdida de peso durante la congelación y el almacenamiento congelado de papa.

Finalmente, se puede concluir que en literatura no existe una descripción completa y detallada de la pérdida de peso de los alimentos durante la congelación y el almacenamiento congelado de alimentos. Este estudio es necesario pues, como veremos a continuación, la producción y el consumo de alimentos congelados crece en forma continua y la pérdida de peso se traduce en pérdida de calidad de producto y pérdida económica significativa.

1.3 EL MERCADO DE LOS PRODUCTOS CONGELADOS

La variedad actual de productos congelados permite componer nuestras comidas a partir exclusivamente de estos productos. A medida que la vida se hace más estresante,

probablemente crece la necesidad de comidas y bebidas fáciles de preparar y con buen sabor, que a su vez proporcionen beneficios nutritivos.

El empleo de productos congelados para el consumo está asociado al uso de dos electrodomésticos: freezers y horno microondas. En nuestro país el uso de freezers no está totalmente incorporado. Las comidas preparadas están directamente asociadas con este electrodoméstico para su conservación en buen estado durante largos períodos de tiempo. Si se produce un cambio en este sentido, el consumo de los alimentos congelados crecerá por encima de las expectativas de los estudios de mercado.

En EE.UU. y en Europa, los alimentos sanos, naturales y mínimamente tratados continúan creciendo en popularidad, sugiriendo una reacción contra los alimentos producidos en cadena y muy elaborados que, hasta hace poco, han compuesto la dieta americana típica. Dentro de este grupo de productos se encuentran los alimentos congelados, que no necesitan de conservantes químicos, no emplean la radiación como método preservador y como utiliza temperaturas negativas, no destruye los nutrientes en su proceso. El mercado de las comidas congeladas está alcanzando ya a los productos orgánicos, que están teniendo una veloz expansión en el mercado europeo (Quick Frozen Foods, 2000).

Un indicador más del aumento del consumo de productos congelados es una experiencia francesa que consiste en un expendedor automático de alimentos congelados, que en un plazo de dos minutos entrega el producto ya calentado mediante un horno microondas interno.

La idea es interesante, ya que existen varias situaciones de consumo que pueden ser satisfechas mediante este dispositivo mejor que con el servicio personal (servicios ferroviarios, aeropuertos, bares, oficinas, etc.).

En otros países de Latinoamérica la situación es similar. La industria de congelados en Venezuela se remonta a los años 70' y actualmente se comercializan desde vegetales, procesados de pollo y carne, pizzas, postres, pulpas de frutas, papas, productos del mar, hasta las comidas preparadas.

En nuestro país, pese a las difíciles circunstancias que ha sufrido la economía durante la última década, el mercado de alimentos congelados continúa en demanda.

Debido a los cambios en la forma de vida del consumidor argentino, en la actualidad es más fácil recurrir a la comida congelada en lugar de preparar alimentos frescos.

Según datos de la consultora AC Nielsen, durante el año 1999, este mercado experimentó un crecimiento de un 7.5 %.

El primer paso para su evolución fue el desarrollo de la cadena de frío, conducida por los grandes canales de distribución. Sin embargo, el consumo per cápita total es de 1 kilo por año -en 1994 era de 700 gramos- versus 3,7 en Chile, 35 en Europa y 40 en los Estados Unidos (Figura 1.1). Para que el crecimiento sea mayor, es necesario que la cadena se expanda en los canales más pequeños. Otra barrera actual es el nivel de precios que, en líneas generales, sigue siendo alto en comparación con sus substitutos, los productos frescos refrigerados o enlatados.

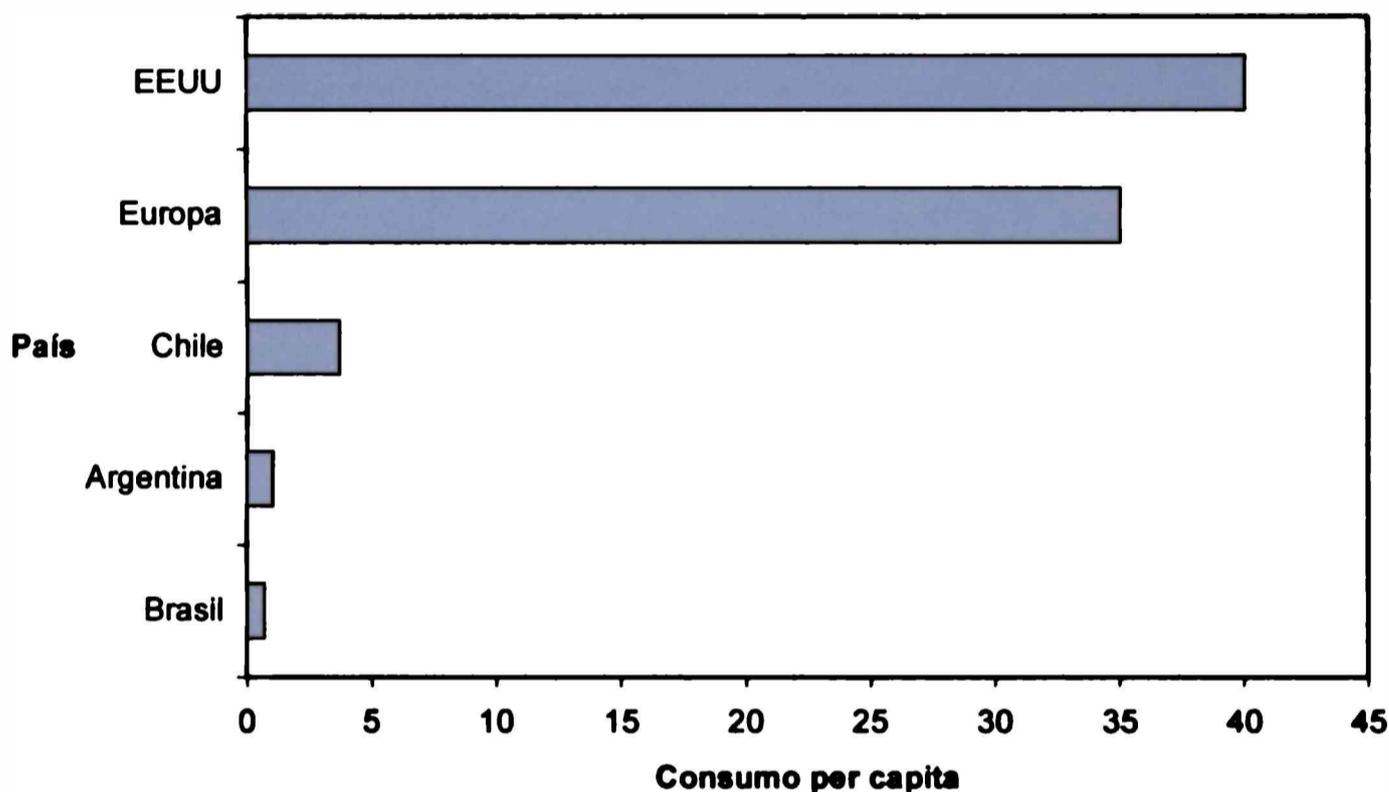


Figura 1.1: Consumo de productos congelados. Fuente: A.C. Nielsen.

De acuerdo a la encuesta citada, el producto congelado más consumido es la hamburguesa de carne, que captura el 29.6% del mercado. En la Figura 1.2 se observa como se distribuye el consumo de los mismos.

Según el relevamiento realizado, la cantidad de productos aumentó, en el último año, un 3.9 % en helados y postres y un 10 % en las otras categorías.

Según el mismo análisis, en conjunto, el rubro factura 156.5 millones de dólares por año.

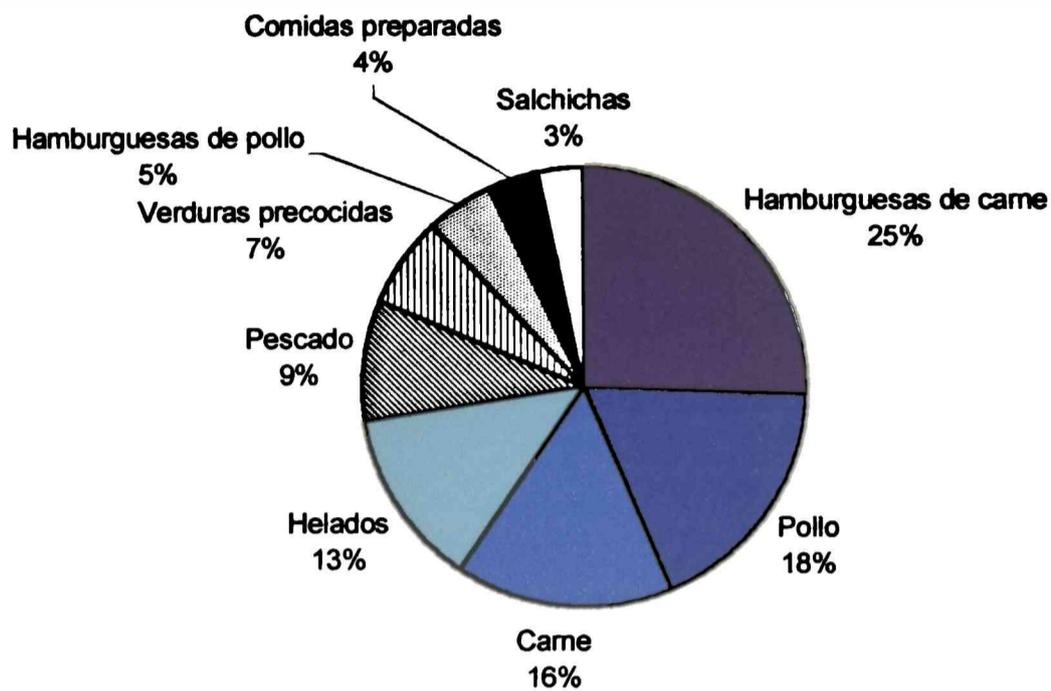


Figura 1.2: Distribución del consumo de productos congelados.

Teniendo en cuenta las estadísticas del mercado de consumo de productos congelados, se debe señalar que en nuestro país se congelan y almacenan gran cantidad de carnes y pescados sin procesar. En las Tablas 1.2 y 1.3 se muestran las proyecciones de faena, exportación y consumo de carnes y pesca marítima realizadas por la Secretaría de Agricultura, Pesca y Alimentación.

Vinculando estos valores con el tema específico de nuestro interés, se puede realizar una estimación de la pérdida de peso durante el almacenamiento congelado considerando la congelación de carne vacuna y pescados sin procesar. Para ello se puede considerar que el 60% del total de carnes que se exportan corresponden a cortes congelados y que el 50% de la captura de pesca marítima se exporta congelada.

Estos valores nos permiten hacer una estimación del impacto económico. Si se considera una pérdida de peso mínima del 1%, esto representa una pérdida de 1735 toneladas en carne vacuna y 5587 toneladas en pescados, solamente durante el año 1998. Esto implica una pérdida económica que justifica un estudio más profundo y detallado del tema, que se lleva a cabo en este trabajo de Tesis.

Tabla 1.2: Faena de vacunos, porcinos y ovinos, exportación y consumo de carne vacuna, porcina y ovina.

Faena (cabezas)	1994	1995	1996	1997	1998
Vacunos	13200357	12857408	12916716	12794718	11345542
Porcinos	2118234	2245753	1905000	1740000	2100000
Ovinos	1055185	547343	554566	629633	475299
Exportación (toneladas)					
Vacunos	376776	520062	476501	437215	289238
Porcinos	10540	11369	5737	2521	2005
Ovinos			1219	1135	833
Consumo (toneladas)					
Vacunos	2406224	2167938	2217499	2274785	2157762
Porcinos	205907	222589	218970	214852	258993
Ovinos	58091	54921	55429	55774	35123
Fuente: Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación Total del país.					

Tabla 1.3: Pesca marítima total.

	1994	1995	1996	1997	1998
Total Toneladas	938601.8	1136898.7	1211460.0	1339615.0	1117375.0
Pescados	716623.3	924733.8	901262.3	912081.5	796133.5

1.4 DESCRIPCIÓN DE CONTENIDOS Y OBJETIVOS

En este trabajo de tesis, se presenta un estudio del fenómeno de sublimación de hielo durante la congelación y el almacenamiento congelado de alimentos orientado a la determinación del tamaño de la capa seca porosa producida y de la pérdida de peso como factor económico y de calidad.

Teniendo en cuenta que hasta el presente no se ha desarrollado un modelo matemático eficaz que describa adecuadamente la pérdida de peso durante estos procesos, en primer lugar, se plantean los balances microscópicos acoplados de energía y de materia. Las ecuaciones obtenidas son válidas para todas las geometrías regulares unidimensionales. En las mismas se

consideran propiedades térmicas variables. El resultado es un sistema de ecuaciones diferenciales fuertemente no lineal, que no tiene solución analítica.

Para resolver este sistema de ecuaciones diferenciales no lineales se aplica un método numérico de Diferencias Finitas (Crank Nicolson centrado). El desarrollo y el análisis de estabilidad del mismo se realizan en el Capítulo 2. La resolución completa del sistema se programó en Fortran 90 y el listado del programa se presenta en el Apéndice I.

Para realizar experiencias de pérdida de materia en productos alimenticios, se diseñó y construyó un túnel de congelación. En el Capítulo 3 se realiza una descripción exhaustiva del funcionamiento y de las características del mismo.

Para describir la fluidodinámica dentro del túnel, se procedió a la determinación experimental de los coeficientes transferencia de materia, que se detalla en el Capítulo 4. La regresión de los resultados experimentales permitió obtener ecuaciones en función de los números adimensionales característicos del fenómeno analizado, para así predecir los coeficientes de transferencia de materia para las distintas situaciones operativas contempladas por el modelo numérico.

En el mismo túnel de congelación se realizó la determinación de la pérdida de peso de alimentos durante la congelación y el almacenamiento congelado. Las experiencias se realizaron con distintos productos cárneos: hamburguesas, albóndigas, cilindros de peceto y pechugas de pollo en distintas condiciones de operación. Estas experiencias se describen en el Capítulo 5.

El modelo matemático luego fue validado exitosamente contra datos de literatura y contra datos experimentales propios (Capítulo 6). También se analizó la superficie de los alimentos al finalizar el almacenamiento congelado. Distintas muestras se observaron en un microscopio electrónico y en este mismo capítulo se describe la estructura de la capa deshidratada porosa y se compara la predicción realizada por el modelo matemático respecto del tamaño real de los poros.

Por último, en el Capítulo 7 se evalúa la capacidad del modelo de predecir:

- ✓ Perfiles de temperatura durante el enfriamiento, congelación y almacenamiento congelado,
- ✓ Flujo de vapor por sublimación,
- ✓ Espesor de capa deshidratada,
- ✓ Pérdida de peso y espesor de capa deshidratada superficial frente a distintas condiciones de operación.

CAPÍTULO 2: MODELO MATEMÁTICO

2.1 TEORÍA

El fenómeno de sublimación de hielo aparece como interacción entre el alimento congelado con el medio ambiente, determinando la formación de una capa deshidratada superficial.

Los fenómenos que se deben considerar en el análisis son la transferencia de calor y materia entre el producto y el aire y los siguientes cambios de estado:

- Congelación del agua líquida libre,
- Sublimación del hielo superficial.

En el caso de almacenamiento congelado, solamente el último cambio de estado tiene lugar.

Desde un punto de vista físico, el alimento puede ser considerado como una combinación de una matriz sólida, una fase líquida (solución acuosa) y una fase gaseosa (aire y vapor de agua).

El agua en el alimento se puede encontrar en distintos estados: como hielo, solución acuosa y/o vapor de agua. En el caso del agua líquida, puede estar libre o ligada. Las uniones del agua líquida tienen lugar en la superficie de la matriz sólida y dependen de la naturaleza del alimento.

Durante la sublimación, que actúa sobre la zona congelada, se produce una transferencia de vapor al medio ambiente. El movimiento de vapor puede ser considerado difusivo en la capa deshidratada porosa, debido a la diferencia de presiones de vapor entre la superficie de hielo y el seno del aire del medio ambiente.

Dependiendo de las dimensiones de los poros, el proceso de difusión puede ser de tres tipos: flujo viscoso (régimen continuo), flujo viscoso-molecular (régimen de transición) y flujo libre molecular.

Las condiciones límites para estos tres tipos de flujos fueron propuestas por Lykov (Ershov, 1975) y tienen que ver con la relación entre el paso libre medio de las moléculas de vapor al radio del capilar, conocido también como número de Knudsen, Kn . Si este número es menor que 10^{-3} nos encontramos frente a un flujo viscoso que se describe a través de la primera ley de Fick, si es mayor que 1 los cálculos de flujo se deben realizar sobre la base de las consideraciones de la teoría cinética de los gases. Si se supone un camino libre medio de

0.1 μm (Glasstone, 1976) y que el diámetro de los poros generados por los cristales de hielo es de aproximadamente 50 μm (Bevilacqua y col., 1979), el número de Knudsen es menor que la unidad y cercano a 10^{-3} , por lo tanto se puede considerar válida la ley de Fick.

Debido a lo antes dicho, la naturaleza de la matriz sólida y su caracterización es muy importante para el proceso de difusión del vapor. Más aún, podrían considerarse distintas etapas por su complejidad:

- Considerar la sublimación del hielo puro en una interfase con el medio ambiente,
- Considerar que existe una matriz porosa de determinada granulometría y forma, siendo estos los únicos factores que influyen en el flujo de vapor de agua,
- El estudio de la granulometría revela que existen fuerzas capilares y la presencia de agua ligada,
- Reconocer que el medio es un sistema biológico animal o vegetal, el cual tiene una estructura celular y la presencia de membranas que determinan la transferencia de vapor al medio interno.

La transferencia de vapor al medio ambiente es la que origina el crecimiento de la capa deshidratada. Dependiendo del tipo de matriz, existe un frente de sublimación separando las zonas congelada y deshidratada o una zona donde ocurre el cambio de fase (King, 1971). Si se supone la existencia de un frente de sublimación, la determinación de la posición y el movimiento del mismo es una tarea muy compleja. No ocurre lo mismo con el frente de congelación, que se distingue a través del conocimiento de la temperatura interna del alimento.

En nuestro estudio, se considera que el alimento se encuentra dividido en tres zonas: una interna no congelada, cuyo espesor disminuye con el tiempo, una congelada intermedia y la zona deshidratada en la superficie, ambas crecen con el tiempo.

De acuerdo a esta descripción del sistema, se plantean los balances microscópicos de energía y de materia en cada una de las zonas. Durante el almacenamiento, sólo deben ser consideradas las zonas congelada y deshidratada. Desde un punto de vista matemático, el almacenamiento congelado es un caso particular de la formulación general y no necesita un desarrollo particular.

Un esquema simplificado del alimento y de sus intercambios de calor y de materia es el siguiente:

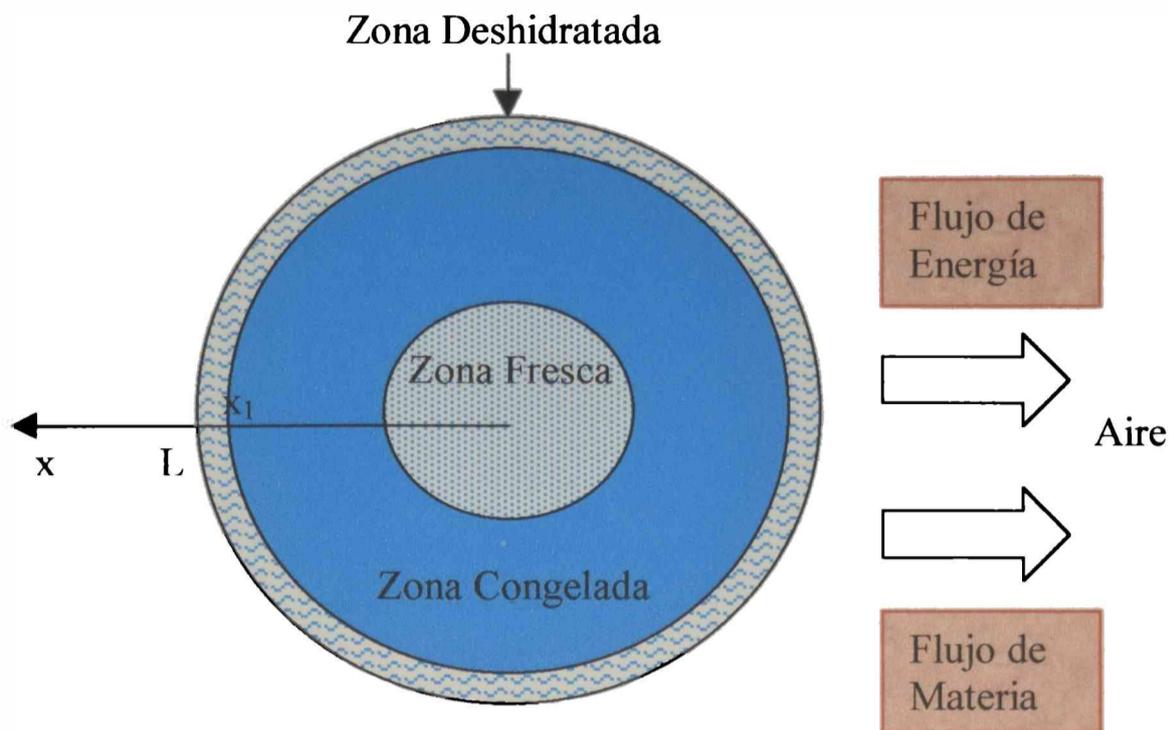


Figura 2.1: Esquema simplificado de las diferentes zonas en el alimento y su relación con el medio.

El modelo matemático completo considera simultáneamente las transferencias de energía y de materia.

En el caso de procesos industriales la temperatura inicial de los productos es mayor que la temperatura de congelación, por lo tanto el modelo debe considerar la pérdida de peso durante la etapa inicial de refrigeración.

El análisis se realizó para geometrías regulares unidimensionales: placa plana, cilindro infinito y esfera. La formulación es general y se diferencian las tres geometrías a través de un índice geométrico GI . El mismo adopta el valor de cero para placas planas, uno para cilindros y dos para esferas.

El desarrollo del modelo considera dos etapas temporales:

Etapas 1: Los productos ingresan con temperaturas mayores que la temperatura de congelación, por lo tanto existe una etapa de refrigeración. Para temperaturas mayores que la temperatura inicial de congelación T_{if} , se deben plantear los balances microscópicos de calor y de materia.

El balance de energía se plantea suponiendo que la transferencia se realiza de acuerdo a la ley de Fourier, sin generación interna de calor y con propiedades que dependen de la temperatura. De acuerdo a estas suposiciones el balance microscópico de energía es:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k \nabla T) \quad (2.1)$$

De manera similar, para el planteo del balance microscópico de materia se considera que la transferencia se realiza de acuerdo a la ley de Fick y que el coeficiente de difusión depende de la temperatura. De acuerdo a estas suposiciones el balance microscópico de materia es:

$$\frac{\partial C_w}{\partial t} = \nabla(D_w \nabla C_w) \quad (2.2)$$

Las ecuaciones anteriores se pueden expresar en función del índice geométrico GI que considera las diversas formas de producto:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial k}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + GI \frac{k}{x} \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial C_w}{\partial t} = \frac{\partial D_w}{\partial x} \frac{\partial C_w}{\partial x} + D_w \frac{\partial^2 C_w}{\partial x^2} + GI \frac{D_w}{x} \frac{\partial C_w}{\partial x} \quad (2.4)$$

Estos balances son válidos para todo el alimento ($0 \leq x \leq L$), donde x es la coordenada axial o radial. Para el balance de energía, se plantean las siguientes condiciones iniciales y de contorno:

$$t = 0 \quad T = T_{ini} \quad 0 \leq x \leq L \quad (2.5)$$

$$x = 0 \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad t > 0 \quad (2.6)$$

$$x = L \quad -k \frac{\partial T}{\partial x} = h(T - T_a) + L_{vap} k'_m (C_w - C_{equi}) \quad t > 0 \quad (2.7)$$

En el caso del balance de materia, se plantean las siguientes condiciones iniciales y de contorno:

$$t = 0 \quad C_w = C_{w,ini} \quad 0 \leq x \leq L \quad (2.8)$$

$$x = 0 \quad \frac{\partial C_w}{\partial x} = 0 \quad t > 0 \quad (2.9)$$

$$x = L \quad -D_w \frac{\partial C_w}{\partial x} = k_m (C_w - C_{equi}) \quad t > 0 \quad (2.10)$$

Es importante señalar que k_m es el coeficiente de transferencia de materia en unidades equivalentes de producto.

Etapa 2: Cuando la temperatura superficial alcanza la temperatura inicial de congelación, se considera el alimento dividido en tres zonas como muestra la Figura 2.1.

Para las zonas fresca y congelada ($0 \leq x < x_1$), se aplica el siguiente balance microscópico de energía para calcular el perfil de temperatura, siendo x_1 la posición del frente del frente de sublimación:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial k}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + G I \frac{k}{x} \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.11)$$

Las propiedades corresponden al alimento congelado o fresco dependiendo de la temperatura local. El modelo emplea un calor específico aparente que agrupa el calor específico sensible y la entalpía de solidificación del hielo:

$$C_p (T < T_{if}) = C_p (T > T_{if}) - L_f \frac{\partial w}{\partial T} \quad (2.12)$$

En el caso de almacenamiento congelado las propiedades corresponden al producto congelado.

Para la zona deshidratada ($x_1 \leq x \leq L$) la siguiente ecuación es aplicada para calcular el perfil de temperaturas:

$$\rho_d C_{p_d} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial k_d}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + k_d \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + GI \frac{k_d}{x} \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.13)$$

Esta ecuación emplea las propiedades físicas correspondientes al producto deshidratado. Para esta etapa, se deben considerar las siguientes condiciones de contorno:

$$x = 0 \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad t > 0 \quad (2.14)$$

$$x = x_1 \quad -k \frac{\partial T}{\partial x} = L_s m_s \frac{dx_1}{dt} - k_d \frac{\partial T}{\partial x} \quad t > 0 \quad (2.15)$$

$$x = L \quad -k_d \frac{\partial T}{\partial x} = h(T - T_a) \quad t > 0 \quad (2.16)$$

La sublimación del hielo tiene lugar en la zona congelada, dejando en la superficie del alimento una capa deshidratada de estructura porosa. Así, existe una transferencia de vapor de agua al medio a través de dicha capa. Cabe señalar que una fracción del hielo permanece adsorbida a las fibras sin sublimar, dependiendo su magnitud de las condiciones locales de temperatura y de la humedad relativa del vapor (Chumak y Sibiriakov, 1988).

Como ya habíamos señalado, el flujo de vapor es considerado difusivo a través de la capa deshidratada, siendo la fuerza impulsora la diferencia de presiones de vapor entre el frente de sublimación y el ambiente.

El balance microscópico de materia que describe la transferencia de vapor en esta zona ($x_1 \leq x \leq L$) es el siguiente:

$$\epsilon \frac{\partial C_{va}}{\partial t} = \frac{\partial D_{ef}}{\partial x} \frac{\partial C_{va}}{\partial x} + D_{ef} \frac{\partial^2 C_{va}}{\partial x^2} + GI \frac{D_{ef}}{x} \frac{\partial C_{va}}{\partial x} \quad (2.17)$$

Las condiciones de contorno que completan el planteo del balance son:

$$x = x_1 \quad C_{va} = \frac{P_{sat}(T)}{R_g T} \quad t \geq 0 \quad (2.18)$$

$$x = L \quad -D_{ef} \frac{\partial C_{va}}{\partial x} = k_m (C_{va} - C_a) \quad t > 0 \quad (2.19)$$

Por último, para evaluar la posición del frente de sublimación y el espesor de la capa deshidratada, el modelo establece que, para $x = x_1$:

$$-\frac{m_s}{M} \frac{dx_1}{dt} = -D_{ef} \frac{\partial C_{va}}{\partial x} \quad \text{donde} \quad m_s = \rho(w - f_{ads}(1 - Y_o)) \quad (2.20)$$

2.2 MÉTODO NUMÉRICO

Las ecuaciones (2.3) y (2.4), o (2.11), (2.13), (2.17) y (2.20) conforman un sistema de ecuaciones diferenciales no lineales, que no tiene solución analítica. Este sistema se resolvió por medio del método de Diferencias Finitas Implícito Crank-Nicolson (Forsythe y Wasow, 1960). En la Etapa 1 se aplica el esquema tradicional, pero cuando comienzan a existir las tres zonas se aplica una grilla variable para seguir la deformación de la grilla original debido al movimiento del frente de sublimación.

El método tradicional consiste en reemplazar las derivadas que presentan los balances y las condiciones de contorno correspondientes, con ecuaciones de cocientes incrementales. Las ecuaciones a diferencias generadas por el método son:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{U_i^{n+1} - U_i^n}{\Delta t} \quad (2.21)$$

$$\frac{\partial U}{\partial x} = \frac{U_{i+1}^{n+1} - U_{i-1}^{n+1} + U_{i+1}^n - U_{i-1}^n}{4\Delta x} \quad (2.22)$$

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = \frac{U_{i+1}^{n+1} + U_{i-1}^{n+1} - 2U_i^{n+1} + U_{i+1}^n + U_{i-1}^n - 2U_i^n}{2\Delta x^2} \quad (2.23)$$

donde U es temperatura o concentración, i denota la posición del nodo, n el intervalo de tiempo, Δx el incremento espacial y Δt el incremento temporal, tales que $x = i \Delta x$ y $t = n \Delta t$.

Para evaluar la derivada espacial de las propiedades, se asume que tanto la conductividad térmica, como el coeficiente de difusión tienen un cambio despreciable entre tiempos n y $(n+1) \Delta t$, entonces:

$$\frac{\partial V}{\partial x} = \frac{V_{i+1}^n - V_{i-1}^n}{2\Delta x} \quad (2.24)$$

donde V es la conductividad térmica o el coeficiente de difusión.

Como se puede observar, en la primer etapa el espacio se encuentra discretizado de acuerdo a una grilla de espaciado constante, con un incremento Δx .

Para la segunda etapa, el dominio ha sido discretizado de acuerdo a una grilla variable, como se muestra en la Figura 2.2, donde 0 indica el centro del alimento, m indica el frente de sublimación (el punto m se mueve con tiempo) y b indica la superficie.

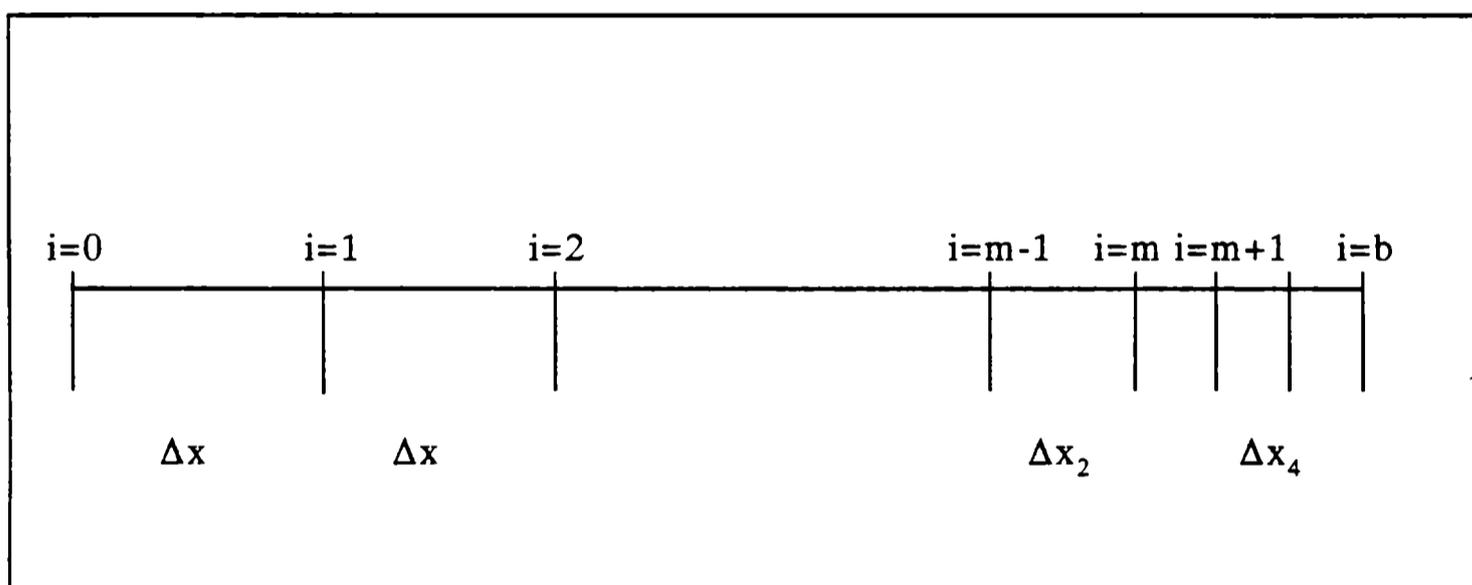


Figura 2.2: Discretización del dominio.

El modelo numérico emplea 3 incrementos espaciales diferentes:

- Δx : Incremento espacial constante de las zonas congelada-fresca,
- Δx_2 : Incremento espacial variable (corresponde al primer incremento dentro de la zona congelada, y disminuye de acuerdo al avance del frente de sublimación),
- Δx_4 : Incremento espacial variable, en el área deshidratada.

2.2.1 ETAPA 1

Para conocer los perfiles de temperatura durante esta etapa, se deben reemplazar las ecuaciones (2.21), (2.22), (2.23) y (2.24) en el balance microscópico (2.3) y a través de este procedimiento se obtiene la ecuación general para el cálculo de las temperaturas:

$$\begin{aligned}
 & T_{i+1}^{n+1} \left(-\frac{k_i^n}{2\Delta x^2} - \frac{k_{i+1}^n - k_{i-1}^n}{8\Delta x^2} - \frac{GI k_i^n}{4(i-1)\Delta x^2} \right) + T_i^{n+1} \left(\frac{\rho_i^n Cp_i^n}{\Delta t} + \frac{k_i^n}{\Delta x^2} \right) + \\
 & + T_{i-1}^{n+1} \left(\frac{-k_i^n}{2\Delta x^2} + \frac{k_{i+1}^n - k_{i-1}^n}{8\Delta x^2} + \frac{GI k_i^n}{4(i-1)\Delta x^2} \right) = T_{i+1}^n \left(\frac{k_i^n}{2\Delta x^2} + \frac{k_{i+1}^n - k_{i-1}^n}{8\Delta x^2} + \frac{GI k_i^n}{4(i-1)\Delta x^2} \right) + (2.25) \\
 & + T_i^n \left(\frac{\rho_i^n Cp_i^n}{\Delta t} - \frac{k_i^n}{\Delta x^2} \right) + T_{i-1}^n \left(\frac{k_i^n}{2\Delta x^2} - \frac{k_{i+1}^n - k_{i-1}^n}{8\Delta x^2} - \frac{GI k_i^n}{4(i-1)\Delta x^2} \right)
 \end{aligned}$$

Esta ecuación es válida para $0 < i < b$.

Para el centro, ($i = 0$), el balance microscópico de energía presenta una discontinuidad cuando se aplica a esferas y cilindros. El problema se resuelve aplicando la Regla de L'Hôpital al término correspondiente. Así:

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\frac{\partial U}{\partial x}}{x} = \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \quad (2.26)$$

Reemplazando la ecuación (2.26) en el balance microscópico de energía (2.3) se obtiene el balance microscópico modificado:

$$\rho Cp \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial k}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + GI k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (2.27)$$

Para obtener la ecuación de cálculo de la temperatura del centro, se reemplazan las ecuaciones a diferencias (2.21), (2.22), (2.23) y (2.24) en la ecuación (2.27):

$$\begin{aligned}
 & T_{i+1}^{n+1} \left(-\frac{k_{i+1}^n - k_{i-1}^n}{8\Delta x^2} - \frac{(1+GI)k_i^n}{2\Delta x^2} \right) + T_i^{n+1} \left(\frac{\rho_i^n C p_i^n}{\Delta t} + \frac{(1+GI)k_i^n}{\Delta x^2} \right) + \\
 & + T_{i-1}^{n+1} \left(\frac{k_{i+1}^n - k_{i-1}^n}{8\Delta x^2} - \frac{(1+GI)k_i^n}{2\Delta x^2} \right) = T_{i+1}^n \left(\frac{k_{i+1}^n - k_{i-1}^n}{8\Delta x^2} + \frac{(1+GI)k_i^n}{2\Delta x^2} \right) + \quad (2.28) \\
 & + T_i^n \left(\frac{\rho_i^n C p_i^n}{\Delta t} - \frac{(1+GI)k_i^n}{\Delta x^2} \right) + T_{i-1}^n \left(-\frac{k_{i+1}^n - k_{i-1}^n}{8\Delta x^2} + \frac{(1+GI)k_i^n}{2\Delta x^2} \right)
 \end{aligned}$$

En esta expresión existen dos puntos $(i-1,n)$ y $(i-1,n+1)$ que se encuentran fuera del dominio (puntos ficticios). Para evaluarlos se emplea la condición de contorno (2.6) discretizada, para los tiempos n y $(n+1) \Delta t$:

$$\frac{T_{i+1}^n - T_{i-1}^n}{2\Delta x} = 0 \quad (2.29)$$

$$\frac{T_{i+1}^{n+1} - T_{i-1}^{n+1}}{2\Delta x} = 0 \quad (2.30)$$

A partir de estas expresiones, se establecen las siguientes igualdades:

$$T_{i-1}^{n,f} = T_{i+1}^n \quad (2.31)$$

$$T_{i-1}^{n+1,f} = T_{i+1}^{n+1} \quad (2.32)$$

Las relaciones (2.31) y (2.32) se conocen también como condiciones de simetría. Si estas ecuaciones se reemplazan en la ecuación (2.28) se obtiene la ecuación para el cálculo de la temperatura del centro:

$$\begin{aligned}
 & T_0^{n+1} \left(\frac{\rho_0^n C p_0^n}{\Delta t} + \frac{(GI+1)k_0^n}{\Delta x^2} \right) + T_1^{n+1} \left(\frac{-(GI+1)k_0^n}{\Delta x^2} \right) = \\
 & = T_1^n \left(\frac{(GI+1)k_0^n}{\Delta x^2} \right) + T_0^n \left(\frac{\rho_0^n C p_0^n}{\Delta t} - \frac{(GI+1)k_0^n}{\Delta x^2} \right) \quad (2.33)
 \end{aligned}$$

Analizando la ecuación general para el cálculo de las temperaturas, en la superficie del alimento ($i = b$), se presentan dos puntos ficticios ($i+1,n$) y ($i+1,n+1$). Para evaluarlos, se emplea la condición de contorno (2.7) discretizada:

$$-k_i^n \left(\frac{T_{i+1}^n - T_{i-1}^n}{2\Delta x} \right) = h(T_i^n - T_a) + L_{vap} k'_m (C_{wi}^n - C_{equi}) \quad (2.34)$$

$$-k_i^n \left(\frac{T_{i+1}^{n+1} - T_{i-1}^{n+1}}{2\Delta x} \right) = h(T_i^{n+1} - T_a) + L_{vap} k'_m (C_{wi}^{n+1} - C_{equi}) \quad (2.35)$$

Entonces, para el borde valen las siguientes relaciones:

$$T_{i+1}^{n,f} = T_{i-1}^n - \frac{2\Delta x}{k_i^n} h T_i^n + \frac{2\Delta x}{k_i^n} h T_a - \frac{2\Delta x}{k_i^n} L_{vap} k'_m (C_{wi}^n - C_{equi}) \quad (2.36)$$

$$T_{i+1}^{n+1,f} = T_{i-1}^{n+1} - \frac{2\Delta x}{k_i^n} h T_i^{n+1} + \frac{2\Delta x}{k_i^n} h T_a - \frac{2\Delta x}{k_i^n} L_{vap} k'_m (C_{wi}^{n+1} - C_{equi}) \quad (2.37)$$

Reemplazando las ecuaciones (2.36) y (2.37) en la ecuación general (2.25) se obtiene la ecuación para la predicción de la temperatura superficial del alimento:

$$\begin{aligned} & T_i^{n+1} \left(\frac{\rho_i^n C_{pi}^n}{\Delta t} + \frac{k_i^n}{\Delta x^2} + \frac{2h\Delta x}{k_i^n} \left(\frac{k_i^n}{2\Delta x^2} + \frac{k_{i+1}^n - k_{i-1}^n}{8\Delta x^2} + \frac{GI k_i^n}{4\Delta x^2(i-1)} \right) \right) + \\ & + T_{i-1}^{n+1} \left(\frac{-k_i^n}{\Delta x^2} \right) = T_i^n \left(\frac{\rho_i^n C_{pi}^n}{\Delta t} - \frac{k_i^n}{\Delta x^2} + \frac{2h\Delta x}{k_i^n} \left(-\frac{k_i^n}{2\Delta x^2} - \frac{k_{i+1}^n - k_{i-1}^n}{8\Delta x^2} - \frac{GI k_i^n}{4\Delta x^2(i-1)} \right) \right) + \\ & + T_{i-1}^n \left(\frac{k_i^n}{\Delta x^2} \right) + \frac{2h\Delta x T_a}{k_i^n} \left(\frac{k_i^n}{\Delta x^2} + \frac{k_{i+1}^n - k_{i-1}^n}{4\Delta x^2} + \frac{GI k_i^n}{2\Delta x^2(i-1)} \right) + \\ & + (2C_{equi} - (C_{wi}^{n+1} + C_{wi}^n)) \frac{2L_{vap}\Delta x k'_m}{k_i^n} \left(\frac{k_i^n}{2\Delta x^2} + \frac{k_{i+1}^n - k_{i-1}^n}{8\Delta x^2} + \frac{GI k_i^n}{4\Delta x^2(i-1)} \right) \end{aligned} \quad (2.38)$$

Con el empleo de las ecuaciones (2.33), (2.25) y (2.38) se calculan las temperaturas del centro, internas y de la superficie del alimento durante la refrigeración.

Para obtener los valores de concentración de humedad en el interior del producto, se procede en forma similar a lo realizado con el balance de energía. La ecuación general se obtiene reemplazando las ecuaciones de cocientes incrementales (2.21), (2.22), (2.23) y (2.24) en el balance microscópico (2.4). La ecuación general resultante es la siguiente:

$$\begin{aligned}
 & C_{w_{i+1}}^{n+1} \left(\frac{-D_{w_i}^n}{2\Delta x^2} - \frac{(D_{w_{i+1}}^n - D_{w_{i-1}}^n)}{8\Delta x^2} - \frac{GI D_{w_i}^n}{4\Delta x^2(i-1)} \right) + C_{w_i}^{n+1} \left(\frac{1}{\Delta t} + \frac{D_{w_i}^n}{\Delta x^2} \right) + \\
 & + C_{w_{i-1}}^{n+1} \left(\frac{-D_{w_i}^n}{2\Delta x^2} + \frac{(D_{w_{i+1}}^n - D_{w_{i-1}}^n)}{8\Delta x^2} + \frac{GI D_{w_i}^n}{4\Delta x^2(i-1)} \right) = \\
 & C_{w_{i+1}}^n \left(\frac{D_{w_i}^n}{2\Delta x^2} + \frac{(D_{w_{i+1}}^n - D_{w_{i-1}}^n)}{8\Delta x^2} + \frac{GI D_{w_i}^n}{4\Delta x^2(i-1)} \right) + C_{w_i}^n \left(\frac{1}{\Delta t} - \frac{D_{w_i}^n}{\Delta x^2} \right) + \\
 & + C_{w_{i-1}}^n \left(\frac{D_{w_i}^n}{2\Delta x^2} - \frac{(D_{w_{i+1}}^n - D_{w_{i-1}}^n)}{8\Delta x^2} - \frac{GI D_{w_i}^n}{4\Delta x^2(i-1)} \right)
 \end{aligned} \tag{2.39}$$

Esta ecuación es válida para $0 < i < b$.

Esta expresión no siempre es válida para el centro, pues el balance microscópico de materia se hace indeterminado en el caso particular de esferas y cilindros. En forma análoga a lo realizado con el balance de energía, se procede a la obtención de un balance microscópico modificado que resulta de la aplicación de la Regla de L'Hôpital al término que presenta la discontinuidad (ecuación 2.26). Luego, se reemplazan de los cocientes incrementales (2.21), (2.22), (2.23) y (2.24) en el balance modificado y la ecuación resultante presenta dos puntos ficticios $(i-1,n)$ y $(i-1,n+1)$ que se evalúan con la condición de contorno (2.9) discretizada. Como resultado, se obtiene la siguiente expresión para el cálculo de la concentración de humedad en el centro del alimento:

$$\begin{aligned}
 & C_{w_0}^{n+1} \left(\frac{1}{\Delta t} + \frac{(GI+1)D_{w_0}^n}{\Delta x^2} \right) + C_{w_1}^{n+1} \left(\frac{-(GI+1)D_{w_0}^n}{\Delta x^2} \right) = \\
 & = C_{w_1}^n \left(\frac{(GI+1)D_{w_0}^n}{\Delta x^2} \right) + C_{w_0}^n \left(\frac{1}{\Delta t} - \frac{(GI+1)D_{w_0}^n}{\Delta x^2} \right)
 \end{aligned} \tag{2.40}$$

En la superficie del producto, la ecuación general (2.39) presenta dos puntos ficticios $(i+1,n)$ y $(i+1,n+1)$ que se evalúan con la condición de contorno (2.10) discretizada:

$$-D_{w_i}^n \left(\frac{C_{w_{i+1}}^n - C_{w_{i-1}}^n}{2\Delta x} \right) = k'_m (C_{w_i}^n - C_{equi}) \quad (2.41)$$

$$-D_{w_i}^n \left(\frac{C_{w_{i+1}}^{n+1} - C_{w_{i-1}}^{n+1}}{2\Delta x} \right) = k'_m (C_{w_i}^{n+1} - C_{equi}) \quad (2.42)$$

A partir de estas expresiones se pueden evaluar concentraciones en los tiempos n y $(n+1) \Delta t$:

$$C_{w_{i+1}}^{n,f} = C_{w_{i-1}}^n - \frac{2\Delta x k'_m}{D_{w_i}^n} C_{w_i}^n + \frac{2\Delta x k'_m}{D_{w_i}^n} C_{equi} \quad (2.43)$$

$$C_{w_{i+1}}^{n+1,f} = C_{w_{i-1}}^{n+1} - \frac{2\Delta x k'_m}{D_{w_i}^n} C_{w_i}^{n+1} + \frac{2\Delta x k'_m}{D_{w_i}^n} C_{equi} \quad (2.44)$$

Reemplazando las ecuaciones (2.43) y (2.44) en la ecuación general (2.39) se obtiene la ecuación para el cálculo de la concentración de humedad superficial:

$$\begin{aligned} & C_{w_i}^{n+1} \left(\frac{1}{\Delta t} + \frac{D_{w_i}^n}{\Delta x^2} + \frac{2k'_m \Delta x}{D_{w_i}^n} \left(\frac{D_{w_i}^n}{2\Delta x^2} + \frac{(D_{w_{i+1}}^n - D_{w_{i-1}}^n)}{8\Delta x^2} + \frac{GI D_{w_i}^n}{4\Delta x^2(i-1)} \right) \right) + C_{w_{i-1}}^{n+1} \left(\frac{-D_{w_i}^n}{\Delta x^2} \right) = \\ & = C_{w_i}^n \left(\frac{1}{\Delta t} - \frac{D_{w_i}^n}{\Delta x^2} - \frac{2k'_m \Delta x}{D_{w_i}^n} \left(\frac{D_{w_i}^n}{2\Delta x^2} + \frac{(D_{w_{i+1}}^n - D_{w_{i-1}}^n)}{8\Delta x^2} + \frac{GI D_{w_i}^n}{4\Delta x^2(i-1)} \right) \right) + C_{w_{i-1}}^n \left(\frac{D_{w_i}^n}{\Delta x^2} \right) + \\ & + \frac{4C_{equi} k'_m \Delta x}{D_{w_i}^n} \left(\frac{D_{w_i}^n}{2\Delta x^2} + \frac{(D_{w_{i+1}}^n - D_{w_{i-1}}^n)}{8\Delta x^2} + \frac{GI D_{w_i}^n}{4\Delta x^2(i-1)} \right) \end{aligned} \quad (2.45)$$

Las ecuaciones (2.40), (2.39) y (2.45) permiten el cálculo de las concentraciones de humedad en el centro, interior y superficie del alimento durante la refrigeración.

2.2.2 ETAPA 2

De acuerdo a la descripción realizada del sistema (Figura 2.1), durante el desarrollo de esta etapa se deben considerar tres zonas distintas y los balances microscópicos correspondientes a cada una de ellas. Para las zonas fresca y congelada la ecuación general para el cálculo de las temperaturas en los nodos correspondientes al intervalo $0 < i \leq m-2$ es equivalente a la ecuación general obtenida en la etapa de refrigeración (ecuación 2.25). En esta ecuación se debe tener en cuenta que tanto el empleo del calor específico aparente y de las propiedades dependientes de la temperatura, permiten distinguir perfectamente el cambio entre la zona fresca y la zona congelada.

En forma similar, la ecuación para la predicción de la temperatura del centro es equivalente a la ecuación obtenida en la Etapa 1 (ecuación 2.33)

Es importante señalar que para los cálculos de las temperaturas del centro y de las internas hasta el punto (m-2), el espaciado en la grilla es constante y corresponde a Δx . A partir del punto (m-1), la malla se deforma con el fin de acompañar el movimiento del frente de sublimación que avanza hacia la zona congelada. De esta forma se incorpora a la grilla un incremento Δx_2 , cuyo tamaño original es Δx y disminuye a medida que crece la capa deshidratada. Así, el punto (m-1) constituye el límite entre la grilla original fija y la grilla móvil, ubicada desde este punto hasta el borde del producto. Los cambios de grillas en esta posición se corresponden con un cambio en el espaciado, por lo tanto no se pueden emplear los cocientes incrementales implementados en la Etapa 1, ni las ecuaciones de cálculo obtenidas. Entonces se plantean nuevamente las ecuaciones a diferencias espaciales teniendo en cuenta el cambio de paso:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{T_{i+1}^{n+1} - T_{i-1}^{n+1} + T_{i+1}^n - T_{i-1}^n}{2(\Delta x + \Delta x_2)} \quad (2.46)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{2}{(\Delta x^2 + \Delta x_2^2)} \left(\frac{(T_{i+1}^{n+1} + T_{i+1}^n)\Delta x}{(\Delta x + \Delta x_2)} + \frac{(T_{i-1}^{n+1} + T_{i-1}^n)\Delta x_2}{(\Delta x + \Delta x_2)} - T_i^{n+1} - T_i^n \right) \quad (2.47)$$

$$\frac{\partial V}{\partial x} = \frac{V_{i+1}^n - V_{i-1}^n}{(\Delta x + \Delta x_2)} \quad (2.48)$$

Reemplazando las ecuaciones (2.46), (2.47) y (2.48) en el balance microscópico de energía (2.11), se obtiene la ecuación de cálculo de la temperatura en el nodo $i = m-1$:

$$\begin{aligned} & T_{i+1}^{n+1} \left(-\frac{2\Delta x k_i^n}{(\Delta x + \Delta x_2)(\Delta x^2 + \Delta x_2^2)} - \frac{k_{i+1}^n - k_{i-1}^n}{2(\Delta x + \Delta x_2)^2} - \frac{GI k_i^n}{2\Delta x(\Delta x + \Delta x_2)(i-1)} \right) + \\ & + T_i^{n+1} \left(\frac{\rho_i^n C p_i^n}{\Delta t} + \frac{2k_i^n}{\Delta x^2 + \Delta x_2^2} \right) + T_{i-1}^{n+1} \left(\frac{-2\Delta x_2 k_i^n}{(\Delta x + \Delta x_2)(\Delta x^2 + \Delta x_2^2)} + \right. \\ & \left. + \frac{k_{i+1}^n - k_{i-1}^n}{2(\Delta x + \Delta x_2)^2} + \frac{GI k_i^n}{2\Delta x(\Delta x + \Delta x_2)(i-1)} \right) = T_{i+1}^n \left(\frac{2\Delta x k_i^n}{(\Delta x + \Delta x_2)(\Delta x^2 + \Delta x_2^2)} + \right. \\ & \left. + \frac{k_{i+1}^n - k_{i-1}^n}{2(\Delta x + \Delta x_2)^2} + \frac{GI k_i^n}{2\Delta x(\Delta x + \Delta x_2)(i-1)} \right) + T_i^n \left(\frac{\rho_i^n C p_i^n}{\Delta t} - \frac{2k_i^n}{\Delta x^2 + \Delta x_2^2} \right) + \\ & + T_{i-1}^n \left(\frac{2\Delta x_2 k_i^n}{(\Delta x + \Delta x_2)(\Delta x^2 + \Delta x_2^2)} - \frac{k_{i+1}^n - k_{i-1}^n}{2(\Delta x + \Delta x_2)^2} - \frac{GI k_i^n}{2\Delta x(\Delta x + \Delta x_2)(i-1)} \right) \end{aligned} \quad (2.49)$$

Para la predicción de la temperatura en el frente de sublimación, ($i = m$), se debe tener en cuenta que existe un cambio de espaciado y un cambio de estado, el paso de la zona congelada a la zona deshidratada. Esta situación no puede resolverse solamente con la aplicación de cocientes incrementales en función de los incrementos Δx_2 y Δx_4 , como se procedió en el nodo ($m-1$), pues en ese caso sólo cambiaba el espaciado pero permanecía dentro de la zona congelada. Entonces, para encontrar una expresión para el cálculo de la temperatura en este nodo, se plantea una ecuación general equivalente a la ecuación (2.25) con un incremento Δx_2 . Para incorporar el cambio de paso y el cambio de zona, se emplea la condición de contorno (2.15) discretizada:

$$-k_i^n \left(\frac{T_{i+1}^n - T_i^n}{\Delta x_2} \right) = L_s m_s^n \frac{\Delta x_1^n}{\Delta t} - k_{di}^n \left(\frac{T_{i+1}^n - T_i^n}{\Delta x_4} \right) \quad (2.50)$$

$$-k_i^n \left(\frac{T_{i+1}^{n+1} - T_i^{n+1}}{\Delta x_2} \right) = L_s m_s^n \frac{\Delta x_1^n}{\Delta t} - k_{di}^n \left(\frac{T_{i+1}^{n+1} - T_i^{n+1}}{\Delta x_4} \right) \quad (2.51)$$

Cabe señalar que las temperaturas en los puntos (i+1,n) y (i+1,n+1) son reales dentro de la capa deshidratada, pero son ficticias para la zona congelada pues se escapan del dominio. Entonces, despejando de ambas expresiones los puntos ficticios, se obtienen las siguientes relaciones:

$$T_{i+1}^{n,f} = T_i^n - \frac{\Delta x_2}{k_i^n} L_s m_s^n \frac{\Delta x_1^n}{\Delta t} + \frac{\Delta x_2}{k_i^n} \frac{k_{di}^n}{\Delta x_4} (T_{i+1}^n - T_i^n) \quad (2.52)$$

$$T_{i+1}^{n+1,f} = T_i^{n+1} - \frac{\Delta x_2}{k_i^n} L_s m_s^n \frac{\Delta x_1^n}{\Delta t} + \frac{\Delta x_2}{k_i^n} \frac{k_{di}^n}{\Delta x_4} (T_{i+1}^{n+1} - T_i^{n+1}) \quad (2.53)$$

Como se puede observar en ambas expresiones, la temperatura ficticia se calcula en función del movimiento del frente de sublimación (Δx_1) calculado en el tiempo anterior y del gradiente de temperaturas reales en la capa deshidratada.

Si se reemplazan las ecuaciones (2.52) y (2.53) en la ecuación general, se obtiene para el frente de sublimación la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} & T_{i+1}^{n+1} \left(-\frac{k_i^n}{2\Delta x_2^2} - \frac{k_{i+1}^n - k_{i-1}^n}{8\Delta x_2^2} - \frac{GI k_i^n}{4\Delta x_2^2(i-1)} \right) \frac{\Delta x_2 k_{di}^n}{\Delta x_4 k_i^n} + T_{i-1}^{n+1} \left(-\frac{k_i^n}{2\Delta x_2^2} + \frac{k_{i+1}^n - k_{i-1}^n}{8\Delta x_2^2} + \frac{GI k_i^n}{4\Delta x_2^2(i-1)} \right) + \\ & T_i^{n+1} \left(\frac{\rho_i^n C_{Pi}^n}{\Delta t} + \frac{k_i^n}{\Delta x_2^2} + \left(1 - \frac{\Delta x_2 k_{di}^n}{\Delta x_4 k_i^n} \right) \left(-\frac{k_i^n}{2\Delta x_2^2} - \frac{k_{i+1}^n - k_{i-1}^n}{8\Delta x_2^2} - \frac{GI k_i^n}{4\Delta x_2^2(i-1)} \right) \right) = \\ & = T_{i+1}^n \left(\frac{k_i^n}{2\Delta x_2^2} + \frac{k_{i+1}^n - k_{i-1}^n}{8\Delta x_2^2} + \frac{GI k_i^n}{4\Delta x_2^2(i-1)} \right) \frac{\Delta x_2 k_{di}^n}{\Delta x_4 k_i^n} + T_{i-1}^n \left(\frac{k_i^n}{2\Delta x_2^2} - \frac{k_{i+1}^n - k_{i-1}^n}{8\Delta x_2^2} - \frac{GI k_i^n}{4\Delta x_2^2(i-1)} \right) + \quad (2.54) \\ & + T_i^{n+1} \left(\frac{\rho_i^n C_{Pi}^n}{\Delta t} - \frac{k_i^n}{\Delta x_2^2} + \left(1 - \frac{\Delta x_2 k_{di}^n}{\Delta x_4 k_i^n} \right) \left(\frac{k_i^n}{2\Delta x_2^2} + \frac{k_{i+1}^n - k_{i-1}^n}{8\Delta x_2^2} + \frac{GI k_i^n}{4\Delta x_2^2(i-1)} \right) \right) + \\ & + \frac{L_s m_s^n \Delta x_1^n \Delta x_2}{\Delta t k_i^n} \left(-\frac{k_i^n}{\Delta x_2^2} - \frac{k_{i+1}^n - k_{i-1}^n}{4\Delta x_2^2} - \frac{GI k_i^n}{2\Delta x_2^2(i-1)} \right) \end{aligned}$$

Para resolver el balance de energía en la zona deshidratada (2.13), se deben reemplazar las derivadas parciales por los cocientes incrementales (2.21), (2.22), (2.23) y (2.24). La ecuación general para los puntos intermedios ($m < i < b$) es:

$$\begin{aligned}
 & T_{i+1}^{n+1} \left(-\frac{k_{d_i}^n}{2\Delta x_4^2} - \frac{k_{d_{i+1}}^n - k_{d_{i-1}}^n}{8\Delta x_4^2} - \frac{GI k_{d_i}^n}{4(i-1)\Delta x_4^2} \right) + T_i^{n+1} \left(\frac{\rho_{d_i}^n C_{p_{d_i}}^n}{\Delta t} + \frac{k_{d_i}^n}{\Delta x_4^2} \right) + \\
 & + T_{i-1}^{n+1} \left(\frac{-k_{d_i}^n}{2\Delta x_4^2} + \frac{k_{d_{i+1}}^n - k_{d_{i-1}}^n}{8\Delta x_4^2} + \frac{GI k_{d_i}^n}{4(i-1)\Delta x_4^2} \right) = T_{i+1}^n \left(\frac{k_{d_i}^n}{2\Delta x_4^2} + \frac{k_{d_{i+1}}^n - k_{d_{i-1}}^n}{8\Delta x_4^2} + \frac{GI k_{d_i}^n}{4(i-1)\Delta x_4^2} \right) + (2.55) \\
 & + T_i^n \left(\frac{\rho_{d_i}^n C_{p_{d_i}}^n}{\Delta t} - \frac{k_{d_i}^n}{\Delta x_4^2} \right) + T_{i-1}^n \left(\frac{k_{d_i}^n}{2\Delta x_4^2} - \frac{k_{d_{i+1}}^n - k_{d_{i-1}}^n}{8\Delta x_4^2} - \frac{GI k_{d_i}^n}{4(i-1)\Delta x_4^2} \right)
 \end{aligned}$$

En el borde del alimento ($i = b$), se presentan dos puntos ficticios ($i+1,n$) y ($i+1,n+1$) que son evaluados a través de la condición de contorno (2.16):

$$-k_{d_i}^n \left(\frac{T_{i+1}^n - T_{i-1}^n}{2\Delta x_4} \right) = h(T_i^n - T_a) \quad (2.56)$$

$$-k_{d_i}^n \left(\frac{T_{i+1}^{n+1} - T_{i-1}^{n+1}}{2\Delta x_4} \right) = h(T_i^{n+1} - T_a) \quad (2.57)$$

Entonces, en este nodo valen las siguientes relaciones:

$$T_{i+1}^{n,f} = T_{i-1}^n - \frac{2\Delta x_4}{k_{d_i}^n} h T_i^n + \frac{2\Delta x_4}{k_{d_i}^n} h T_a \quad (2.58)$$

$$T_{i+1}^{n+1,f} = T_{i-1}^{n+1} - \frac{2\Delta x_4}{k_{d_i}^n} h T_i^{n+1} + \frac{2\Delta x_4}{k_{d_i}^n} h T_a \quad (2.59)$$

Reemplazando las ecuaciones (2.58) y (2.59) en la ecuación (2.55), se obtiene la expresión para el cálculo de la temperatura de la superficie del producto:

$$\begin{aligned}
 & T_i^{n+1} \left(\frac{\rho_{d_i}^n C_{p_{d_i}}^n}{\Delta t} + \frac{k_{d_i}^n}{\Delta x_4^2} + \frac{2h\Delta x_4}{k_{d_i}^n} \left(\frac{k_{d_i}^n}{2\Delta x_4^2} + \frac{k_{d_{i+1}}^n - k_{d_{i-1}}^n}{8\Delta x_4^2} + \frac{GI k_{d_i}^n}{4\Delta x_4^2(i-1)} \right) \right) + \\
 & + T_{i-1}^{n+1} \left(\frac{-k_{d_i}^n}{\Delta x_4^2} \right) = T_i^n \left(\frac{\rho_{d_i}^n C_{p_{d_i}}^n}{\Delta t} - \frac{k_{d_i}^n}{\Delta x_4^2} + \frac{2h\Delta x_4}{k_{d_i}^n} \left(-\frac{k_{d_i}^n}{2\Delta x_4^2} - \frac{k_{d_{i+1}}^n - k_{d_{i-1}}^n}{8\Delta x_4^2} - \frac{GI k_{d_i}^n}{4\Delta x_4^2(i-1)} \right) \right) + (2.60) \\
 & + T_{i-1}^n \left(\frac{k_{d_i}^n}{\Delta x_4^2} \right) + \frac{2h\Delta x_4 T_a}{k_{d_i}^n} \left(\frac{k_{d_i}^n}{\Delta x_4^2} + \frac{k_{d_{i+1}}^n - k_{d_{i-1}}^n}{4\Delta x_4^2} + \frac{GI k_{d_i}^n}{2\Delta x_4^2(i-1)} \right)
 \end{aligned}$$

De esta forma, durante esta etapa, las ecuaciones (2.33), (2.25), (2.49) y (2.54) permiten la evaluación de las temperaturas del centro, internas dentro de las zonas fresca y congelada, del punto (m-1) y del frente de sublimación; mientras que las expresiones (2.55) y (2.60) corresponden a las temperaturas internas dentro de la capa deshidratada y de la superficie del alimento.

Durante esta etapa, no se calcula el perfil de concentración en las zonas fresca y congelada, sólo se computa la fracción de hielo en la zona congelada en función de la temperatura.

Para la resolución del balance de materia dentro de la zona deshidratada, se comienza por el frente de sublimación, donde se supone una condición de equilibrio hielo-vapor. De esta forma y con el empleo de la condición de contorno (2.18) resulta:

$$C_{va_m}^{n+1} = \frac{P_{sat}(T_m^{n+1})}{R_g T_m^{n+1}} \quad (2.61)$$

Para obtener la ecuación de cálculo de presiones de vapor en los nodos $m < i < b$, se reemplazan las ecuaciones de cocientes de incrementos (2.21), (2.22), (2.23), y (2.24) en el balance microscópico (2.17):

$$\begin{aligned}
 & C_{v_{ai+1}}^{n+1} \left(\frac{-D_{efi}^n}{2\epsilon\Delta x_4^2} - \frac{(D_{efi+1}^n - D_{efi-1}^n)}{8\epsilon\Delta x_4^2} - \frac{GI D_{efi}^n}{4\epsilon\Delta x_4^2(i-1)} \right) + C_{v_{ai}}^{n+1} \left(\frac{1}{\Delta t} + \frac{D_{efi}^n}{\epsilon\Delta x_4^2} \right) + \\
 & + C_{v_{ai-1}}^{n+1} \left(\frac{-D_{efi}^n}{2\epsilon\Delta x_4^2} + \frac{(D_{efi+1}^n - D_{efi-1}^n)}{8\epsilon\Delta x_4^2} + \frac{GI D_{efi}^n}{4\epsilon\Delta x_4^2(i-1)} \right) = \\
 & C_{v_{ai+1}}^n \left(\frac{D_{efi}^n}{2\epsilon\Delta x_4^2} + \frac{(D_{efi+1}^n - D_{efi-1}^n)}{8\epsilon\Delta x_4^2} + \frac{GI D_{efi}^n}{4\epsilon\Delta x_4^2(i-1)} \right) + C_{v_{ai}}^n \left(\frac{1}{\Delta t} - \frac{D_{efi}^n}{\epsilon\Delta x_4^2} \right) + \\
 & + C_{v_{ai-1}}^n \left(\frac{D_{efi}^n}{2\epsilon\Delta x_4^2} - \frac{(D_{efi+1}^n - D_{efi-1}^n)}{8\epsilon\Delta x_4^2} - \frac{GI D_{efi}^n}{4\epsilon\Delta x_4^2(i-1)} \right)
 \end{aligned} \tag{2.62}$$

Nuevamente, en el borde del alimento aparecen dos puntos ficticios (i+1,n) y (i+1,n+1) que se evalúan a través de la condición de contorno (2.19) discretizada:

$$-D_{efi}^n \left(\frac{C_{v_{ai+1}}^n - C_{v_{ai-1}}^n}{2\Delta x_4} \right) = k_m (C_{v_{ai}}^n - C_a) \tag{2.63}$$

$$-D_{efi}^n \left(\frac{C_{v_{ai+1}}^{n+1} - C_{v_{ai-1}}^{n+1}}{2\Delta x_4} \right) = k_m (C_{v_{ai}}^{n+1} - C_a) \tag{2.64}$$

Despejando de las expresiones las concentraciones al tiempo n y (n+1) Δt, se obtienen las siguientes igualdades:

$$C_{v_{ai+1}}^{n,f} = C_{v_{ai-1}}^n - \frac{2\Delta x_4 k_m}{D_{efi}^n} C_{v_{ai}}^n + \frac{2\Delta x_4 k_m}{D_{efi}^n} C_a \tag{2.65}$$

$$C_{v_{ai+1}}^{n+1,f} = C_{v_{ai-1}}^{n+1} - \frac{2\Delta x_4 k_m}{D_{efi}^n} C_{v_{ai}}^{n+1} + \frac{2\Delta x_4 k_m}{D_{efi}^n} C_a \tag{2.66}$$

Reemplazando las ecuaciones (2.65) y (2.66) en la ecuación general (2.62), se obtiene la ecuación para el cálculo de la concentración de vapor en la superficie del producto:

$$\begin{aligned}
 & C_{vai}^{n+1} \left(\frac{1}{\Delta t} + \frac{D_{efi}^n}{\epsilon \Delta x_4^2} + \frac{2k_m \Delta x_4}{D_{efi}^n} \left(\frac{D_{efi}^n}{2\epsilon \Delta x_4^2} + \frac{(D_{efi+1}^n - D_{efi-1}^n)}{8\epsilon \Delta x_4^2} + \frac{GI D_{efi}^n}{4\epsilon \Delta x_4^2 (i-1)} \right) \right) + C_{vai-1}^{n+1} \left(\frac{-D_{efi}^n}{\epsilon \Delta x_4^2} \right) = \\
 & = C_{vai}^n \left(\frac{1}{\Delta t} - \frac{D_{efi}^n}{\epsilon \Delta x_4^2} - \frac{2k_m \Delta x_4}{D_{efi}^n} \left(\frac{D_{efi}^n}{2\epsilon \Delta x_4^2} + \frac{(D_{efi+1}^n - D_{efi-1}^n)}{8\epsilon \Delta x_4^2} + \frac{GI D_{efi}^n}{4\epsilon \Delta x_4^2 (i-1)} \right) \right) + C_{vai-1}^n \left(\frac{D_{efi}^n}{\epsilon \Delta x_4^2} \right) + \quad (2.67) \\
 & + \frac{4C_a k_m \Delta x_4}{D_{efi}^n} \left(\frac{D_{efi}^n}{2\epsilon \Delta x_4^2} + \frac{(D_{efi+1}^n - D_{efi-1}^n)}{8\epsilon \Delta x_4^2} + \frac{GI D_{efi}^n}{4\epsilon \Delta x_4^2 (i-1)} \right)
 \end{aligned}$$

Por último, para calcular la nueva posición del frente de sublimación se emplea la ecuación (2.20) discretizada:

$$-\frac{m_{si}^n (x_1^{n+1} - x_1^n)}{M \Delta t} = -D_{efi}^n \left(\frac{C_{vam+1}^{n+1} - C_{vam}^{n+1}}{\Delta x_4} \right) \Rightarrow x_1^{n+1} = x_1^n + \frac{M D_{efi}^n (C_{vam+1}^{n+1} - C_{vam}^{n+1}) \Delta t}{m_{si}^n \Delta x_4} \quad (2.68)$$

El sistema completo de ecuaciones fue resuelto, para cada paso de tiempo, siguiendo un orden pre-establecido. Mientras que la superficie del alimento permanece a una temperatura mayor que la temperatura inicial de congelación, se emplean las ecuaciones de la Etapa 1. Para cada intervalo de tiempo se calculan las concentraciones y las temperaturas nodales. Cuando la superficie alcanza la temperatura de congelación, se emplean en los cálculos las ecuaciones de la Etapa 2. Para cada paso de tiempo se evalúan las temperaturas desde el centro hacia el borde. Se calculan en primer lugar las temperaturas de la zona fresca, luego se continúa por la zona congelada y finalmente se computan las temperaturas de la zona deshidratada. En la zona congelada se calcula la fracción de hielo en función de la temperatura y luego se procede al cálculo del perfil de concentraciones de vapor, desde el frente de sublimación hasta el borde del alimento.

Luego de predecir la nueva posición del frente de sublimación, el modelo evalúa el espesor de la capa deshidratada y la pérdida de peso.

Todos los sistemas de ecuaciones, temperaturas y concentraciones en las Etapas 1 y temperaturas y presiones de vapor de agua en la Etapa 2, son tridiagonales y para resolverlos se empleó el Algoritmo de Thomas (Allen y col., 1988).

La pérdida de peso en cada paso se evaluó en forma acumulativa a partir del flujo de materia instantáneo. La ecuación (2.69) corresponde a la pérdida de peso durante la primer etapa, mientras la ecuación (2.70) corresponde a la Etapa 2.

$$PP1 = \frac{k'_m A \Delta t (C_{wb}^n - C_{equi})}{\rho_{ini} Vol} \quad (2.69)$$

$$PP2 = \frac{k_m A \Delta t (C_{vab}^n - C_a)}{\rho_{ini} Vol} \quad (2.70)$$

La resolución numérica del modelo matemático aquí planteado fue implementada en Fortran 90 (Apéndice I). El diagrama de bloques siguiente resume simbólicamente la estructura del programa de cálculo (Figura 2.3).

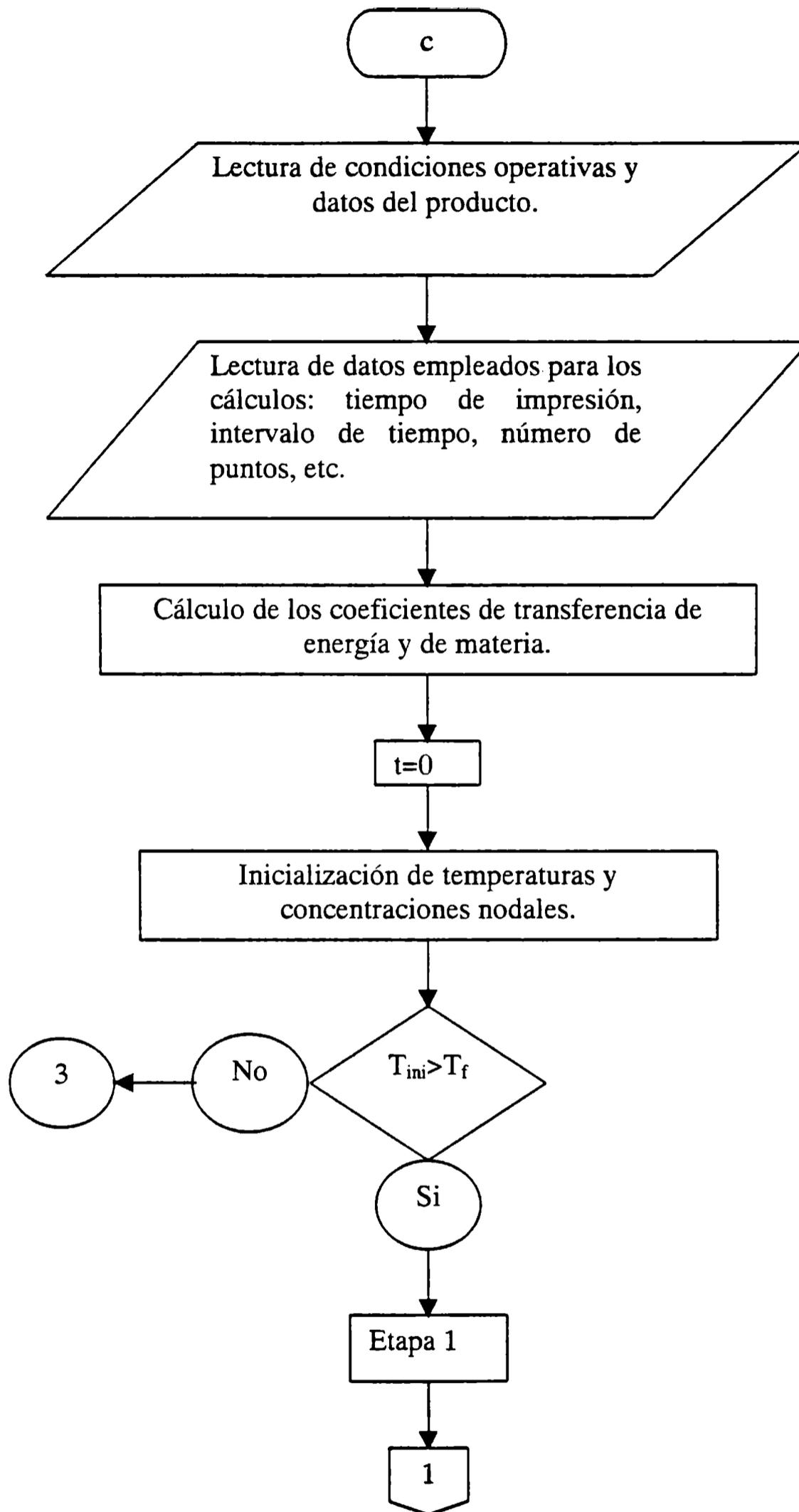


Figura 2.3: Cálculos básicos realizados por el programa de cálculo.

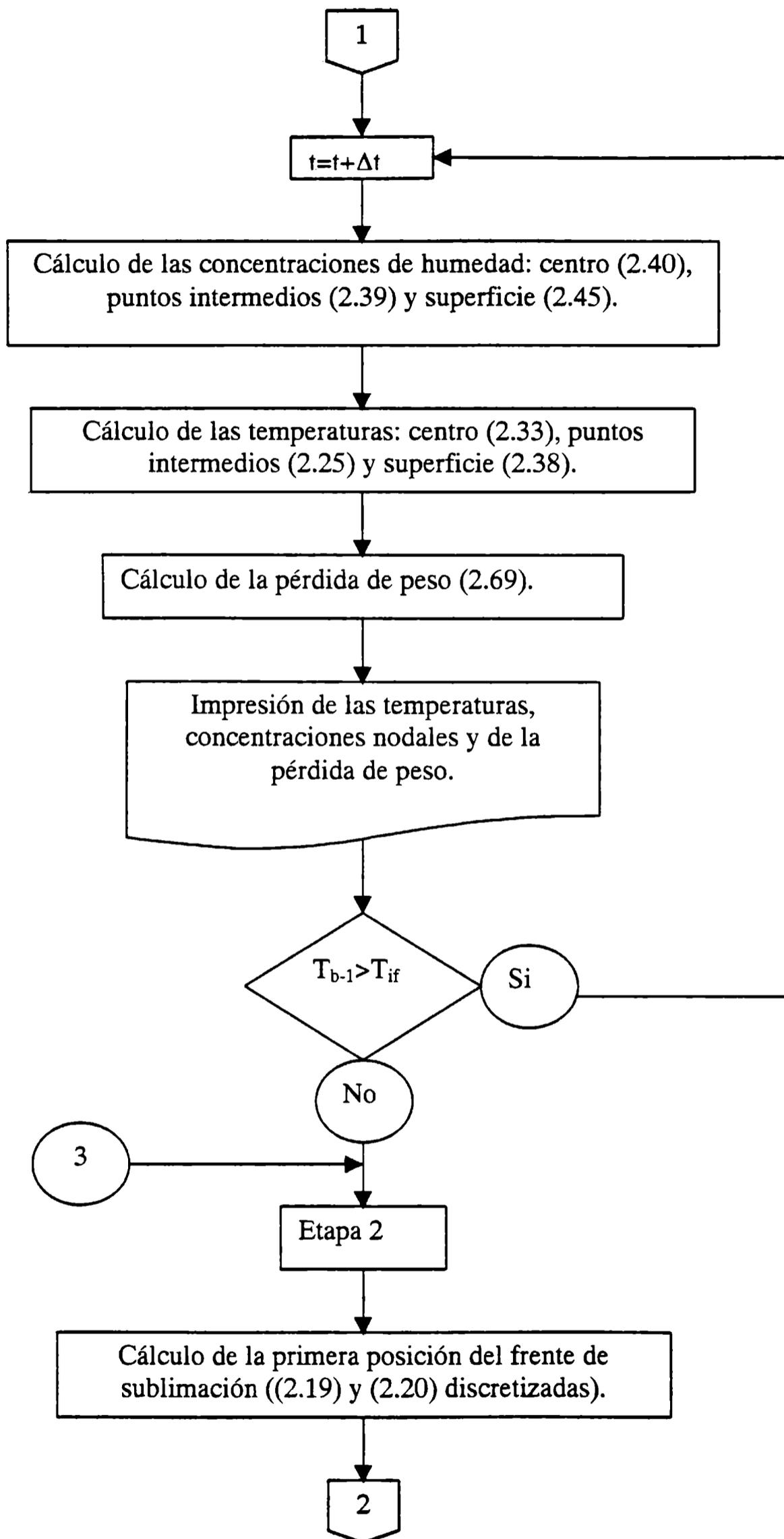


Figura 2.3: Cálculos básicos realizados por el programa de cálculo (continuación).

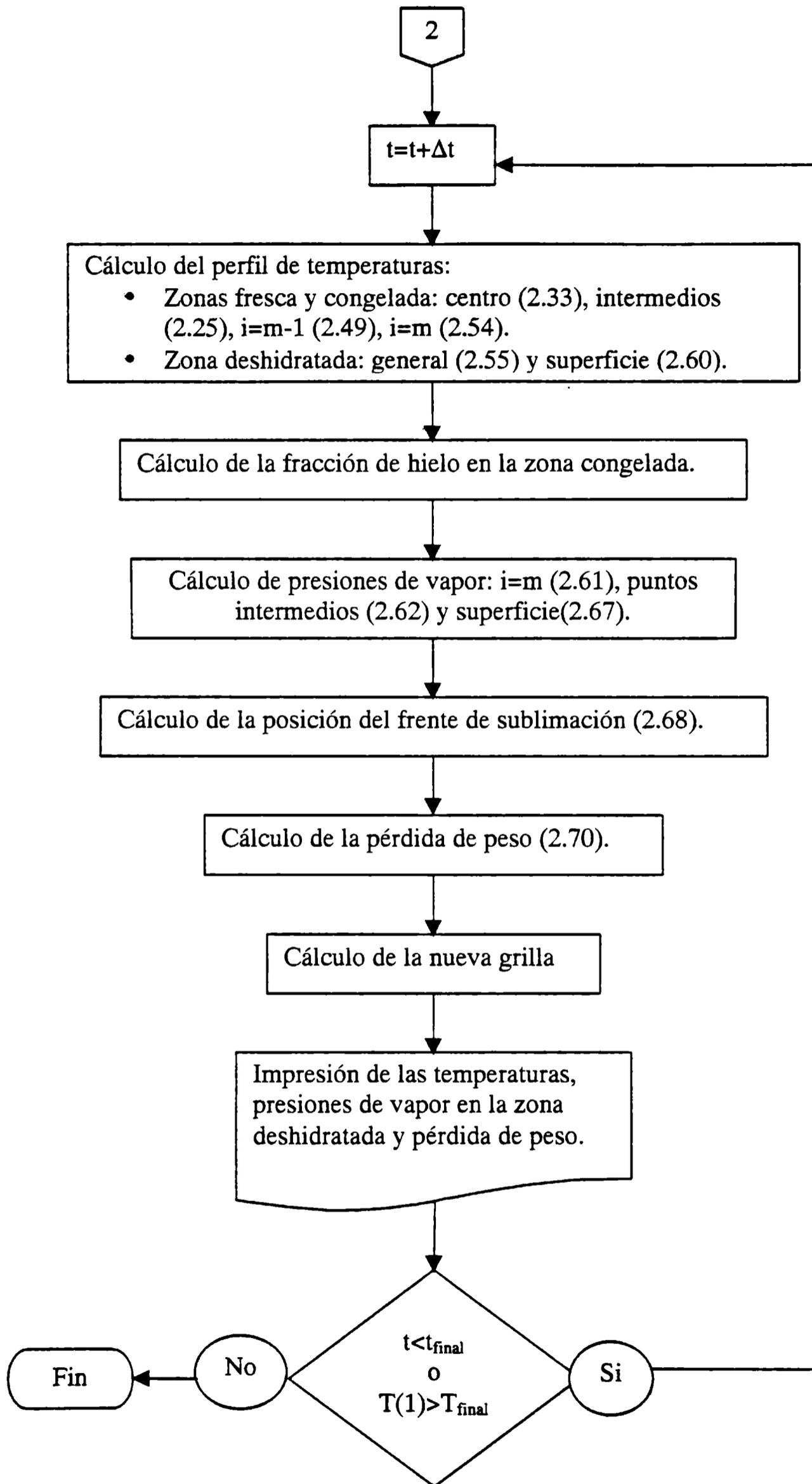


Figura 2.3: Cálculos básicos realizados por el programa de cálculo (continuación).

2.3 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD

Cuando se implementa un esquema numérico nuevo, la principal preocupación es la estabilidad. En caso de ser inestable, los resultados numéricos se comportan en forma errática y divergen con un comportamiento oscilatorio, tanto en el tiempo como en el espacio. Por esta razón se considera necesario realizar un análisis de estabilidad del método utilizado.

El método original que se eligió para resolver las ecuaciones diferenciales a derivadas parciales (EDP) fue el método de diferencias finitas de Crank Nicolson. Este método es un método implícito y es incondicionalmente estable (Forsythe y Wasow, 1960).

Para la Etapa 1, el esquema es Crank Nicolson puro, por lo tanto, no es necesario analizarlo.

En cambio, en la Etapa 2, como mostramos en el apartado anterior, aunque los cocientes de incrementos (ecuaciones (2.21), (2.22), (2.23) y (2.24)) corresponden al esquema implícito, realizamos algunas modificaciones en la resolución del balance de energía:

- Los cocientes incrementales implementados en el nodo $i=m-1$,
- La condición de borde en el punto $i=m$ incorporada en la ecuación del cálculo de la temperatura,
- El crecimiento del incremento Δx_4 y la disminución del incremento Δx_2 con el tiempo.

Cabe señalar, que el esquema empleado para la resolución del balance de materia en la zona deshidratada es el método de diferencias finitas de Crank Nicolson tradicional, incondicionalmente estable.

Para analizar la estabilidad de un esquema numérico existen tres métodos (Nakamura, 1992):

- Método de la función propia,
- Método del desarrollo de Fourier,
- Método matricial.

En todos estos métodos se toman en cuenta las ecuaciones a diferencias de la parte homogénea. Esto se debe a que si la solución numérica de la parte homogénea de la EDP crece sin límite, también lo hace la solución completa y el método, por consiguiente, es inestable.

El método de la función propia consiste en desarrollar en funciones propias la matriz que representa las ecuaciones a diferencias para cada intervalo de tiempo. En este enfoque, se

incorporan las condiciones de borde. Se determina el cambio de amplitud de cada función propia al avanzar el tiempo. Acotando la amplitud, se obtiene el criterio de estabilidad. Este método es útil si se conocen las funciones propias para el conjunto finito dado de ecuaciones en diferencias.

En el método del desarrollo de Fourier, se estudia la estabilidad del método en un dominio infinito, desarrollando la solución en una serie de Fourier. Este enfoque es muy usado. Las condiciones que debe cumplir la EDP para que se pueda aplicar el método son:

- La EDP debe ser lineal,
- El dominio de interés debe ser infinito,
- El espaciamiento de la retícula constante,
- Los coeficientes de la EDP constantes.

Debido a que nuestras ecuaciones diferenciales no cumplen estas condiciones no se puede aplicar este método.

Cuando no es posible escribir las funciones propias o aplicar el método de Fourier, el único camino es encontrar y analizar los valores propios de la matriz que representa al conjunto de ecuaciones a diferencias. Entonces, el método matricial es el elegido para el análisis.

2.3.1 MÉTODO MATRICIAL

Se plantea el sistema de ecuaciones a diferencias en forma matricial (Mitchell y Griffiths, 1980):

$$A_n U^{n+1} = B_n U^n + D^n \quad (2.71)$$

donde A_n es la matriz de coeficientes que multiplica a las temperaturas al tiempo $(n+1)\Delta t$ y B_n es la matriz de coeficientes que multiplica a las temperaturas al tiempo $n\Delta t$. Despejando:

$$U^{n+1} = C_n U^n + A_n^{-1} D^n \quad (2.72)$$

donde $C_n = A_n^{-1} B_n$, si $|A_n| \neq 0$.

El método matricial determina que para acotar el crecimiento del error en el cálculo de U^{n+1} , se debe cumplir necesariamente la siguiente condición:

$$\rho(C_n) \leq 1 \quad (2.73)$$

donde $\rho(C_n)$ es el radio espectral de la matriz C_n .

Considerando que el radio espectral de una matriz son sus autovalores en valor absoluto, la condición (2.73) se transforma en:

$$\lambda_i \leq 1 \quad (2.74)$$

para el valor de i correspondiente al mayor autovalor.

Este es el criterio que se emplea para evaluar la estabilidad del método numérico. El procedimiento consiste en encontrar los autovalores de la matriz C_n y verificar el cumplimiento de la condición (2.74). En principio, se debería disponer de una expresión general de esta matriz, situación bastante complicada considerando que en primer lugar se debe invertir la matriz A_n y luego multiplicarla por la matriz B_n , ambas con una estructura bastante compleja. Por lo tanto, se realizan algunas operaciones previas en la matriz C_n considerando la definición de la misma dada en la condición (2.72):

$$\rho(C_n) = \rho(A_n^{-1}B_n) \leq 1 \quad (2.75)$$

Teniendo en cuenta que se desea estudiar la estabilidad del esquema del cálculo de temperaturas durante la congelación y el almacenamiento congelado (Etapa 2), se puede definir una matriz de coeficientes Q_n (ecuación (2.76)), de tal forma que se puede considerar válida la siguiente relación:

$$C_n = A_n^{-1}B_n = (I + Q_n)^{-1}(I - Q_n) \quad (2.77)$$

donde I es la matriz identidad.

$$\begin{array}{ccccccc}
 (1+G1) G1 & -(1+G1) G1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 -\frac{G1}{2} + G2 + \frac{G1G1}{4(i-1)} & G1 & -\frac{G1}{2} - G2 - \frac{G1G1}{4(i-1)} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & -2\Delta x_2 & G5 & -2\Delta x G3 - G4 - G6 & 0 & 0 & 0 \\
 G3 + G4 + G6 & 0 & -\frac{G7}{2} + G8 + \frac{G1G7}{4(i-1)} & G7 + (1 - G9) \left(\frac{-G7}{2} - G8 - \frac{G1G7}{4(i-1)} \right) & G9 \left(\frac{-G7}{2} - G8 - \frac{G1G7}{4(i-1)} \right) & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & -\frac{G7}{2} + G8 + \frac{G1G7}{4(i-1)} & -\frac{G11}{2} + G12 + \frac{G1G11}{4(i-1)} & G11 & -\frac{G11}{2} - G12 - \frac{G1G11}{4(i-1)} \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -G11 & G11 + G14 \left(\frac{G11}{2} + G12 + \frac{G1G11}{4(i-1)} \right)
 \end{array}
 \tag{2.76}$$

$Q_n =$

Donde los parámetros G_i corresponden a las siguientes definiciones:

$$\begin{aligned}
 G1 &= \frac{\alpha_i^n \Delta t}{\Delta x^2}; & G2 &= \frac{(\alpha_{i+1}^n - \alpha_{i-1}^n) \Delta t}{8\Delta x^2}; & G3 &= \frac{\alpha_i^n \Delta t}{(\Delta x + \Delta x_2)(\Delta x^2 + \Delta x_2^2)}; \\
 G4 &= \frac{(\alpha_{i+1}^n - \alpha_{i-1}^n) \Delta t}{2(\Delta x + \Delta x_2)^2}; & G5 &= \frac{2\alpha_i^n \Delta t}{\Delta x^2 + \Delta x_2^2}; & G6 &= \frac{G1\alpha_i^n \Delta t}{2\Delta x(\Delta x + \Delta x_2)(i-1)}; \\
 G7 &= \frac{\alpha_i^n \Delta t}{\Delta x_2^2}; & G8 &= \frac{(\alpha_{i+1}^n - \alpha_{i-1}^n) \Delta t}{8\Delta x_2^2}; & G9 &= \frac{\Delta x_2 k_{di}^n}{\Delta x_4 k_i^n}; \\
 G10 &= \frac{L_s m_s \Delta x_1^n \Delta x_2}{k_i^n \Delta t}; & G11 &= \frac{\alpha_{di}^n \Delta t}{\Delta x_4^2}; & G12 &= \frac{(\alpha_{di+1}^n - \alpha_{di-1}^n) \Delta t}{\Delta x_4^2}; & G14 &= \frac{2h\Delta x_4}{k_{di}^n}.
 \end{aligned}$$

Debido a que la matriz C_n se puede escribir como se describe en la ecuación (2.77), sus autovalores se pueden relacionar con los autovalores μ_i de la matriz Q_n a través de la siguiente propiedad (Mitchell y Griffiths, 1980):

$$\lambda_i = (1 + \mu_i)^{-1}(1 - \mu_i) \quad (2.78)$$

Empleando la relación (2.78), la condición impuesta para los autovalores de la matriz C_n (ecuación (2.75)) se transforma en la siguiente condición para los autovalores de la matriz Q_n :

$$\lambda_i = \frac{1 - \mu_i}{1 + \mu_i} \leq 1 \quad (2.79)$$

En la práctica esto sucede cuando los autovalores de la matriz Q_n cumplen:

$$\mu_i \geq 0 \quad (2.80)$$

El problema original que consistía en encontrar la matriz C_n tarea complicada, y pedir que sus autovalores en valor absoluto estén acotados, se transformó en una condición bastante más fácil de resolver. El procedimiento consiste en conocer si existen autovalores de la matriz

Q_n positivos o negativos y para ello se dispone de un Teorema que nos permite hacer una evaluación preliminar de la ubicación de los mismos. Si se designan a los elementos de la matriz Q_n como q_{ij} , el Teorema de Gerschgorin establece (Burden y Faires, 1998): Sea Q_n una matriz de $n \times n$, si denotamos con R el círculo con centro en q_{ii} y radio $\sum_{j=1, j \neq i}^n |q_{ij}|$, los valores

característicos de Q_n están contenidos dentro de $R = \bigcup_{i=1}^n R_i$

Entonces este teorema nos permite localizar los autovalores en círculos, si los mismos se ubican en recta en el sector de los reales positivos, se cumple la condición (2.80). En caso contrario, si existe algún círculo en la posición de los reales negativos, se debe realizar una búsqueda más exhaustiva y conocer el valor de los autovalores.

Esta evaluación, por medio del cálculo de los círculos, se incorporó al programa de cálculo cuyo diagrama de bloques se describe en el apartado 2.2. Para cada intervalo de tiempo, se calculan los elementos de esta matriz Q_n , y los radios de los mismos y se evalúa si alguno de ellos invalida la condición (2.80).

En las condiciones operativas que se realizan los procesos de congelación y almacenamiento congelado los autovalores resultaron ser positivos. No se encontró ninguna condición para la cual esto no ocurra.

Esto implica que el esquema numérico implementado para el cálculo de las temperaturas en la Etapa 2 es estable en las condiciones de operación que se llevan a cabo en la práctica.

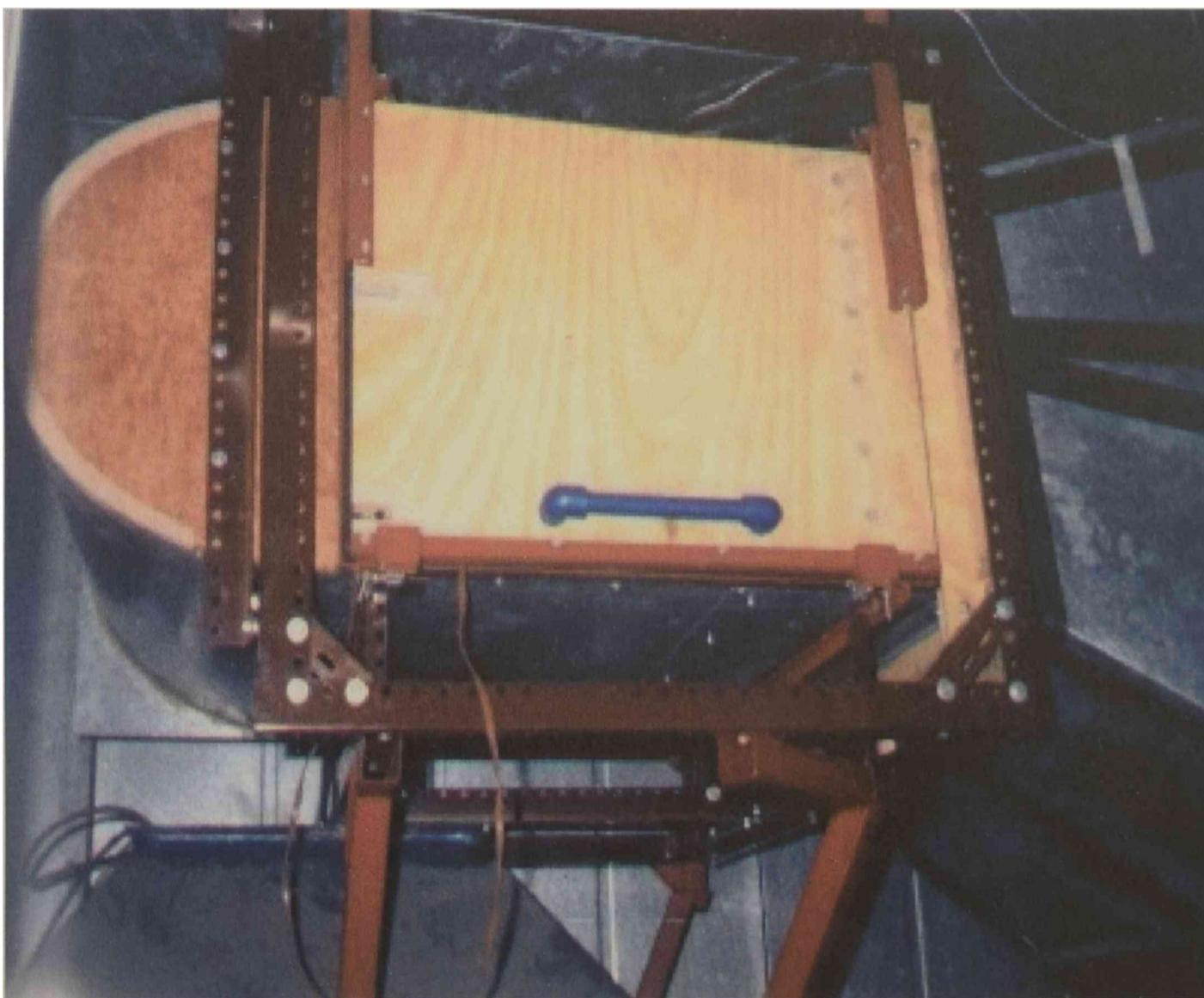
De esta forma se implementó una evaluación preliminar de la condición de estabilidad y se puede concluir que el esquema completo desarrollado en la Etapa 1 y en la Etapa 2 es estable en todas las condiciones de trabajo probadas.

CAPÍTULO 3: DESCRIPCIÓN DE LAS MEDIDAS EXPERIMENTALES

3.1 EQUIPO EXPERIMENTAL

El modelo matemático propuesto en el Capítulo 2, nos permite conocer, entre otros resultados, la pérdida de peso de los productos cuando son sometidos a la congelación y al almacenamiento congelado. Para verificar las predicciones del mismo, se deben realizar experimentos en un equipo que reproduzca condiciones operativas similares a las que se llevan a cabo en la práctica industrial. Con este fin, se procedió a la construcción de un túnel de congelación en el cual se realizaron determinaciones de pérdida de peso de diversos productos en condiciones de operación controladas.

Dicho túnel consiste en un circuito cerrado, como muestra la siguiente fotografía:



Fotografía 3.1: Túnel de congelación.

Este equipo se construyó dentro de una cámara frigorífica. La misma consta de un equipo de frío alimentado con Freón 22 y tiene una capacidad de 4254 kJ/h.

Dentro del túnel, el aire circula realizando el siguiente recorrido:

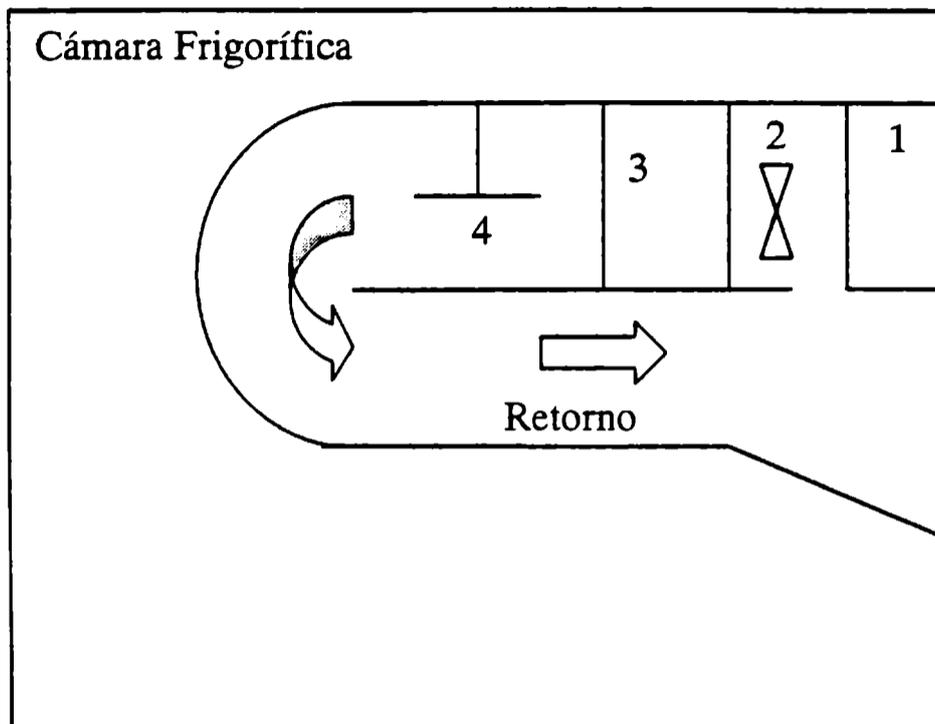


Figura 3.1: Esquema del túnel de congelación: 1 evaporador de la cámara frigorífica, 2 sopladores, 3 rectificador de flujo, 4 sector de medida.

La fuente de frío del túnel es el evaporador de la cámara frigorífica. El aire interno del túnel es refrigerado al pasar a través del evaporador y luego es impulsado por dos sopladores axiales. Con el fin de rectificar el flujo, se diseñó un arreglo tipo nido de abejas que se ubicó delante de los sopladores, previo al sector de medida. Después de atravesar el sector de prueba, el aire retorna al evaporador.

La disponibilidad de un túnel de congelación permitió diseñar experimentos en diversas condiciones operativas reproducibles por el modelo matemático. Cabe señalar que el mismo equipo puede funcionar a temperaturas positivas, con lo cual permite también realizar experiencias de pérdida de peso durante la refrigeración, así como también determinaciones de los coeficientes de transferencia de calor y de materia, temática que se desarrolla en el Capítulo 4.

3.2 VARIABLES OPERATIVAS

Para caracterizar adecuadamente las experiencias realizadas, ciertas variables operativas deben ser medidas y controladas. Entre ellas se pueden considerar:

- Condiciones operativas dentro del túnel:

Temperatura dentro de la cámara: se midió la temperatura del aire por medio de termocuplas de Cu-Ct conectadas a un equipo de adquisición de datos y control Series 500 (Keithley) que se muestra en la Fotografía 3.2. El sistema permite controlar la temperatura dentro del túnel con una exactitud de 0.5°C . El control es del tipo proporcional + integral (P+I). Para el mismo se emplea como fuente de frío el aportado por el sistema frigorífico de la cámara y como fuente de calor cuatro resistencias eléctricas de 1 kW cada una y una inyección de gas caliente al evaporador que se obtiene a través de un by-pass al condensador del sistema frigorífico de la cámara. Se toman acciones de control cada 10 segundos. Toda esta tarea es ejecutada por medio un programa de adquisición y control realizado en lenguaje Quick Basic utilizando rutinas propias del software del adquirente (KDAC500).



Fotografía 3.2: Sistema de adquisición de datos Keithley (Series 500).

Velocidad del aire: se midió con un anemómetro Solomat utilizando dos sensores distintos (hilo caliente y turbina). El sensor de hilo caliente opera en un rango de 1-5 m/s, mientras que el sensor de turbina lo hace en un rango más amplio (1-10 m/s). Las experiencias se realizaron a distintas velocidades, las que se lograron a través de un variador de velocidad conectado a los sopladores axiales. El mismo se acciona por medio de un control manual graduado colocado en un panel en la pared externa de la cámara frigorífica.

Humedad relativa del aire: a temperaturas positivas se determinó con un higrómetro manual Solomat. En el caso de temperaturas negativas se emplea un higrómetro de tipo capacitivo Omega HX48. El mismo posee un sensor que opera en un rango de temperaturas de -40°C a 140°C .

- Características de las muestras:

Tamaño: se midieron las dimensiones características con calibre (diámetro D para esferas y cilindros y longitud L para placas y cilindros).

Peso: para la determinación de la pérdida de materia en condiciones controladas es necesario pesar las muestras a intervalos regulares de tiempo.

En el caso de las medidas a temperaturas positivas, tal como las realizadas en las experiencias de determinación de coeficientes de transferencia de calor y de materia, el peso de las muestras se midió con el empleo de una balanza analítica Sartorius.

El trabajo a temperaturas negativas implica que las muestras no se pueden pesar a intervalos regulares en una balanza, pues ninguna balanza funciona correctamente en esas condiciones, ya que se perjudican los circuitos eléctricos por condensación de humedad.

Por otro lado, las muestras no pueden ser sacadas del túnel para ser pesadas, debido a que el vapor ambiente condensa en la muestra fría, introduciendo un error en la medida del peso.

Para medir correctamente el peso de las muestras sin retirarlas del túnel durante las experiencias de congelación o almacenamiento, se utilizaron celdas de carga. Las mismas consisten en un puente de resistencias eléctricas que se deforma de acuerdo al esfuerzo que soportan. Una ventaja que presentan con respecto al empleo de las balanzas es que pueden conectarse al equipo de adquisición de datos, registrando los pesos a intervalos de tiempo muy pequeños.

En la práctica se verificó que las celdas de carga no funcionan correctamente a temperaturas negativas, entonces fue necesario ubicarlas fuera del túnel y de la cámara frigorífica. Así, mediante vástagos plásticos se conectó la canasta de medida, ubicada en el

interior del túnel a la celda de carga correspondiente colocada en la parte externa del techo de la cámara, tal como indica el esquema siguiente:

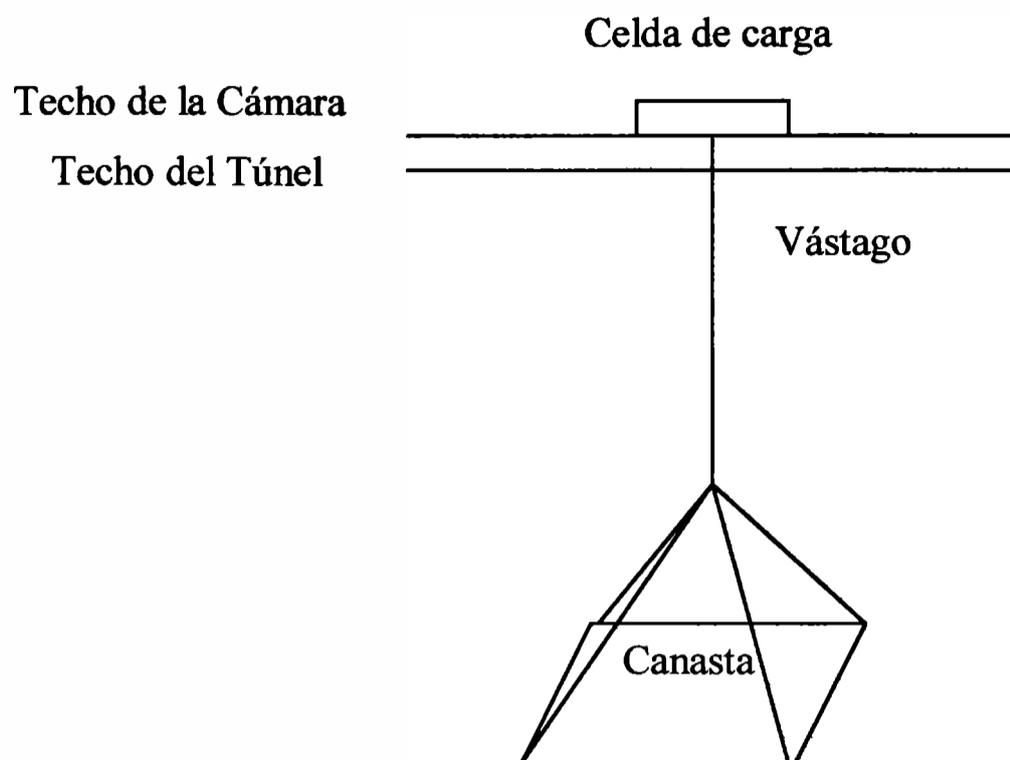
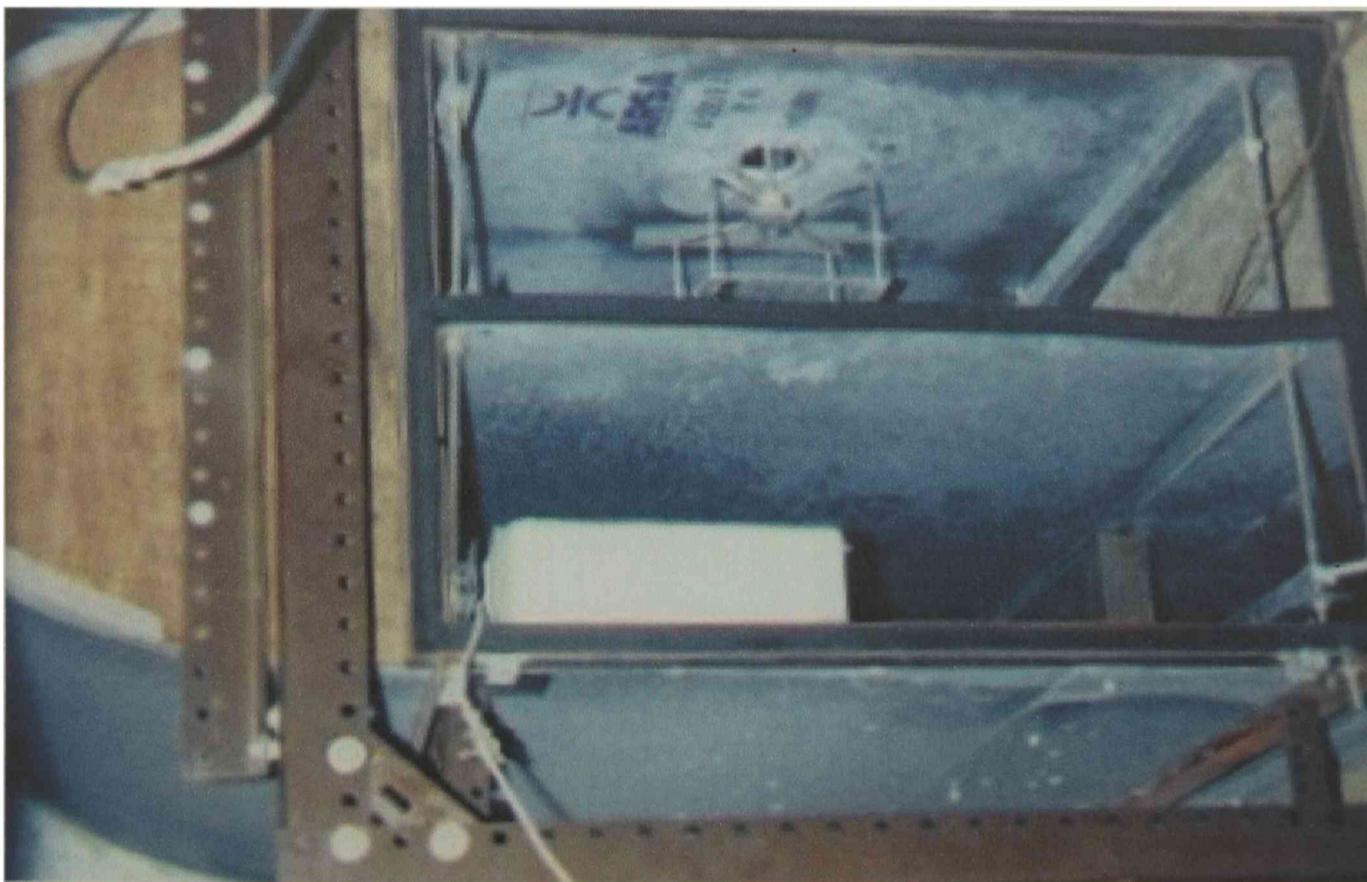


Figura 3.2: Esquema de la disposición de las celdas de carga.

La siguiente fotografía muestra la ubicación de las canastas de medida dentro del túnel:



Fotografía 3.3: Vista interna del sector de medida.

La calibración y la respuesta de las celdas de carga son muy sensibles a la temperatura ambiente y por lo tanto, se debe trabajar a temperatura controlada. Para lograr estas condiciones de trabajo, en el techo de la cámara fue necesario aislar el sector donde se ubicaron las celdas para así poder controlar la temperatura y evitar la condensación de humedad en los sensores o el depósito de hielo en los vástagos. En caso contrario el hielo solidifica en la superficie de los mismos y distorsiona las medidas de peso realizadas. La temperatura en este sector se controla por medio de un termostato conectado a una fuente calefactora, un caloventor, lográndose un valor constante con un error de $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$. Este control de temperatura externa no interfiere en absoluto con la temperatura en el interior del túnel.

Como ya se mencionó, las celdas de carga se encuentran conectadas al sistema de adquisición de datos que posee una tarjeta adquisidora específica para este tipo de sensores. Se utilizaron dos celdas de carga distintas:

- Celda 1: marca Flexar, funciona a compresión, el peso máximo que soporta es de 2 kg y la confiabilidad es de 0.5 g en condiciones de proceso y de 0.05 g / 100 g en condiciones estáticas.
- Celda 2: marca Tedeá, funciona a tracción, el peso máximo es de 3 kg.

Contenido inicial de agua: se determinó en estufa con vacío. Según el método seleccionado (AOAC, 1980), se deben pesar aproximadamente 5 g de muestra inicial, la que se coloca en la estufa durante una semana a 60°C . El contenido inicial de agua se calcula sobre la base de la diferencia de pesos al comienzo y al final del secado.

Medida de temperatura de las muestras: Además de medir el peso de las muestras en el tiempo, se midió la historia térmica en distintas posiciones internas del producto. Para ello se dispone de termocuplas rígidas que se encuentran conectadas al sistema de adquisición y control de temperaturas.

Se puede concluir que se dispone de un túnel de congelación con condiciones operativas controladas para la realización de determinaciones de pérdida de peso durante la refrigeración, congelación y almacenamiento congelado de productos. El mismo se empleó para realizar los experimentos en distintos productos alimenticios que luego fueron empleados para validar el modelo matemático. Como paso previo se caracteriza la fluidodinámica de este equipo a través de la determinación de los coeficientes de transferencia de energía y materia, temática que se desarrolla en el Capítulo siguiente.

CAPÍTULO 4: COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE CALOR Y MATERIA

4.1 ANTECEDENTES

En el modelo matemático se emplean condiciones de contorno de tipo convectivas, tanto para la transferencia de calor como para la transferencia de materia. Por lo tanto para que la simulación numérica brinde resultados satisfactorios es necesario emplear correlaciones de los coeficientes de transferencia de calor y materia que describan correctamente la interacción entre el producto y el aire dentro del túnel de congelación.

Existen en literatura numerosas correlaciones del número de Nusselt (Nu) en función de los números adimensionales relevantes (número de Reynolds Re y de Prandtl Pr) para distintas geometrías, algunas de las cuales se detallan la siguiente tabla:

Tabla 4.1: Correlaciones del número de Nusselt para distintas geometrías.

Geometría del producto	Correlación del Nu vs Re y Pr	Rango de validez	Referencia bibliográfica
Esfera	$Nu=0.53 Re_D^{0.5}$	$1 < Re_D < 7 \cdot 10^4$	Perry y Chilton, 1985
	$Nu=0.33 Re_D^{0.6}$	$20 < Re_D < 150000$	Welty, 1974
Placa plana	$Nu=0.648 Re_L^{0.5} Pr^{1/3}$	$Re_L < 3 \cdot 10^5$	Perry y Chilton, 1985
	$Nu=0.664 Re_L^{0.5} Pr^{1/3}$	$Re_L < 5 \cdot 10^5$	Treybal, 1968
Cilindro con flujo perpendicular al eje	$Nu=0.46 Re_D^{0.5} + 0.00128 Re_D$	$Re_D > 500$	Welty, 1974
	$Nu=0.193 Re_D^{0.618} Pr^{1/3}$	$Re_D < 4 \cdot 10^4$	Morgan, 1975

También se han determinado correlaciones específicas para distintas operaciones de la ingeniería alimentaria: liofilización (Boeh-Ocansey, 1988), refrigeración (Clary y Nelson, 1970; Daudin y Swain, 1990), congelación (Rubiolo y Schwartzberg, 1986; Flores y Mascheroni, 1988) y cocción (Burfoot y Self, 1989).

Para determinadas condiciones de temperatura y velocidad del aire se puede conocer el valor del coeficiente de transferencia de calor y luego calcular el coeficiente de transferencia de materia, a través de la relación de Lewis:

$$\frac{h}{k_m} = \rho C_p \left(\frac{Sc}{Pr} \right)^{2/3} \quad (4.1)$$

donde Sc es el número de Schmidt.

Este es un camino indirecto para la determinación del coeficiente de transferencia de materia. Para la determinación directa es necesario la medida experimental de la pérdida de peso.

Determinaciones directas del coeficiente de transferencia de materia o de la pérdida de peso fueron realizadas para distintos alimentos cárneos y frutihortícolas: papas congeladas (Lambrinos y Aguirre-Puente, 1983), carne vacuna congelada (Sukhwal y Aguirre-Puente, 1983), entre otros. En cambio, existe poca información experimental de coeficientes de transferencia de materia en productos no alimenticios.

En un trabajo de investigación (Daudin y Swain, 1990) emplearon una espuma fenólica como material de prueba y se midió el coeficiente de transferencia de materia para geometría cilíndrica con flujo de aire en dirección paralela al eje del cilindro, pero los autores no presentan ninguna correlación de los datos en función de los números adimensionales característicos.

Para la obtención del coeficiente de transferencia de materia en el túnel de congelación descrito en el Capítulo 3, se procedió a la determinación experimental de pérdida de peso para productos de distintas geometrías bajo diversas condiciones operativas. Los resultados experimentales obtenidos se correlacionaron en función de los números adimensionales correspondientes. Esto permite trasladar las correlaciones obtenidas en nuestro equipo experimental a otros equipos de congelación o refrigeración.

4.2 TEORÍA

Cuando el aire fluye a través de objetos permeables, se produce la transferencia de calor y materia dentro del objeto y hacia los alrededores a través de la interfase.

Para la determinación de coeficientes de transferencia las características del producto que se emplea juegan un rol muy importante. Cuando se utiliza un alimento se debe tener en cuenta su estructura interna y la resistencia que ofrece a la transferencia de humedad. Si se utiliza un material que no ofrece resistencia interna, se puede suponer que el perfil de concentración interno es plano y el control es totalmente externo. Para un producto con estas características, se puede plantear el siguiente balance macroscópico diferencial de materia:

$$\frac{dM}{dt} = A k_m (C_{va,sat} A_{ws} - C_a) \quad (4.2)$$

donde M es la masa de la muestra, t es el tiempo, A es el área de la muestra expuesta a la transferencia de calor y materia, $C_{va,sat}$ es la concentración de vapor en la superficie de la muestra calculada en función de la presión de saturación (evaluada a la temperatura de bulbo húmedo), A_{ws} es la actividad acuosa superficial y C_a es la concentración de vapor de agua en el seno del aire.

A partir de esta ecuación, conocidos la variación del peso con el tiempo dM/dt , cuando alcanza el estado estacionario, el área de la muestra, la temperatura ambiente T_a , la humedad relativa del aire dentro del túnel y la actividad acuosa, se puede calcular el coeficiente de transferencia de materia k_m .

4.3 MATERIALES Y MÉTODOS

El material seleccionado para confeccionar las muestras es una espuma fenólica (Oasys) que tiene la capacidad de absorber humedad y de permanecer húmeda durante el desarrollo de las experiencias, por lo tanto la actividad acuosa superficial es igual a 1. Se prepararon muestras de tres geometrías distintas: esférica, cilíndrica y plana. Las muestras secas fueron colocadas en un recipiente con agua y permanecieron en él durante un día hasta alcanzar la saturación.

Para asegurar que la transferencia de materia sea unidireccional, en el caso de los cilindros y de las placas, se aislaron con poliestireno expandido las caras correspondientes, tal cual indica la Figura 4.1.

Para la realización de esferas, se emplearon dos sacabocados que permitieron obtener muestras de 2.6 y 5.6 cm de diámetro. Por otro lado, los cilindros que serían colocados en dirección paralela al flujo del aire se realizaron con un diámetro de 2.5 cm y una longitud de 6 a 12.7 cm, mientras que los cilindros que se colocarían en dirección perpendicular poseen un diámetro de 2.7 y 2.9 cm y una longitud de 10 cm aproximadamente. Las placas se construyeron con una longitud de 8 a 10 cm, considerando la cara paralela al flujo de aire.

La técnica experimental consiste en la determinación del peso de las muestras a intervalos regulares de tiempo hasta que se alcanza el estado estacionario para el cual la velocidad de pérdida de peso permanece constante en el tiempo. Durante cada determinación, se siguió el siguiente procedimiento:

- Se encendió la cámara frigorífica. La misma aporta la fuente de frío, mientras que resistencias eléctricas y un by-pass de gas caliente proveniente de la cámara constituyen la fuente de calor. Una descripción más detallada del equipo y su funcionamiento se realiza en el Capítulo 3,
- Se seleccionó la temperatura de operación en el sistema de control y adquisición de datos Series 500 (Keithley),
- Se midió la humedad relativa dentro del túnel de congelación con el empleo del higrómetro manual Solomat,
- Se seleccionó la velocidad del aire por medio del panel de control colocado en la pared externa de la cámara frigorífica,
- Las muestras se pesaron fuera de la cámara con el empleo de una balanza analítica Sartorius,
- Las muestras se ingresaron al túnel y se registró el peso de las mismas regularmente,
- Al finalizar la experiencia, las muestras se retiraron del túnel y se midió nuevamente la humedad relativa de aire dentro del equipo.

Las experiencias se realizaron por duplicado para cada condición operativa. A partir del registro del peso de las muestras durante el desarrollo de las mismas se construyeron curvas de pérdida de materia y de flujo en función del tiempo.

Una curva típica de pérdida de materia obtenida por este método se muestra en la Figura 4.2.

El valor del flujo de materia (J) se obtiene por diferenciación numérica de la curva de peso de la muestra en función del tiempo, dividido por el área de transferencia. La curva de

flujo de materia en función del tiempo correspondiente al caso de la Figura 4.2 se muestra en la Figura 4.3.

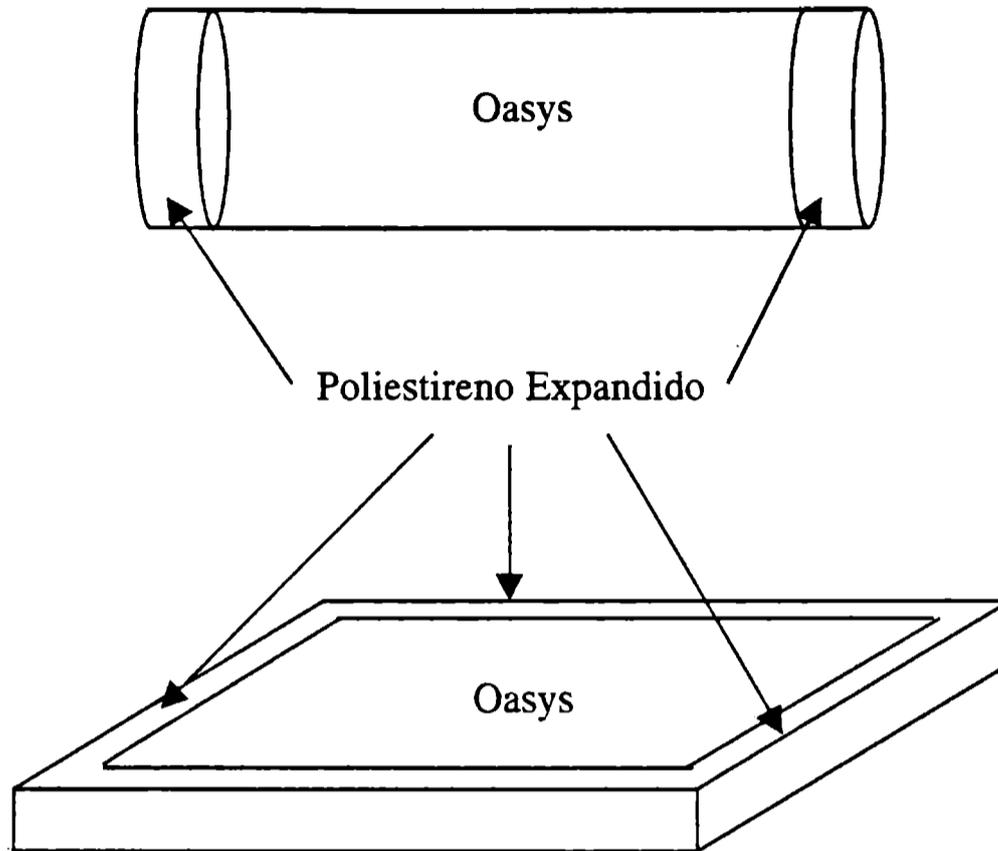


Figura 4.1: Esquema de la preparación de las muestras en forma de placas y cilindros.

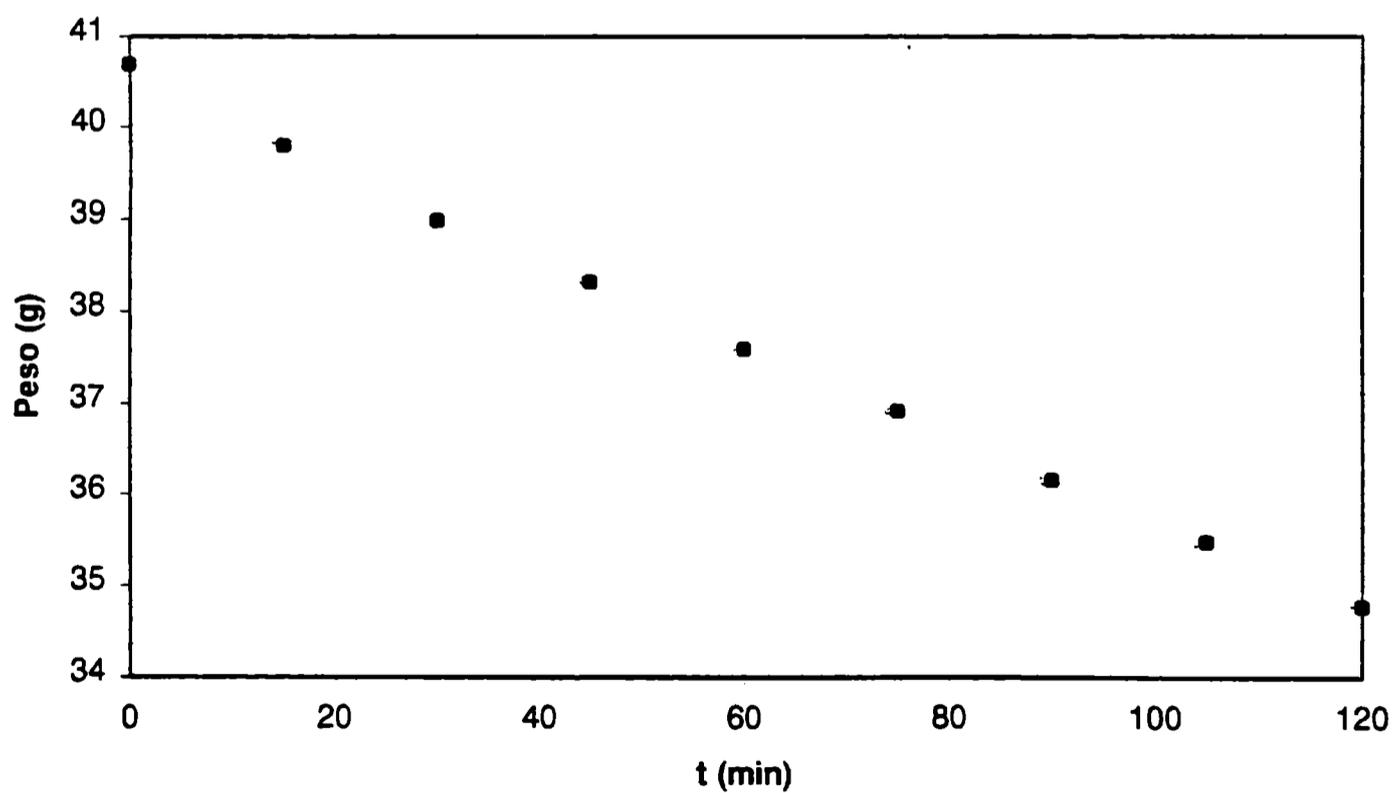


Figura 4.2: Pérdida de peso de una muestra de geometría cilíndrica ($D=2.8$ cm, $T_a=35^\circ\text{C}$, $v=2.5$ m/s y $HR=47\%$).

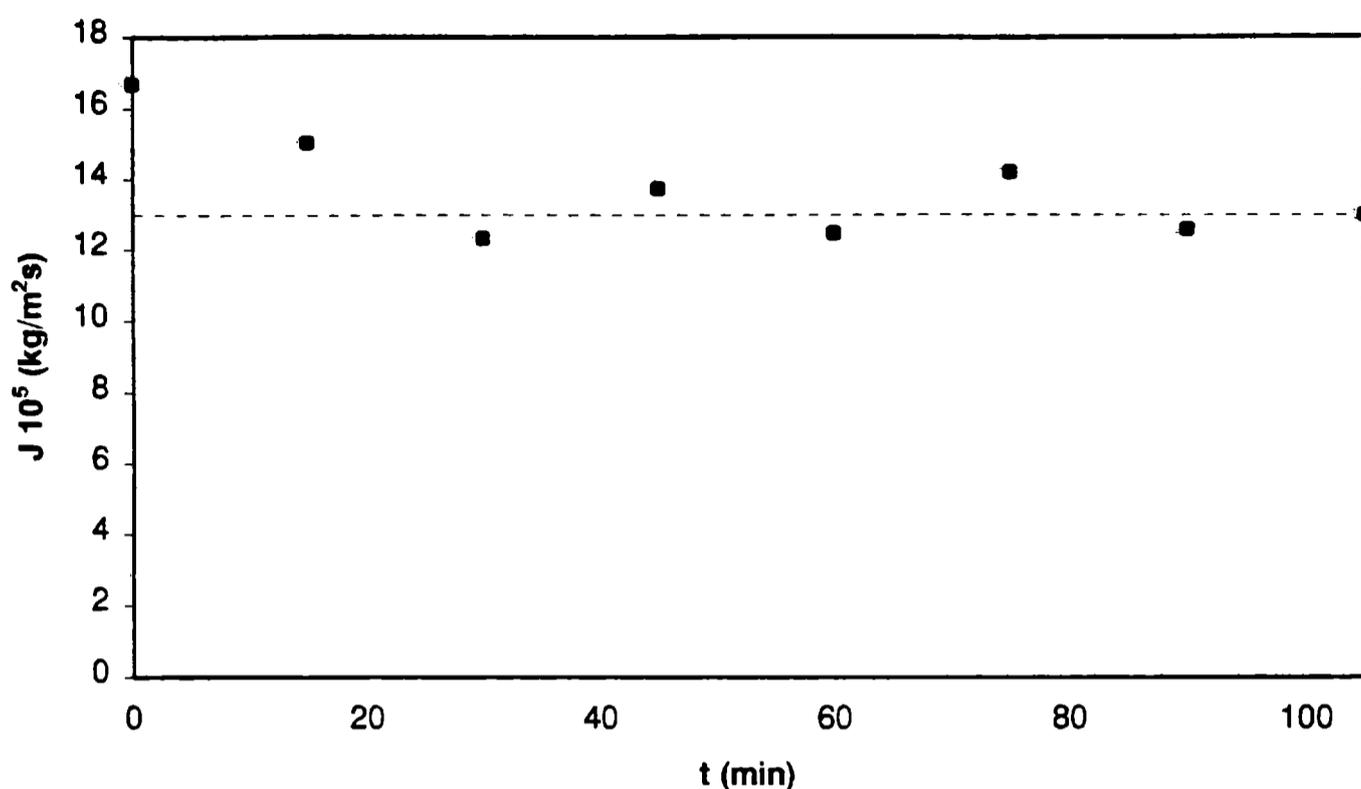


Figura 4.3: Flujo de materia de una muestra de geometría cilíndrica ($D=2.8$ cm, $T_a=35^\circ\text{C}$, $v=2.5$ m/s y $HR=47\%$).

4.4 RESULTADOS

Los resultados de los experimentos permitieron obtener las curvas de pérdida de peso y flujo de masa en función del tiempo para las tres geometrías empleadas: esfera, cilindros y placa plana. En el caso de cilindros se realizaron experimentos con flujo de aire en dirección paralela al eje de la muestra y en dirección perpendicular al mismo.

A partir del conocimiento del flujo de materia cuando se alcanza el estado estacionario ($dM/(dt A)$) para cada experiencia, empleando la ecuación (4.2) se calcularon los coeficientes de transferencia de materia para cada geometría, en distintas condiciones de operación seleccionadas.

Los experimentos se realizaron a tres valores de temperaturas de aire (5°C , 9°C y 34°C) y a tres velocidades distintas (1.5 m/s, 2.5 m/s y 5 m/s).

Los resultados obtenidos para cada geometría, se resumen a continuación:

COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE CALOR Y MATERIA

Tabla 4.2: Coeficientes de transferencia de materia obtenidos experimentalmente para geometría esférica.

T_a (°C)	T_{bh} (°C)	v (m/s)	HR (%)	$J_{exp} 10^5$ (kg/m ² s)	D (m)	k_m (m/s)
34.0	23.2	5.0	39	23.3	0.026	0.034
34.0	23.7	2.5	42	18.8	0.026	0.030
34.7	25.0	1.5	46	13.3	0.026	0.023
9.5	8.0	5.0	82	5.0	0.026	0.051
8.3	6.8	2.5	80	3.8	0.026	0.035
8.2	6.7	1.5	80	3.0	0.026	0.028
4.4	2.4	5.0	70	4.3	0.056	0.033
4.8	1.3	2.5	53	2.9	0.056	0.015
4.4	1.0	1.5	51	2.0	0.056	0.010

Tabla 4.3: Coeficientes de transferencia de materia obtenidos experimentalmente para geometría placa plana.

T_a (°C)	T_{bh} (°C)	v (m/s)	HR (%)	$J_{exp} 10^5$ (kg/m ² s)	L (m)	k_m (m/s)
34.0	19.9	5.0	27	25.7	0.086	0.034
34.0	19.9	2.5	27	19.0	0.082	0.025
33.6	19.5	1.5	26	13.3	0.092	0.017
8.2	5.4	5.0	65	5.5	0.101	0.031
8.9	7.0	2.5	77	3.3	0.086	0.027
9.0	7.2	1.5	77	2.9	0.090	0.023
4.9	2.0	5.0	57	4.7	0.102	0.025
4.8	2.0	2.5	57	2.5	0.102	0.013
4.4	1.2	1.5	56	2.2	0.102	0.012

COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE CALOR Y MATERIA

Tabla 4.4: Coeficientes de transferencia de materia obtenidos experimentalmente para geometría cilíndrica con flujo de aire perpendicular al eje.

T_a (°C)	T_{bh} (°C)	v (m/s)	HR (%)	$J_{exp} 10^5$ (kg/m ² s)	D (m)	k_m (m/s)
33.7	20.5	5.0	30	31.7	0.027	0.044
33.7	20.5	2.5	30	18.3	0.027	0.026
34.0	20.7	1.5	30	14.0	0.027	0.020
8.5	7.0	5.0	80	4.4	0.029	0.049
9.0	7.7	2.5	82	3.3	0.027	0.032
9.0	7.7	1.5	82	2.7	0.027	0.026
4.9	2.1	5.0	58	4.5	0.029	0.025
4.8	1.9	2.5	55	3.8	0.029	0.019
4.5	1.4	1.5	55	2.3	0.029	0.012

Tabla 4.5: Coeficientes de transferencia de materia obtenidos experimentalmente para geometría cilíndrica con flujo de aire paralelo al eje.

T_a (°C)	T_{bh} (°C)	v (m/s)	HR (%)	$J_{exp} 10^5$ (kg/m ² s)	L (m)	k_m (m/s)
34.0	25.0	5.0	48	20.0	0.070	0.036
34.0	24.7	2.5	47	13.0	0.067	0.023
34.0	26.3	1.5	54	10.0	0.061	0.019
8.4	6.0	5.0	70	5.8	0.080	0.038
8.4	6.0	2.5	70	4.3	0.082	0.029
8.4	6.0	1.5	70	3.5	0.092	0.023
4.9	2.0	5.0	58	5.2	0.123	0.028
4.8	1.7	2.5	54	3.3	0.127	0.016
4.5	1.3	1.5	54	1.7	0.126	0.009

COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE CALOR Y MATERIA

Los valores se agruparon a través del número de Sherwood y se correlacionaron en función de los números de Reynolds y de Schmidt a través del empleo del software Systat (versión 5.02 para Windows, 1990-1993).

El modelo de dependencia sugerido es:

$$Sh = a Re^b Sc^{1/3} \quad (4.3)$$

Los valores obtenidos de los coeficientes a y b correspondientes a cada geometría se muestran en la Tabla 4.6. Como se puede observar el coeficiente de correlación es, en todos los casos, cercano a 1.

Tabla 4.6: Parámetros a y b (ecuación 4.3) y coeficiente de correlación.

Geometría	a	b	r ²
Esfera	0.207	0.603	0.969
Placa	1.235	0.444	0.973
Cilindro (perpendicular al flujo)	0.234	0.579	0.949
Cilindro (paralelo al flujo)	0.45	0.551	0.978

En las Figuras 4.4, 4.5, 4.6 y 4.7, se grafica el factor de Colburn ($j_m = Sh Re^{-1} Sc^{-1/3}$) en función del número de Reynolds para cada geometría. En cada figura se muestran además, los valores que se obtienen utilizando las relaciones de la Tabla 4.1, calculando el coeficiente de transferencia de calor y empleando la relación de Lewis para el cálculo del coeficiente de transferencia de materia.

Se puede observar que existen diferencias entre los valores experimentales y los predichos por las diferentes correlaciones, pero cabe señalar que los valores están dentro del mismo orden y tienen la misma dependencia con el número de Reynolds.

Las correlaciones obtenidas son válidas para caracterizar la transferencia de materia dentro del túnel de congelación y las mismas se emplean en la resolución del modelo matemático desarrollado en este trabajo de Tesis.

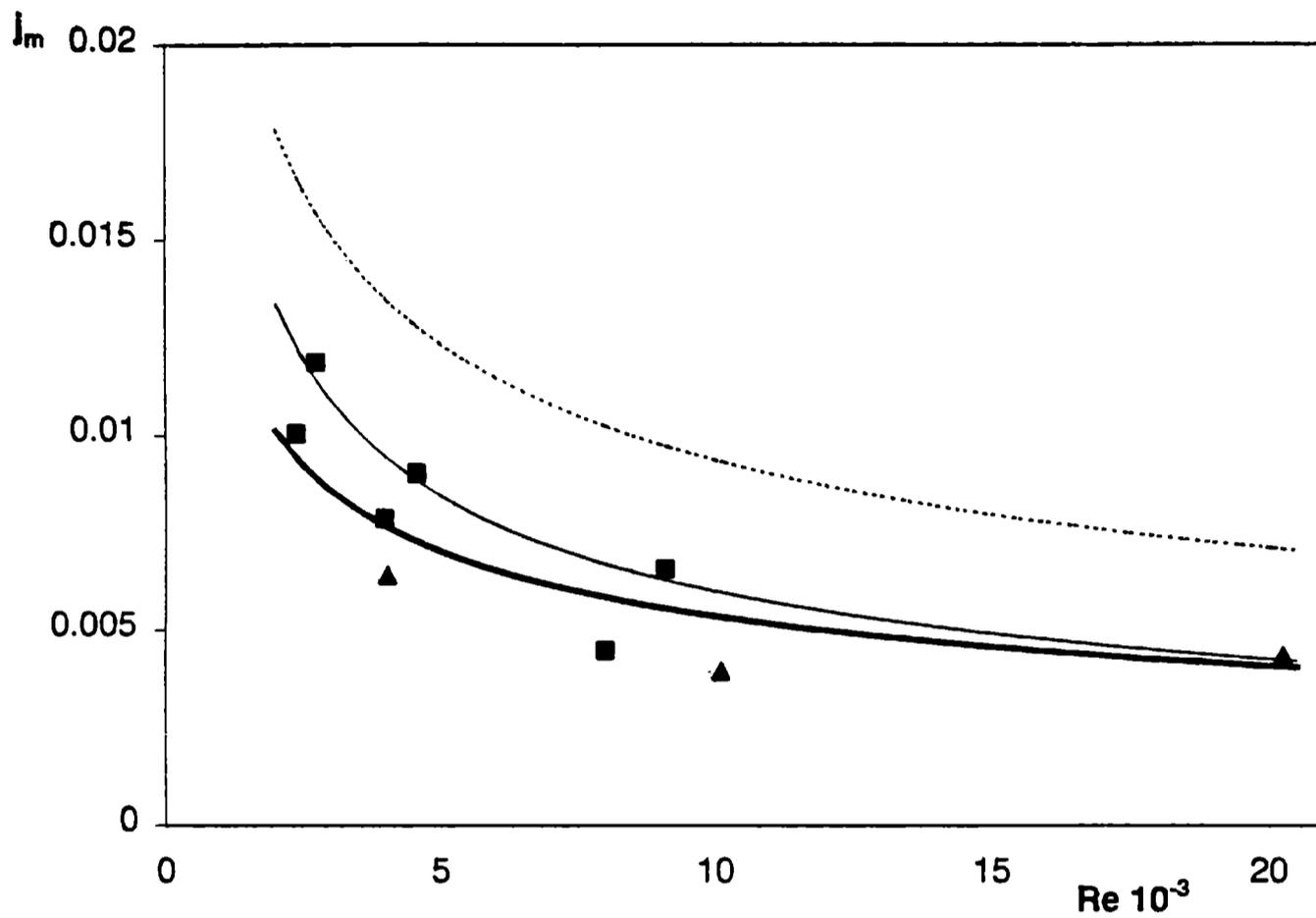


Figura 4.4: j_m vs Re para esferas. Correlaciones: \cdots Welty, $-$ Perry y Chilton, $-$ Este trabajo.

Datos experimentales: \blacksquare 2.65 cm, \blacktriangle 5.6 cm.

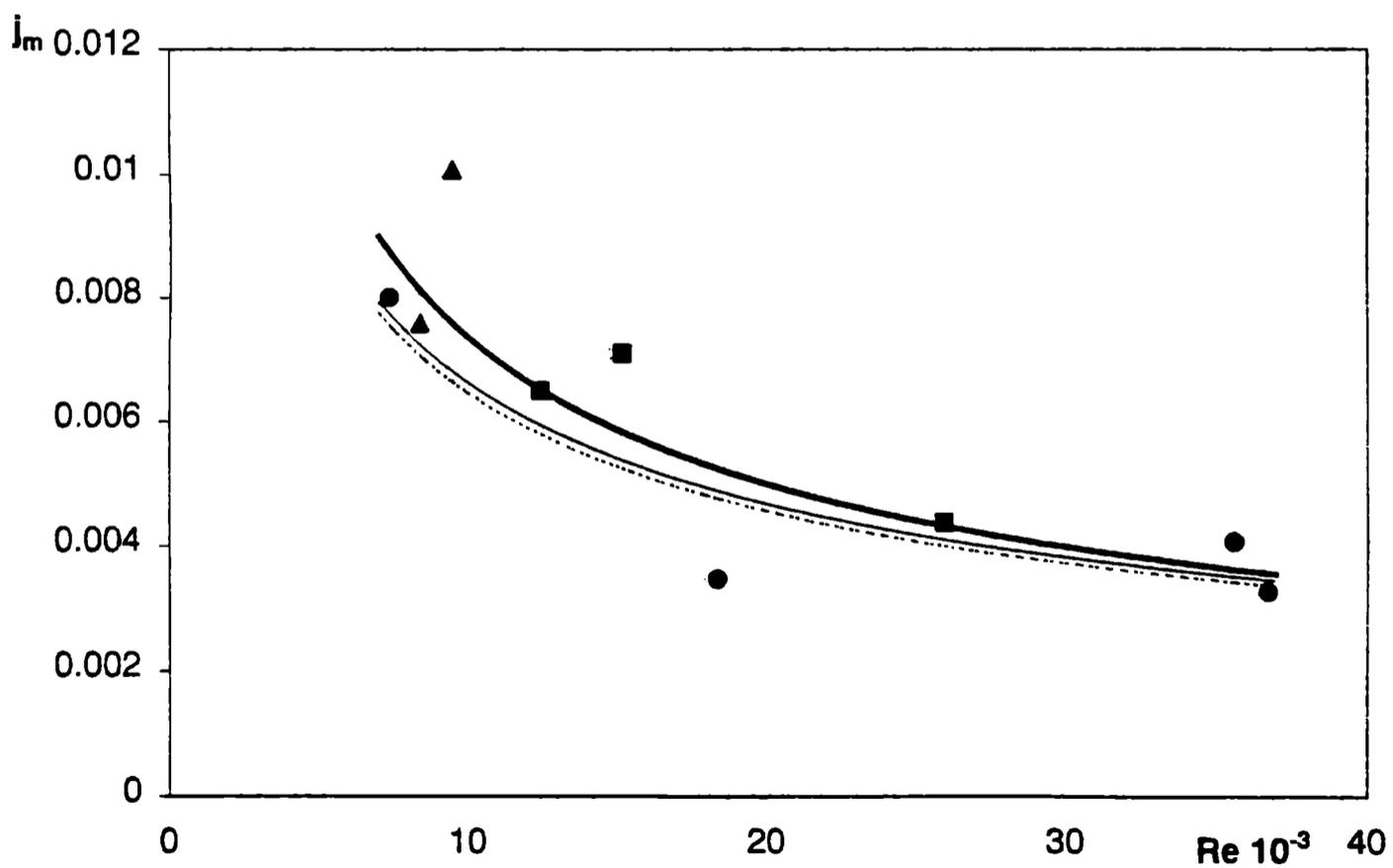


Figura 4.5: j_m vs Re para placas. Correlaciones: \cdots Perry y Chilton, $-$ Treybal, $-$ Este

trabajo. Datos experimentales: \blacksquare 8 cm, \blacktriangle 9 cm, \bullet 10 cm.

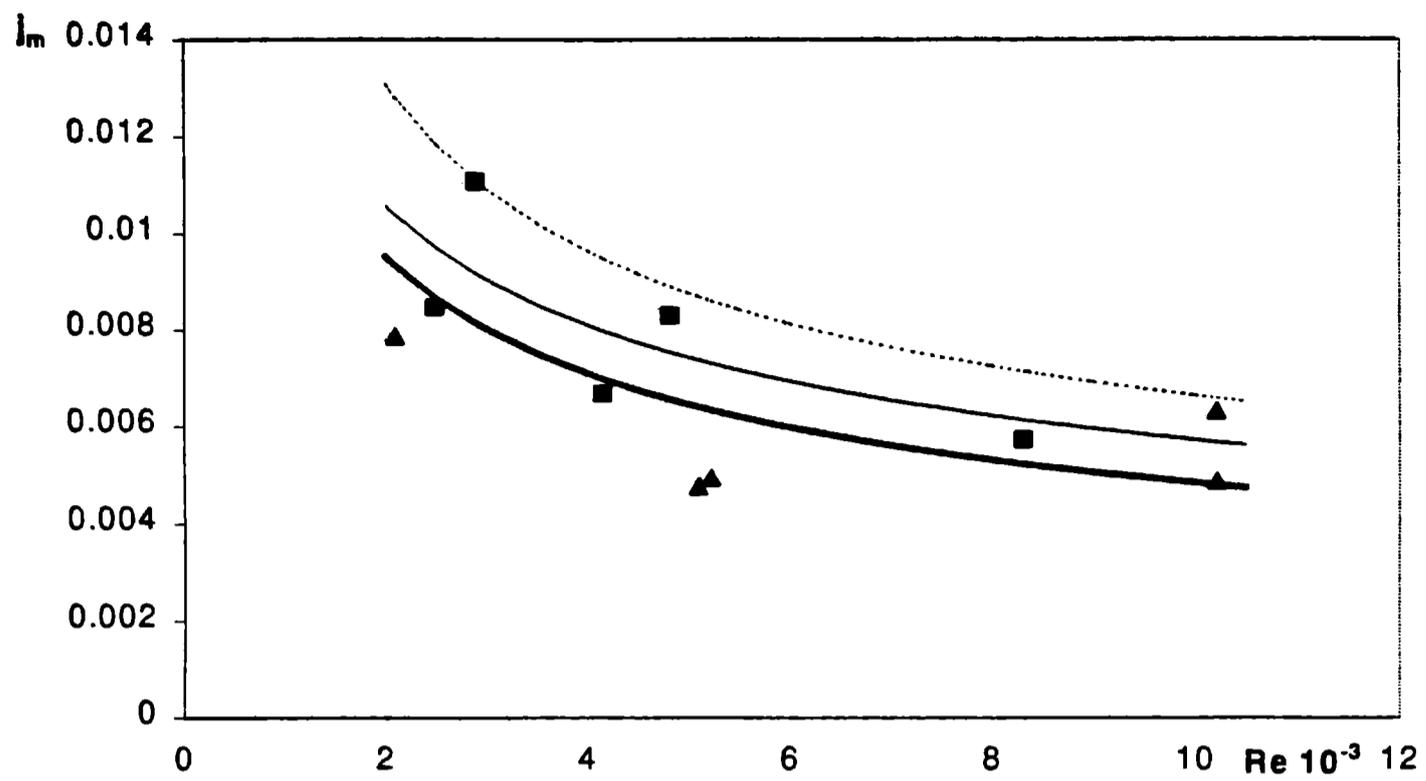


Figura 4.6: j_m vs Re para cilindros (perpendicular al flujo). Correlaciones: \cdots Welty, $-$ Morgan, $-$ Este trabajo. Datos experimentales: \blacksquare 2.75 cm, \blacktriangle 2.9 cm.

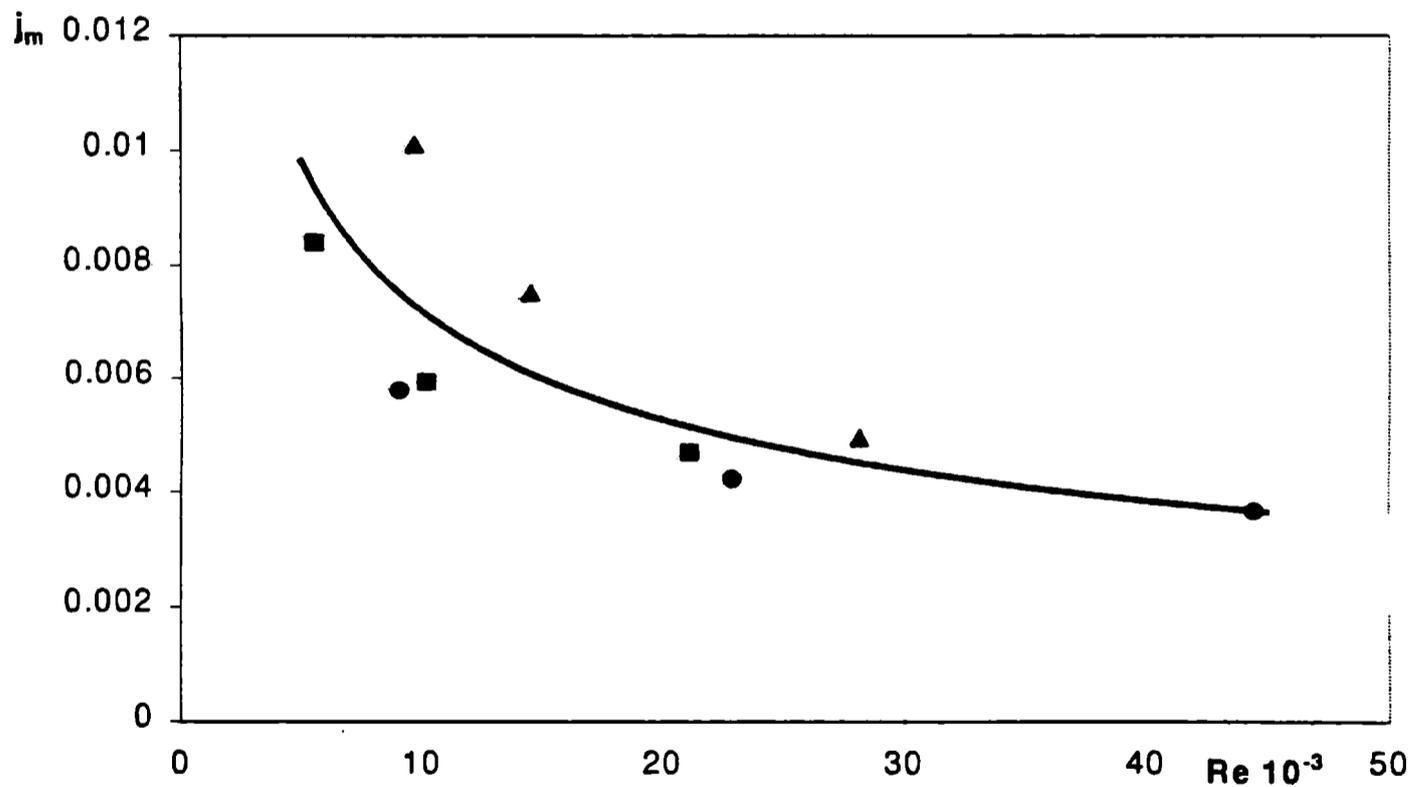


Figura 4.7: j_m vs Re para cilindros (paralelos al flujo). Correlación: $-$ Este trabajo. Datos experimentales: \blacksquare 6.5 cm, \blacktriangle 8.5 cm, \bullet 12.5 cm.

CAPÍTULO 5: DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE PÉRDIDA DE PESO

5.1 TÉCNICA EXPERIMENTAL

Uno de los objetivos de este trabajo de Tesis es encontrar las condiciones óptimas para realizar los procesos de congelación y almacenamiento congelado de alimentos. Con este fin, en el túnel de congelación que se describe en el Capítulo 3, se realizaron varias series experimentales para conocer como afectan las condiciones operativas en la pérdida de peso de diversos productos cárneos.

A diferencia de las medidas realizadas para obtener los valores de los coeficientes de transferencia de materia, estas determinaciones se realizaron a temperaturas negativas.

Para la realización de las experiencias, se emplearon las siguientes muestras:

- Carne picada: se empleó carne vacuna picada refrigerada, que fue moldeada como hamburguesas (10 cm de diámetro y 1.5-2 cm de espesor) y albóndigas (5 cm de diámetro),
- Peceto (músculo semitendinoso): con un sacabocados se extrajeron muestras cilíndricas de 2.75 cm de diámetro y 10 cm de longitud. Las bases de los cilindros se aislaron con discos de poliestireno expandido a fin de que existiera transferencia de materia en sentido radial.
- Pollo: se cortaron placas de pechugas de pollo de 1.5–2.25 cm de espesor y aproximadamente 6 cm de ancho y 10 cm de longitud. Los laterales de las placas se aislaron con cintas de teflón para asegurar que la transferencia de materia fuera unidimensional.

Cada determinación experimental consistió en la medida del peso de las muestras a intervalos regulares en condiciones de operación predeterminadas. Durante el transcurso de las experiencias, el peso fue medido con el empleo de dos celdas de carga conectadas al sistema de control y adquisición de datos descrito en el Capítulo 3. Este sistema permite registrar el peso de cada muestra en forma prácticamente continua, sin provocar perturbaciones en el área de trabajo (interior del túnel).

Otra variable que se midió durante el desarrollo de los experimentos fue la historia térmica interna de las muestras. Para ello se dispone de termocuplas rígidas que son colocadas con facilidad y que se encuentran conectadas al sistema de adquisición y control de datos Series 500 (Keithley). Durante cada experiencia, se colocó dentro de túnel una tercera muestra

con una termocupla en su interior cuidando que la punta sensora quedara posicionada en el centro del producto.

Durante el desarrollo de las experiencias, se siguió el siguiente procedimiento:

- Se encendió la cámara frigorífica,
- Se seleccionó la temperatura de operación por medio del sistema de control y adquisición de datos,
- Se seleccionó la velocidad de operación en el panel de control colocado en la pared externa de la cámara,
- Se midió la humedad relativa cuando el túnel alcanza la temperatura de operación con el higrómetro Omega HX48,
- Las muestras se pesaron fuera de la cámara mediante una balanza analítica y se colocó una termocupla rígida en el interior de una tercer muestra,
- Se registró la temperatura inicial de las muestras fuera de la cámara frigorífica,
- Ingresaron tres muestras al túnel de congelación, dos se colocaron en celdas de carga y la tercera con la termocupla posicionada en su interior se colocó en un soporte perforado en el sector de prueba,
- El sistema de control y adquisición de datos registró el peso de las celdas de carga y la temperatura interna durante el transcurso de un día.

Es importante destacar que como ocurre en la práctica, las muestras ingresan al túnel con una temperatura interna positiva, mientras que el aire de la cámara se encuentra a una temperatura inferior a la temperatura de congelación de los productos. De esta forma se puede observar el comportamiento de la pérdida de materia y de la temperatura interna durante la refrigeración, la congelación y el almacenamiento congelado de los productos.

5.2 RESULTADOS

Las experiencias realizadas permitieron la obtención de curvas de pérdida peso en función del tiempo. Con el empleo de las mismas se puede evaluar el comportamiento de los distintos productos seleccionados.

Cada experiencia se desarrolla en condiciones operativas constantes. En el caso particular de los cilindros de peceto, también se estudiaron condiciones de temperatura y velocidad variables con el tiempo. Los resultados obtenidos en las mismas se emplearon para

DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE PÉRDIDA DE PESO

validar el modelo matemático y estudiar su respuesta frente a distintas condiciones de contorno.

5.2.1 CONDICIONES OPERATIVAS CONSTANTES

Las condiciones operativas seleccionadas para el desarrollo de las experiencias se describen a continuación:

Tabla 5.1: Condiciones operativas empleadas en las experiencias realizadas con hamburguesas.

Condición	T _a (°C)	T _{ini} (°C)	v (m/s)	HR (%)	E (cm)
HC1	-25.0	2.8	5.0	63.3	1.5
HC2	-25.0	14.6	2.7	57.4	1.5
HC3	-25.0	9.8	1.1	57.7	1.5
HC4	-20.2	4.5	5.0	80.0	1.5
HC5	-20.1	14.2	2.7	80.0	1.5
HC6	-20.2	15.4	1.1	49.8	1.5
HC7	-29.2	6.3	5.0	65.0	2.0
HC8	-29.1	11.1	2.7	63.6	2.0
HC9	-28.8	15.5	1.1	64.0	2.0

Tabla 5.2: Condiciones operativas empleadas en las experiencias realizadas con albóndigas.

Condición	T _a (°C)	T _{ini} (°C)	v (m/s)	HR (%)	D (cm)
AC1	-29.8	5.8	5.0	61.9	5.0
AC2	-29.9	9.0	2.7	63.3	5.0
AC3	-28.4	10.9	1.1	65.3	5.0
AC4	-24.9	16.2	5.0	66.0	5.0
AC5	-24.9	8.5	2.7	70.7	5.0
AC6	-23.9	7.0	1.1	70.0	5.0

DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE PÉRDIDA DE PESO

Tabla 5.2: Condiciones operativas empleadas en las experiencias realizadas con albóndigas (continuación).

Condición	T _a (°C)	T _{ini} (°C)	v (m/s)	HR (%)	D (cm)
AC7	-20.0	10.5	5.0	66.0	5.0
AC8	-20.1	9.5	2.7	66.0	5.0
AC9	-19.8	13.1	1.1	64.6	5.0

Tabla 5.3: Condiciones operativas empleadas en las experiencias realizadas con cilindros de peceto.

Condición	T _a (°C)	T _{ini} (°C)	v (m/s)	HR (%)	D (cm)
PC1	-29.8	11.1	5.0	62.3	2.7
PC2	-29.7	9.1	2.7	70.0	2.7
PC3	-29.2	8.6	1.1	62.6	2.7
PC4	-20.2	9.6	5.0	63.3	2.7
PC5	-19.9	9.7	2.7	63.3	2.7
PC6	-20.1	14.1	1.1	64.6	2.7
PC7	-25.6	8.9	5.0	57.9	2.7
PC8	-24.2	10.7	2.7	57.9	2.7
PC9	-23.6	12.9	1.1	57.2	2.7

Tabla 5.4: Condiciones operativas empleadas en las experiencias realizadas con pechugas de pollo.

Condición	T _a (°C)	T _{ini} (°C)	v (m/s)	HR (%)	E (cm)
POC1	-29.5	16.6	5.0	80.0	1.5
POC2	-29.7	9.8	2.7	80.0	1.5
POC3	-28.9	12.4	1.1	61.9	1.5

DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE PÉRDIDA DE PESO

Tabla 5.4: Condiciones operativas empleadas en las experiencias realizadas con pechugas de pollo (continuación).

Condición	T _a (°C)	T _{ini} (°C)	v (m/s)	HR (%)	E (cm)
POC4	-24.8	12.3	5.0	80.0	1.5
POC5	-24.7	12.7	2.7	80.0	1.5
POC6	-24.0	12.4	1.1	64.6	1.5
POC7	-19.8	15.3	5.0	68.7	2.2
POC8	-20.1	7.8	2.74	80.0	1.5
POC9	-19.7	8.1	1.1	63.3	1.5

Las experiencias se realizaron por duplicado y los resultados que se muestran corresponden a una de las muestras en cada condición operativa, pero son representativos de cada situación.

Para analizar los resultados obtenidos, en primer lugar se observa la forma general que presentan las curvas de pérdida de peso en función del tiempo.

Las Figuras 5.1 a 5.8 muestran las curvas de pérdida de peso y de la temperatura del centro de las muestras en distintas condiciones de operación. En todos los casos, la curva continua corresponde a la temperatura, mientras que el peso de las muestras se presenta con símbolos. En las mismas se puede observar que la curva de temperatura interna del producto presenta tres cambios de pendiente. El primero coincide con el momento en el cual el alimento se congela, el segundo cuando culmina el cambio de estado, mientras que el último ocurre cuando la temperatura interna alcanza la temperatura del aire. En el caso de las curvas de pérdida de peso presentan un solo cambio de pendiente pronunciado que ocurre cuando la temperatura de la muestra alcanza la temperatura del aire. Este comportamiento se explica teniendo en cuenta los fenómenos puestos en juego en la congelación y en el almacenamiento congelado. En principio, el producto pierde peso por evaporación del agua líquida, luego cuando la superficie comienza a congelarse la pérdida de peso se debe a la sublimación del hielo. En ambas situaciones las fuerzas impulsoras son las diferencias de presiones de vapor y de temperaturas entre la superficie del alimento y el seno del aire. Cuando la muestra alcanza la temperatura externa desaparece la contribución de la diferencia de temperaturas y sólo permanece la diferencia de presiones de vapor, con lo cual se produce un cambio en la velocidad de pérdida. El análisis precedente es válido para todos los productos estudiados.

DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE PÉRDIDA DE PESO

En las Figuras 5.9 a 5.44 se muestran los resultados de la pérdida de peso de las hamburguesas, albóndigas, cilindros de peceto y pechugas de pollo en las distintas condiciones de operación.

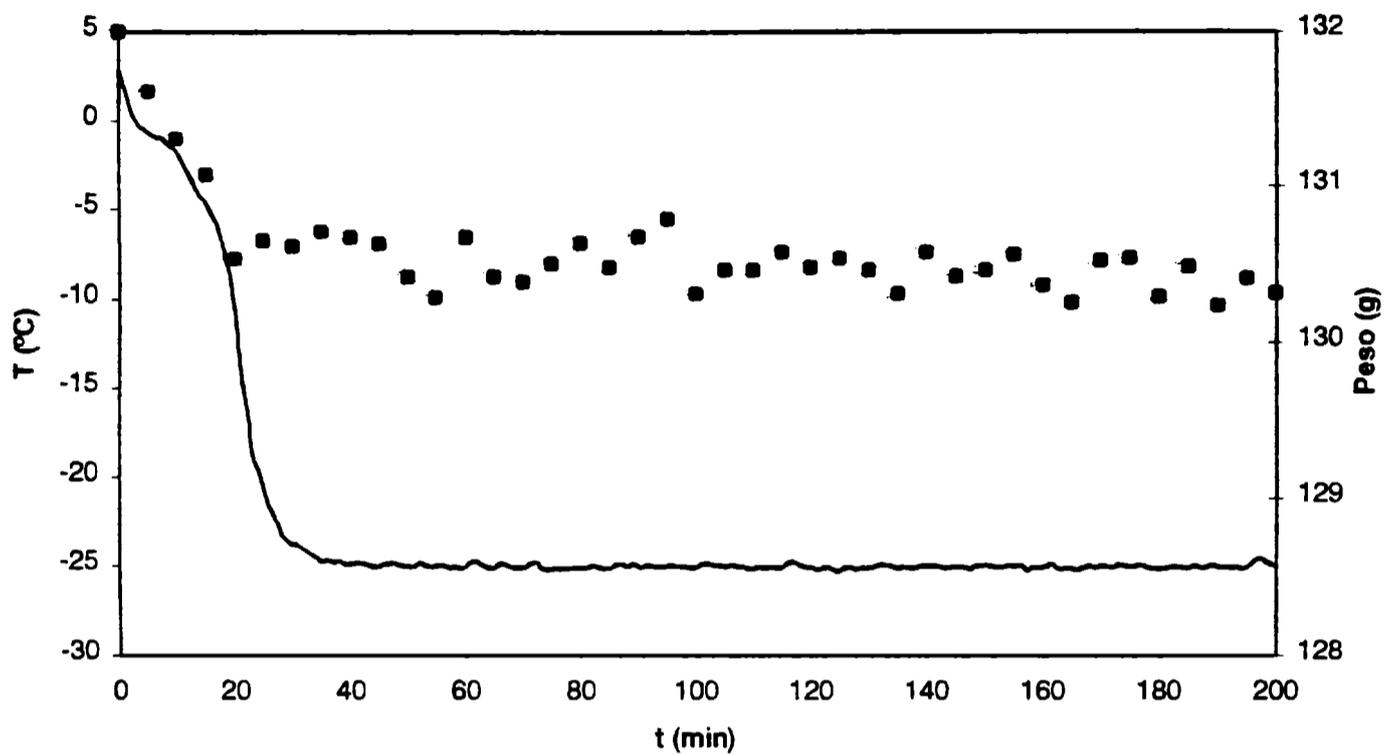


Figura 5.1: Pérdida de peso y temperatura del centro de hamburguesas en la condición HC1:

—Temperatura, ■ Peso.

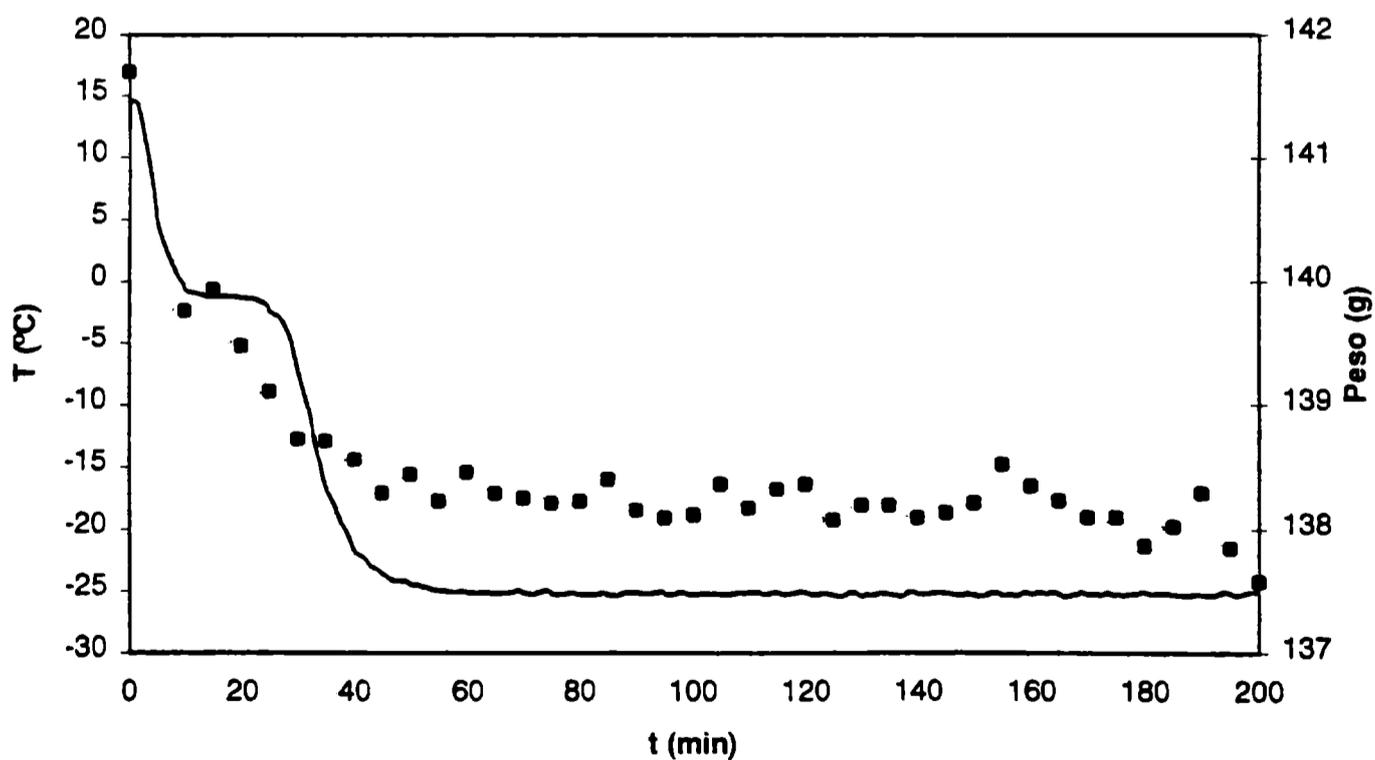


Figura 5.2: Pérdida de peso y temperatura del centro de hamburguesas en la condición HC2:

—Temperatura, ■ Peso.

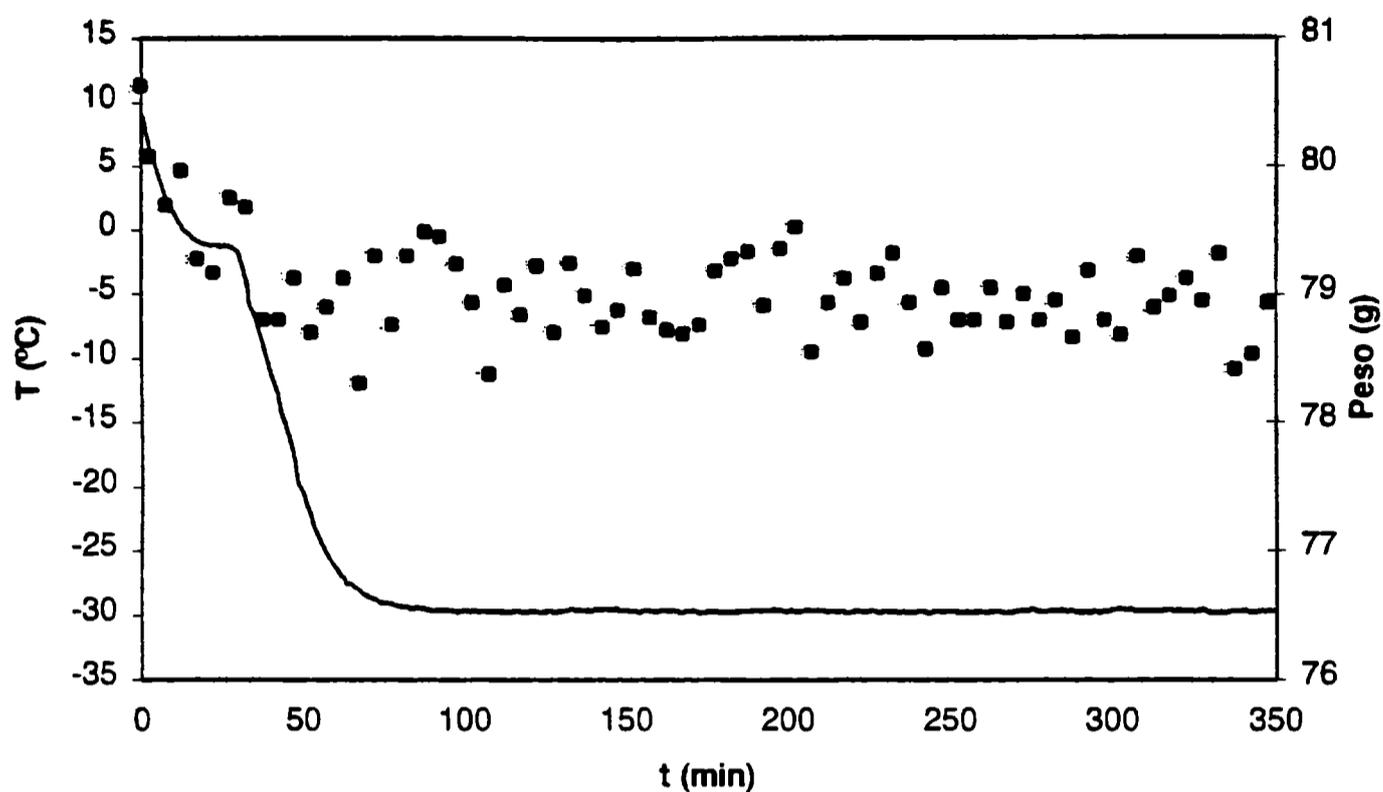


Figura 5.3: Pérdida de peso y temperatura del centro de albóndigas en la condición AC2:

—Temperatura, ■ Peso.

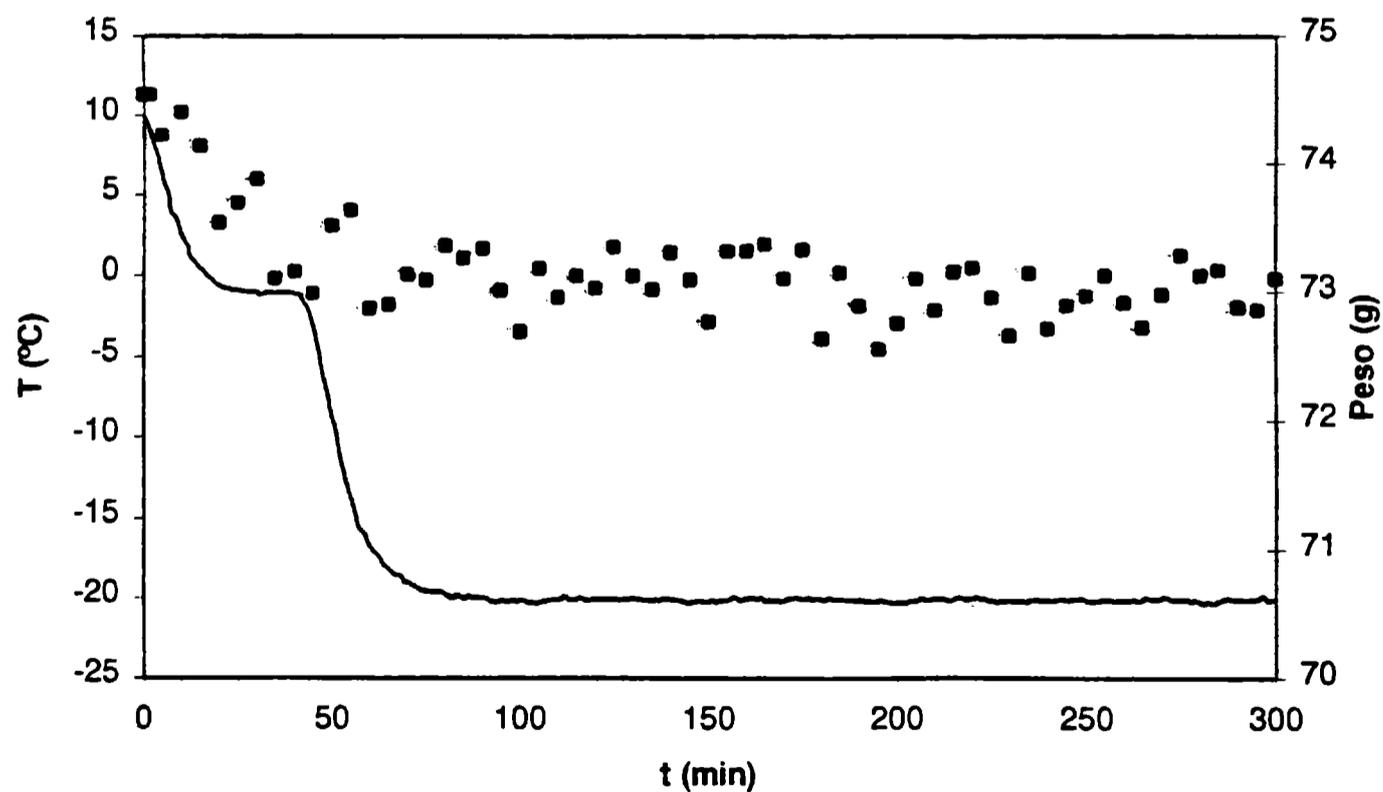


Figura 5.4: Pérdida de peso y temperatura del centro de albóndigas en la condición AC7:

—Temperatura, ■ Peso.

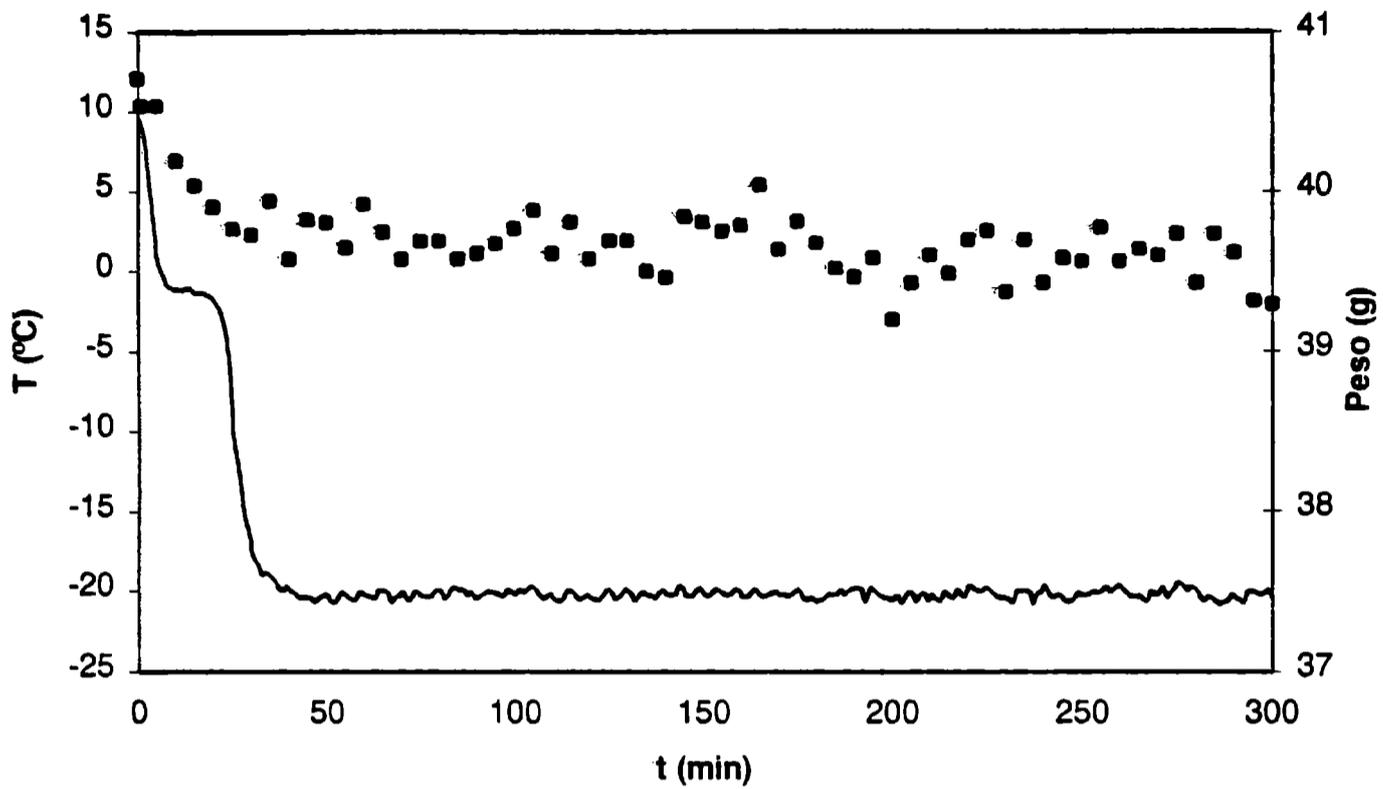


Figura 5.5: Pérdida de peso y temperatura del centro de peceto en la condición PC4:

—Temperatura, ■ Peso.

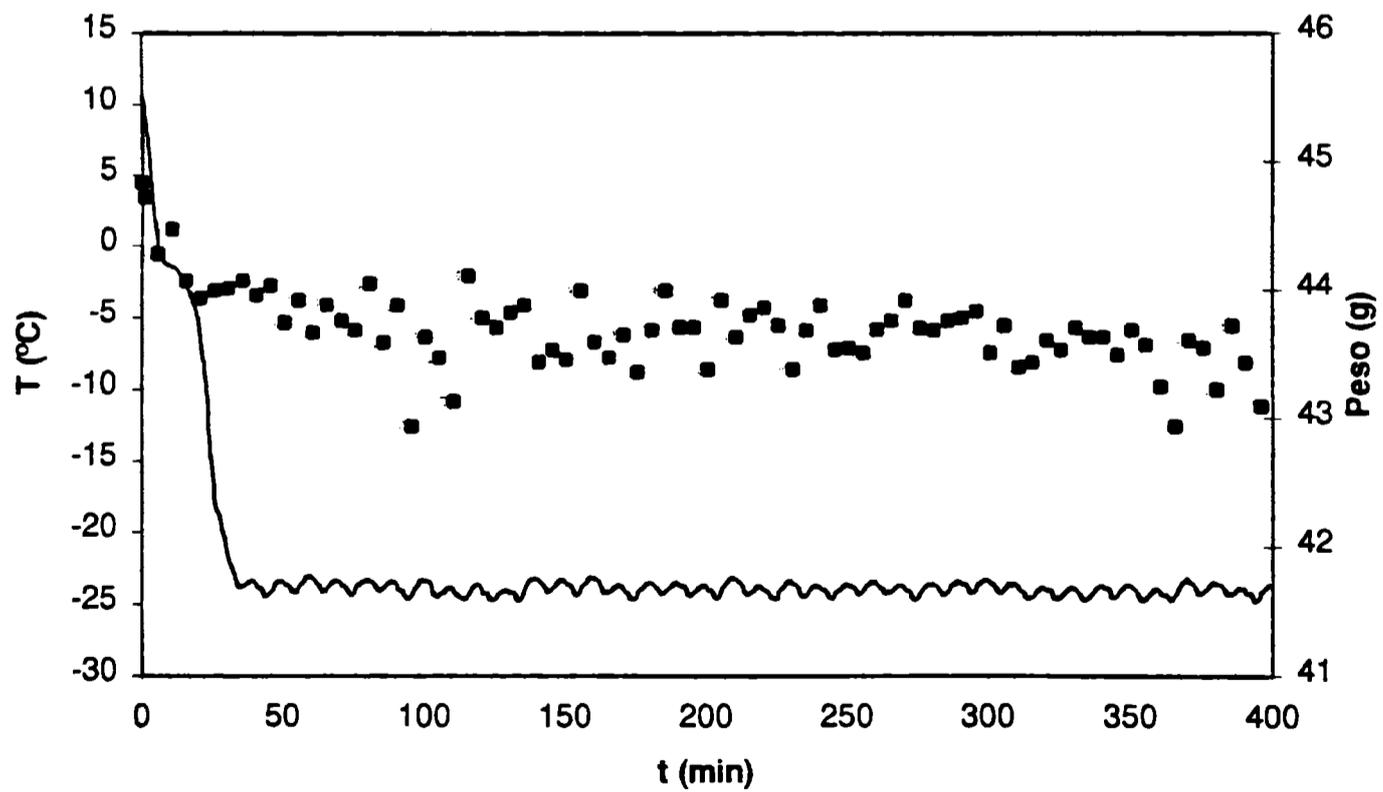


Figura 5.6: Pérdida de peso y temperatura del centro de peceto en la condición PC8:

—Temperatura, ■ Peso.

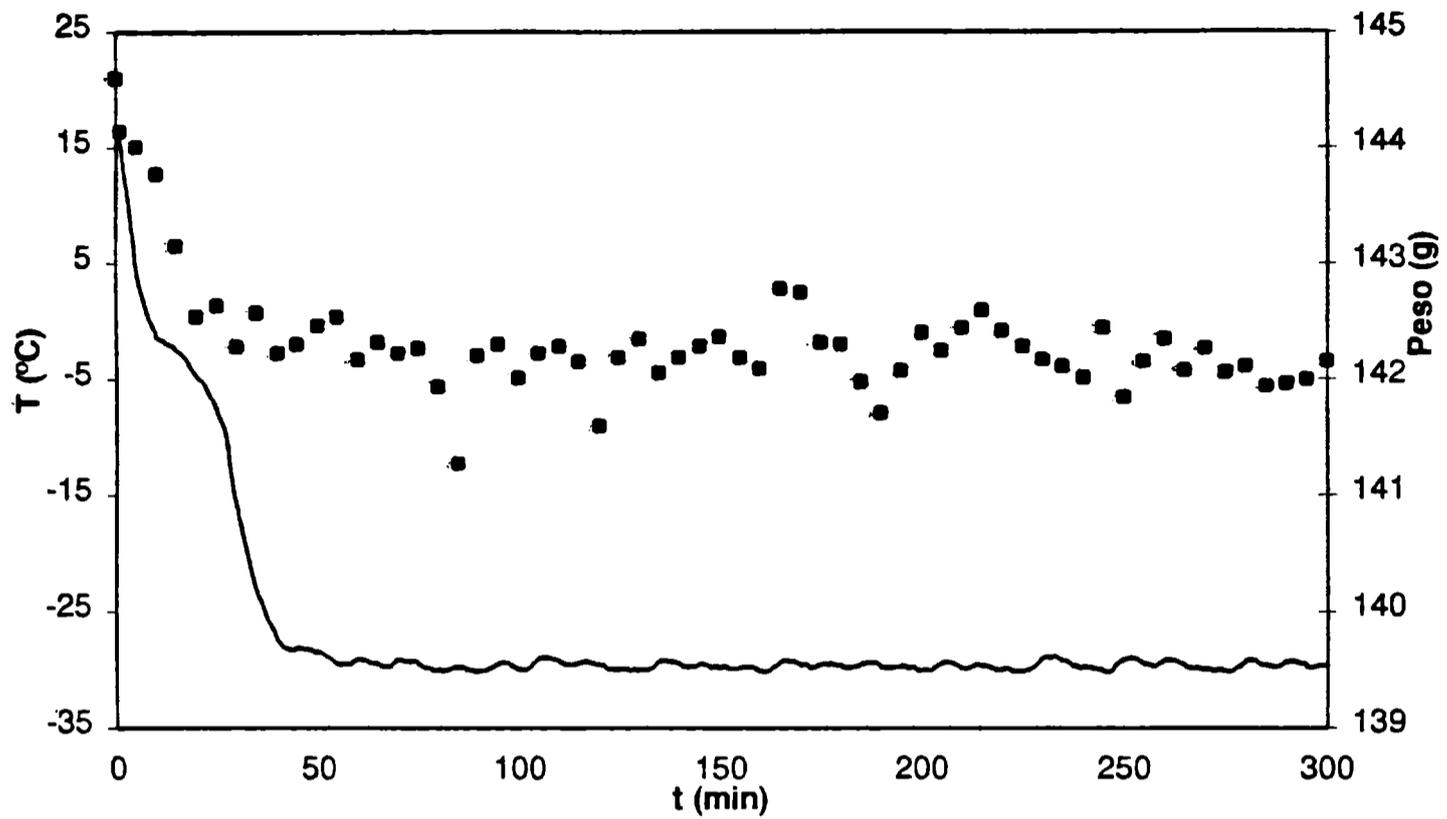


Figura 5.7: Pérdida de peso y temperatura del centro de pechugas de pollo en la condición POC1:—Temperatura, ■ Peso.

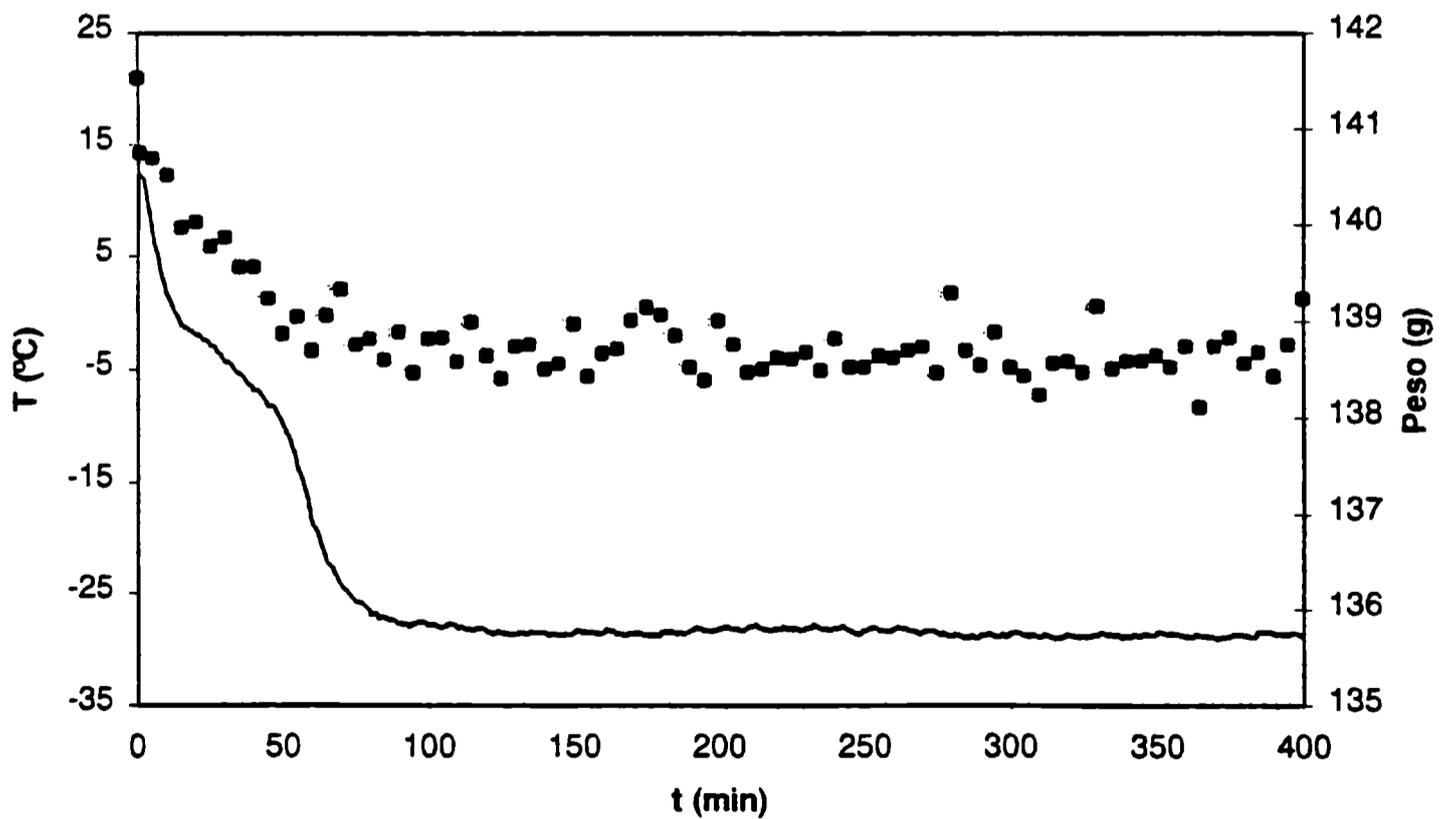


Figura 5.8: Pérdida de peso y temperatura del centro de pechugas de pollo en la condición POC3:—Temperatura, ■ Peso.

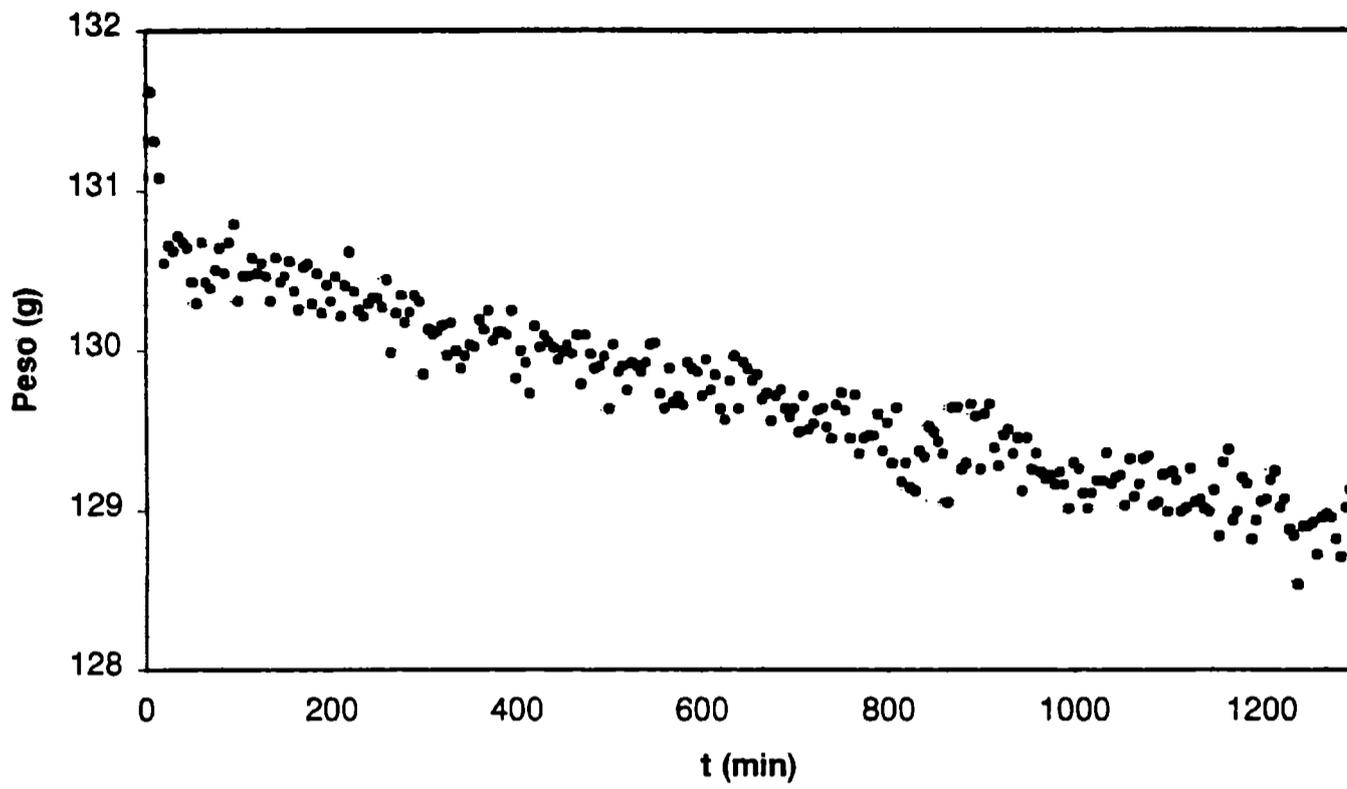


Figura 5.9: Pérdida de peso de hamburguesas en la condición HC1.

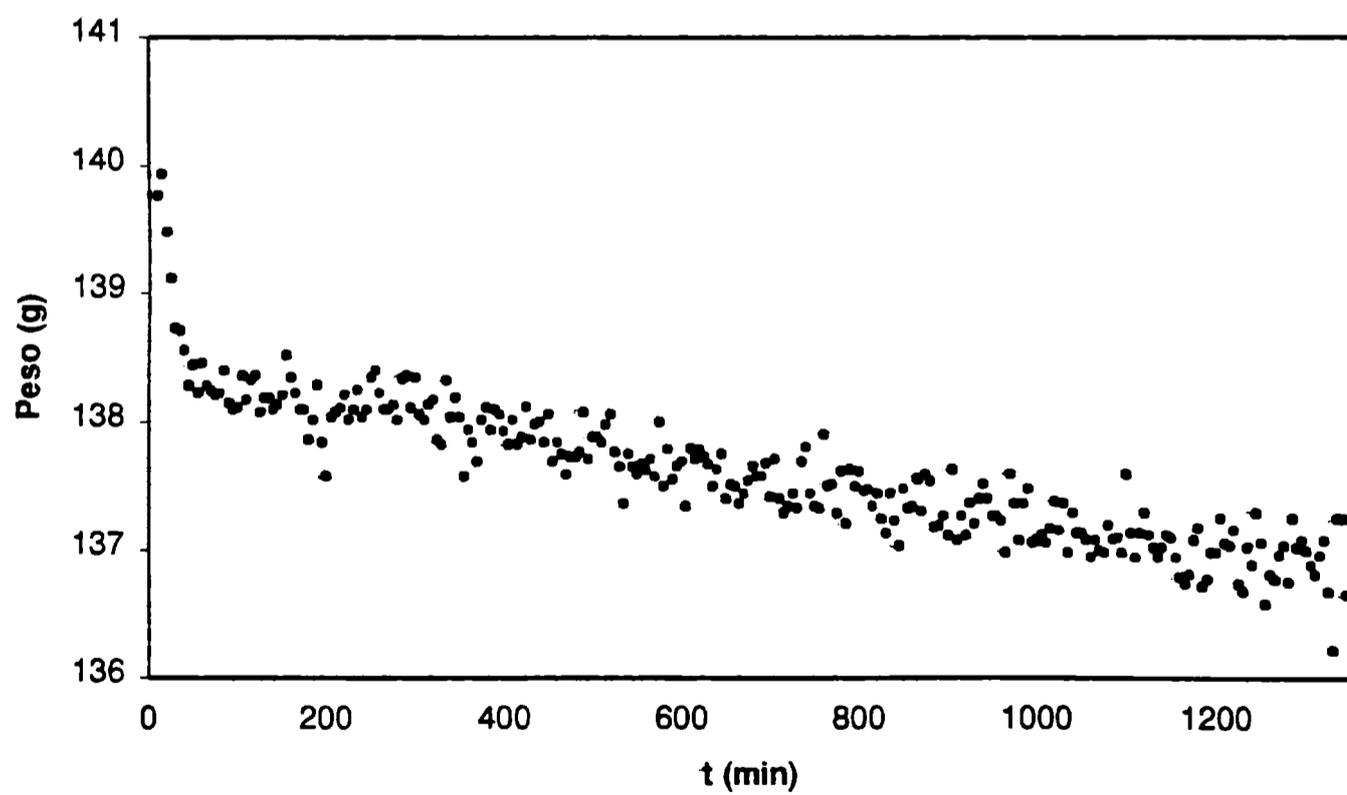


Figura 5.10: Pérdida de peso de hamburguesas en la condición HC2.

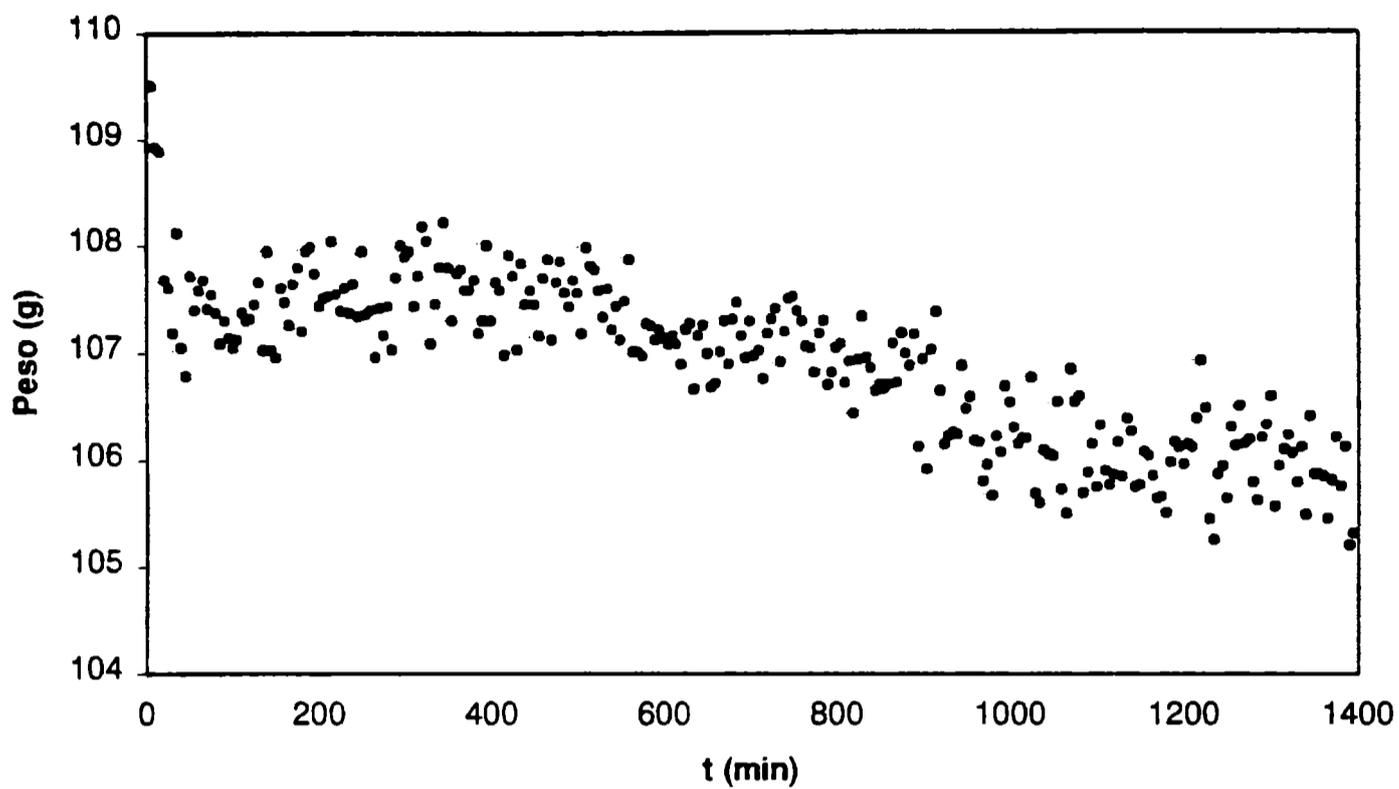


Figura 5.11: Pérdida de peso de hamburguesas en la condición HC3.

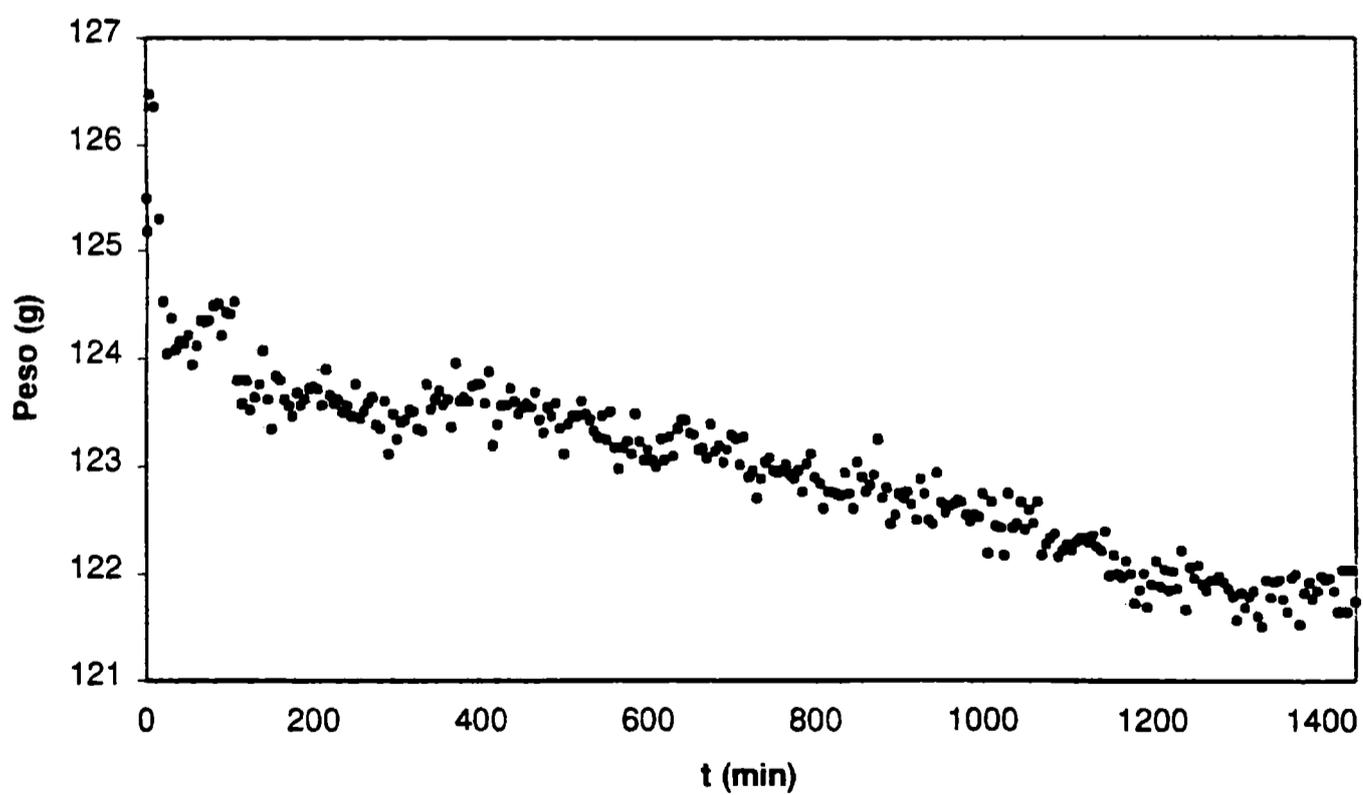


Figura 5.12: Pérdida de peso de hamburguesas en la condición HC4.

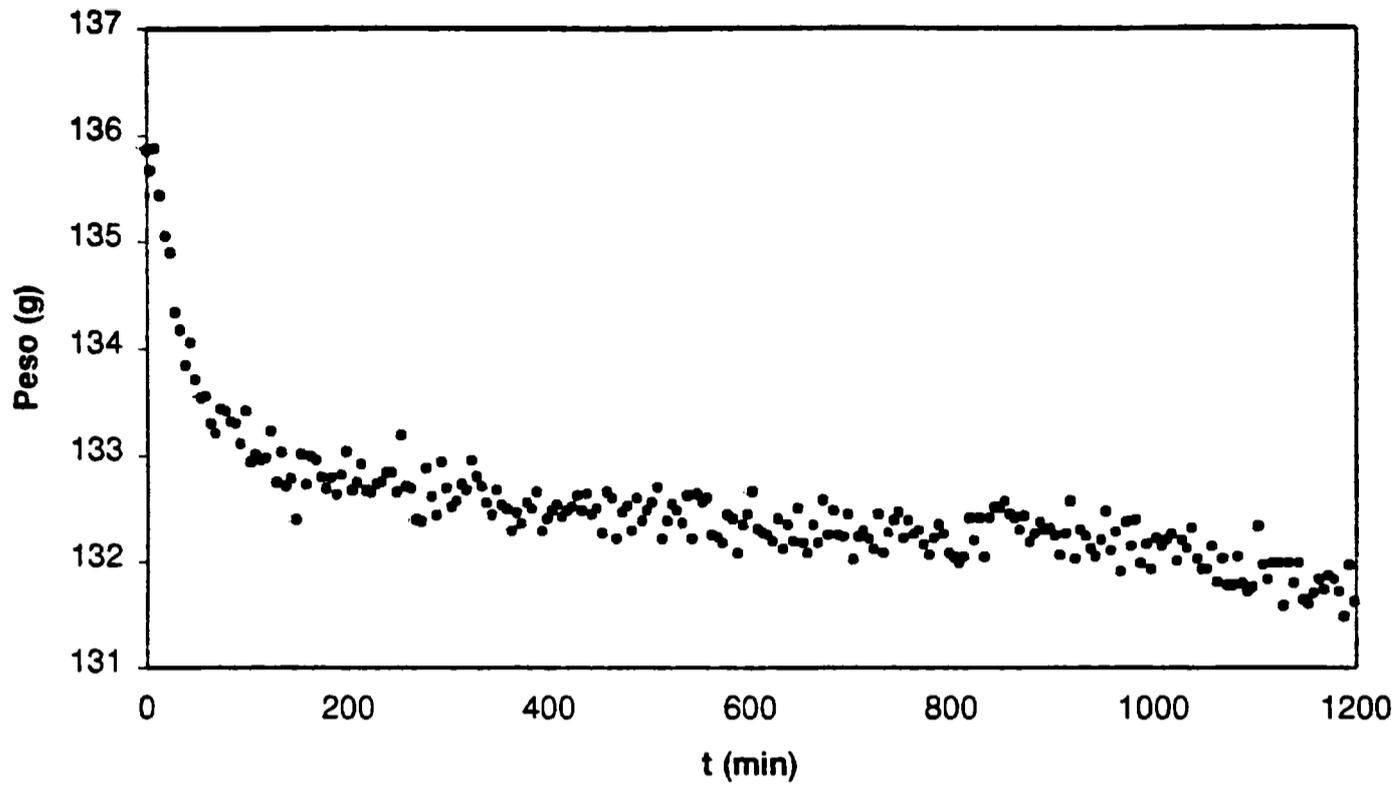


Figura 5.13: Pérdida de peso de hamburguesas en la condición HC5.

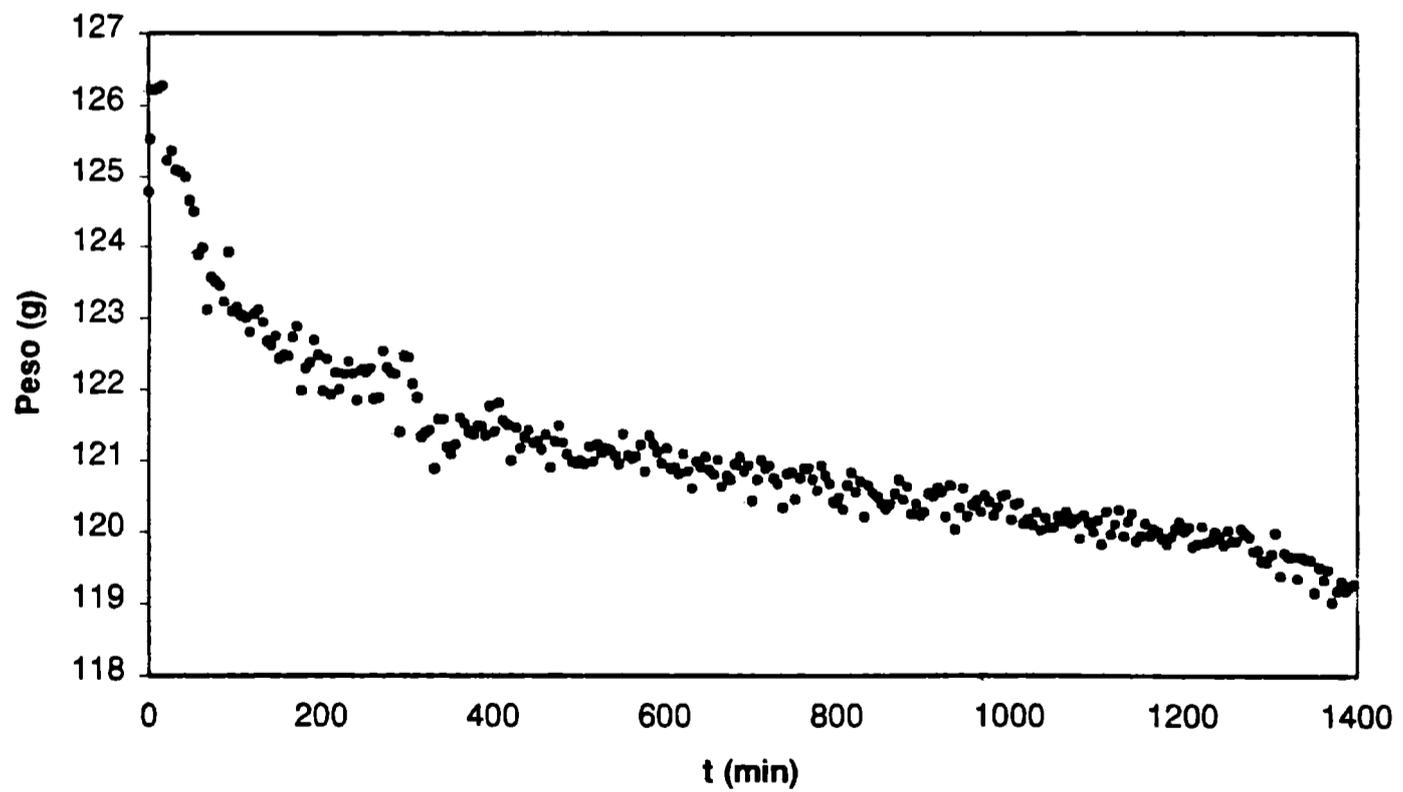


Figura 5.14: Pérdida de peso de hamburguesas en la condición HC6.

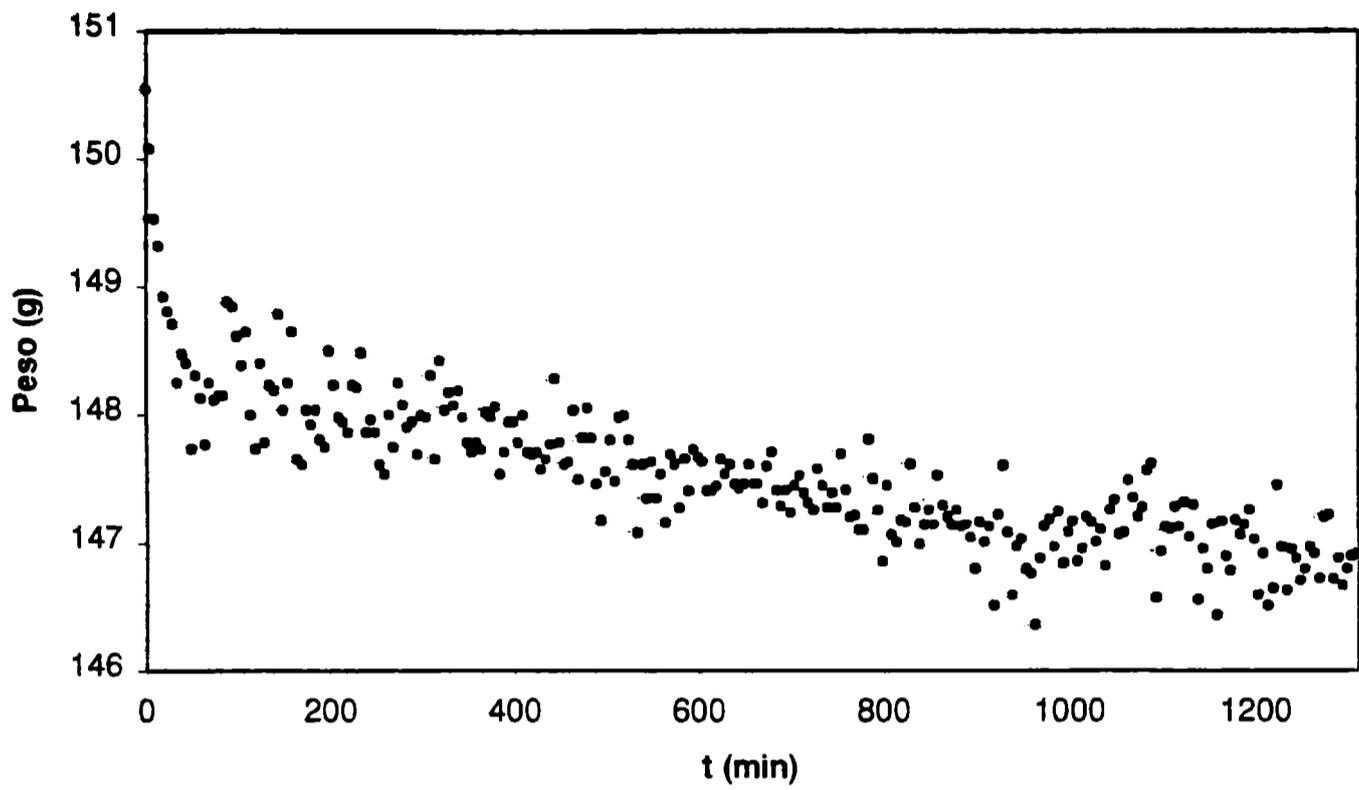


Figura 5.15: Pérdida de peso de hamburguesas en la condición HC7.

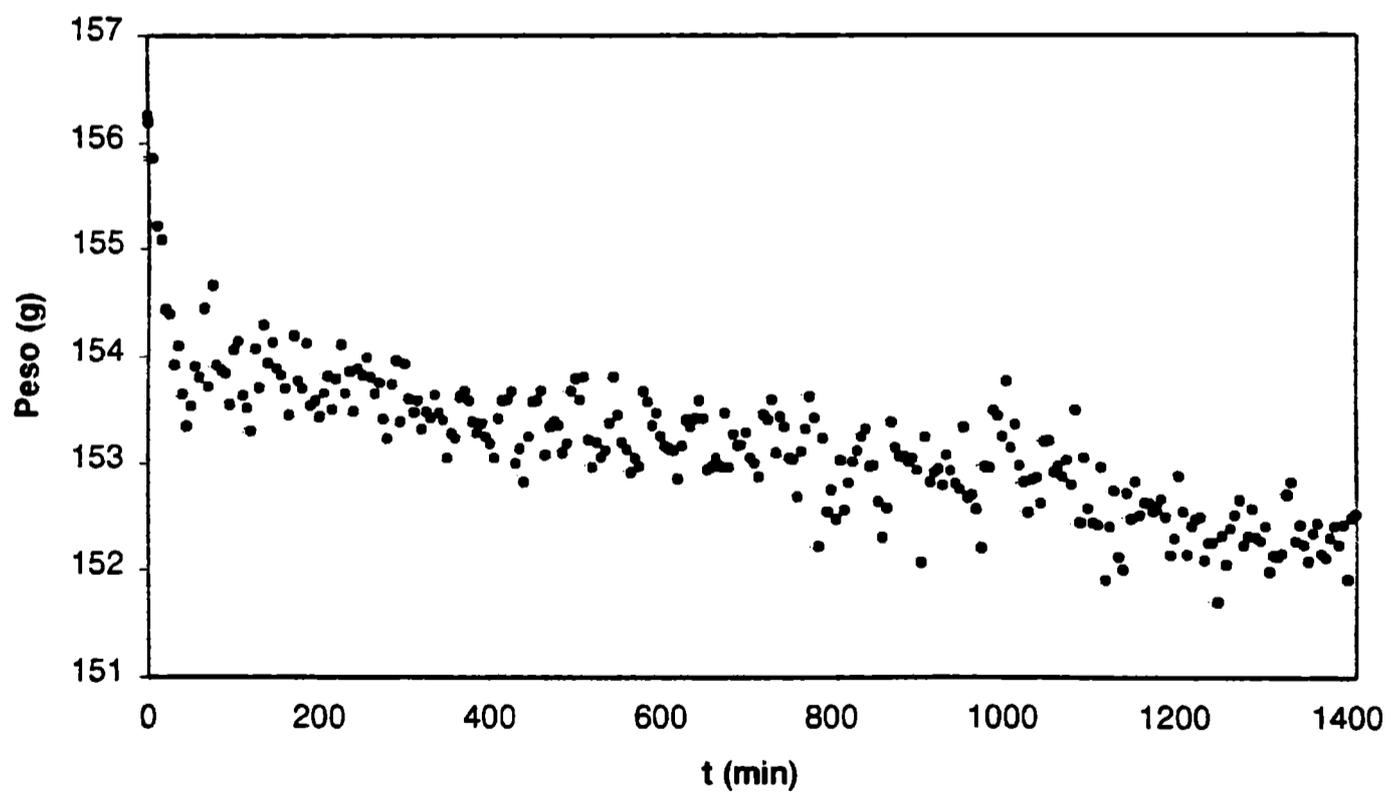


Figura 5.16: Pérdida de peso de hamburguesas en la condición HC8.

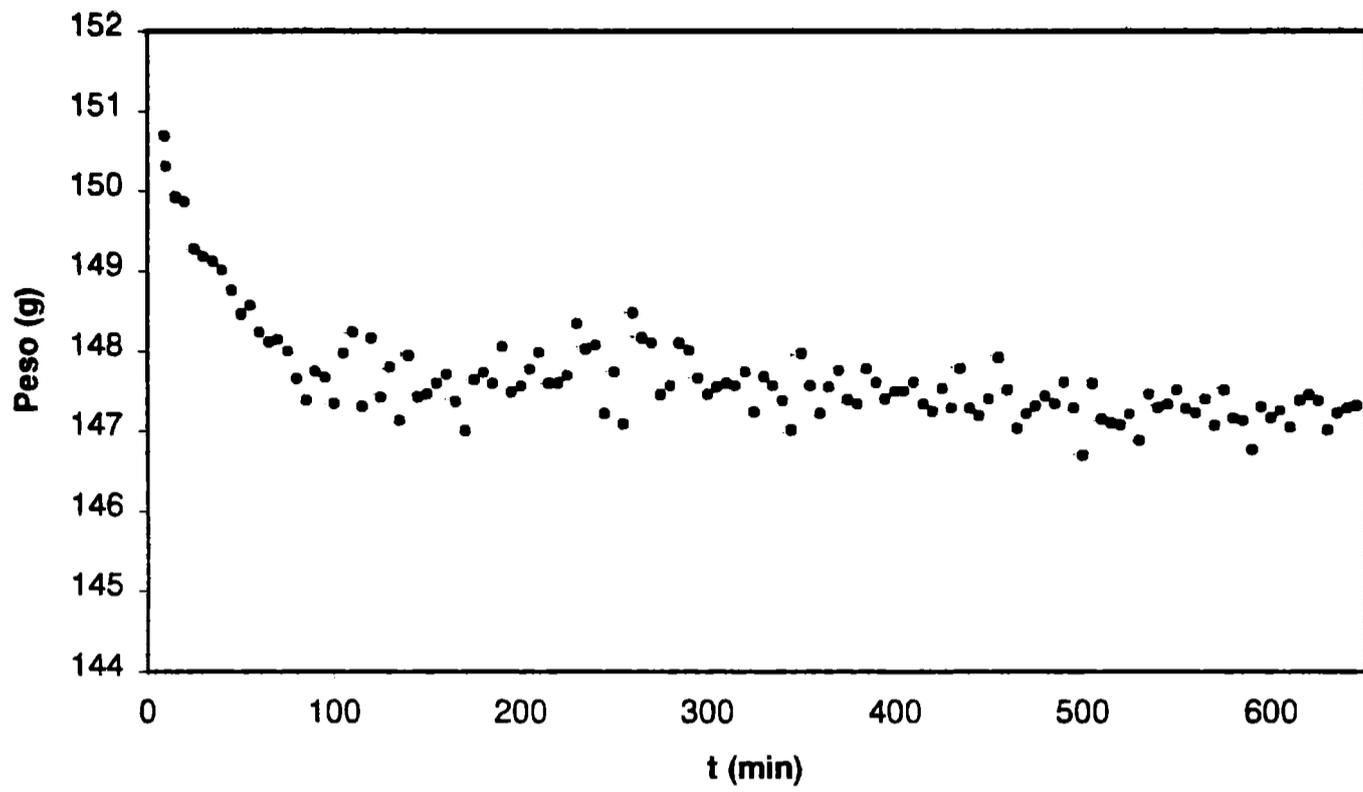


Figura 5.17: Pérdida de peso de hamburguesas en la condición HC9.

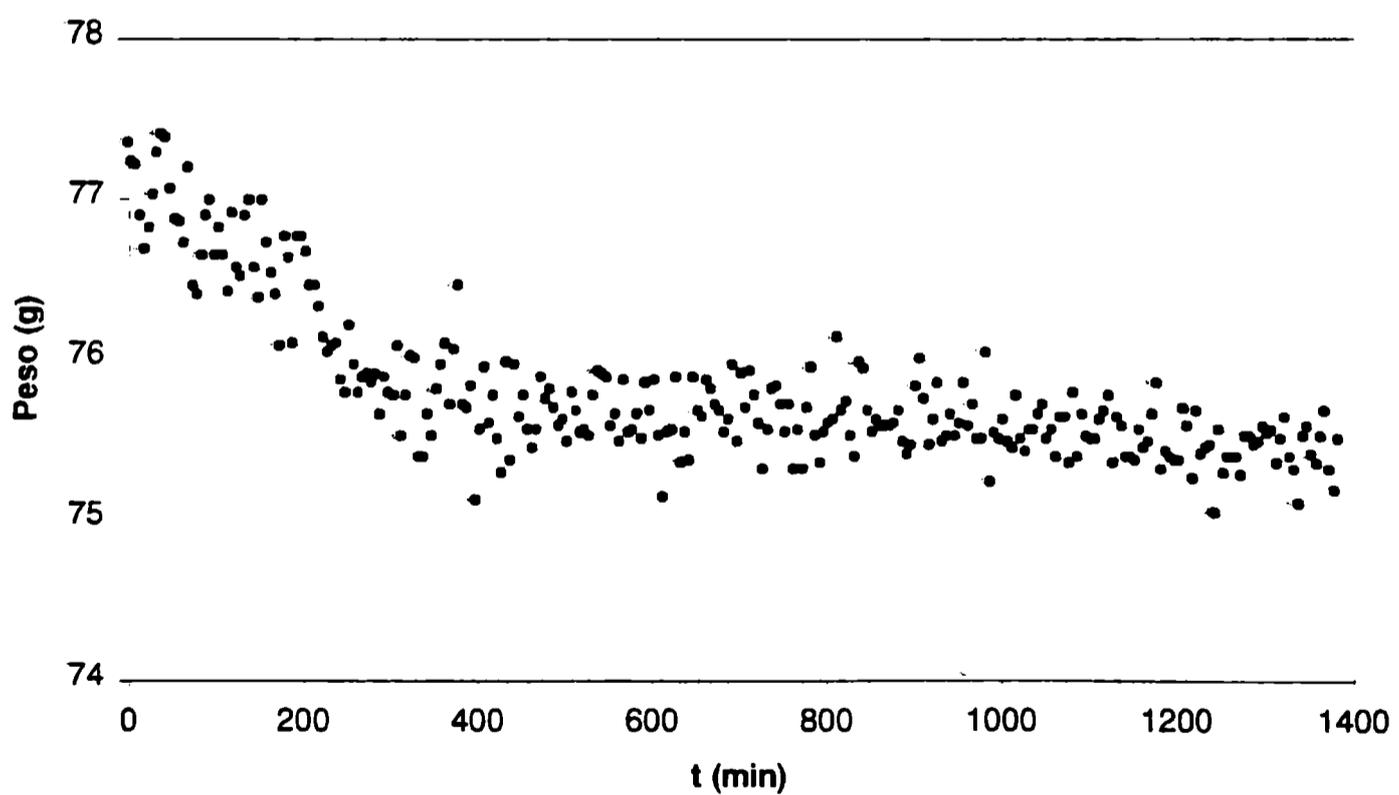


Figura 5.18: Pérdida de peso de albóndigas en la condición AC1.

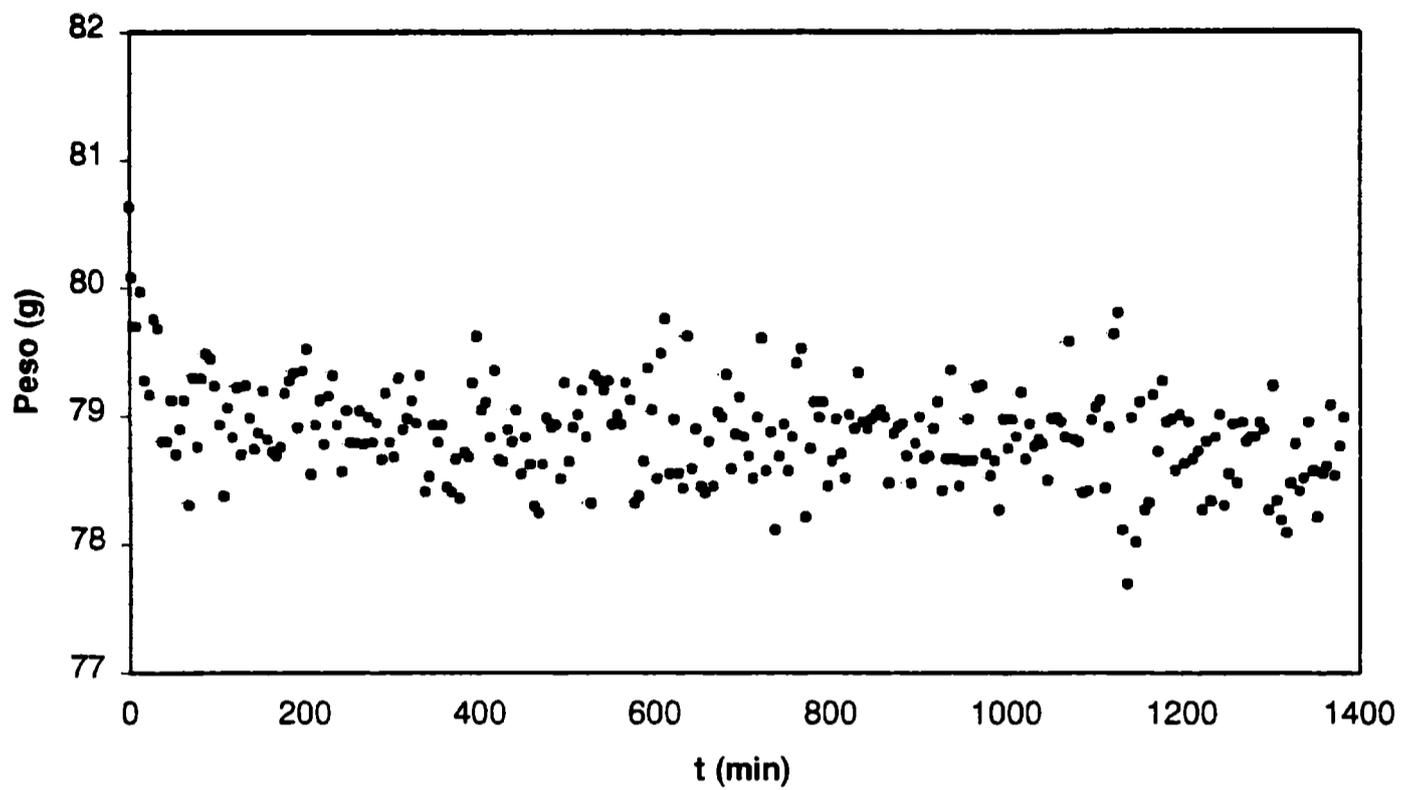


Figura 5.19: Pérdida de peso de albóndigas en la condición AC2.

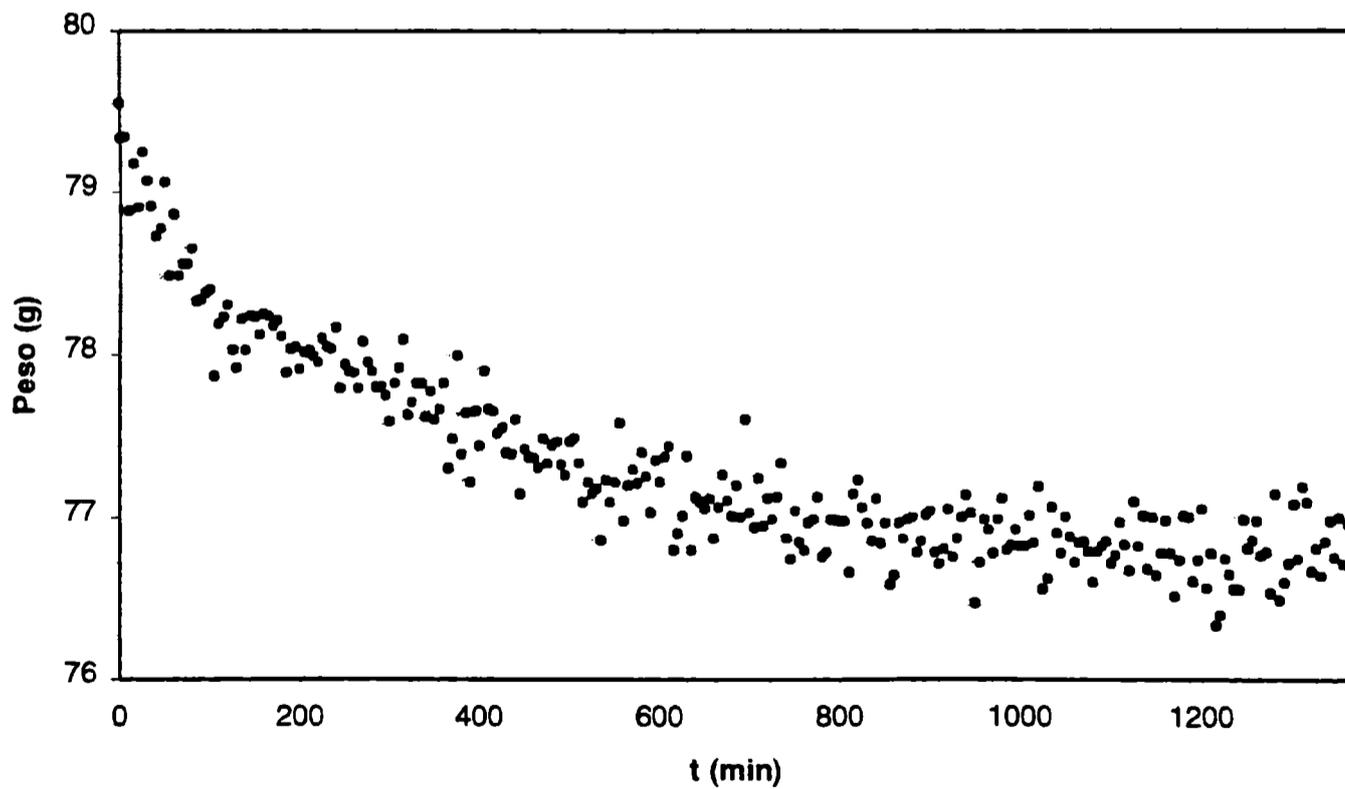


Figura 5.20: Pérdida de peso de albóndigas en la condición AC3.

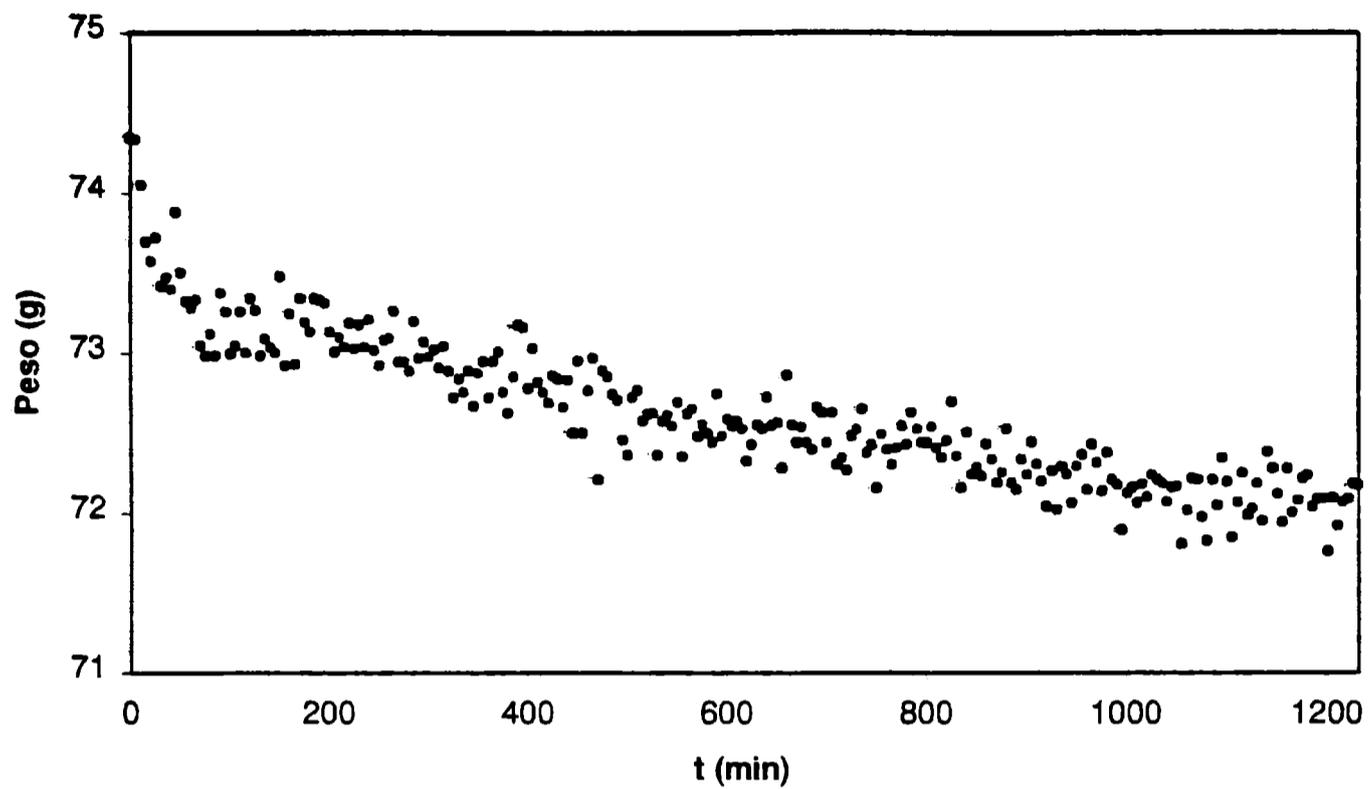


Figura 5.21: Pérdida de peso de albóndigas en la condición AC4.

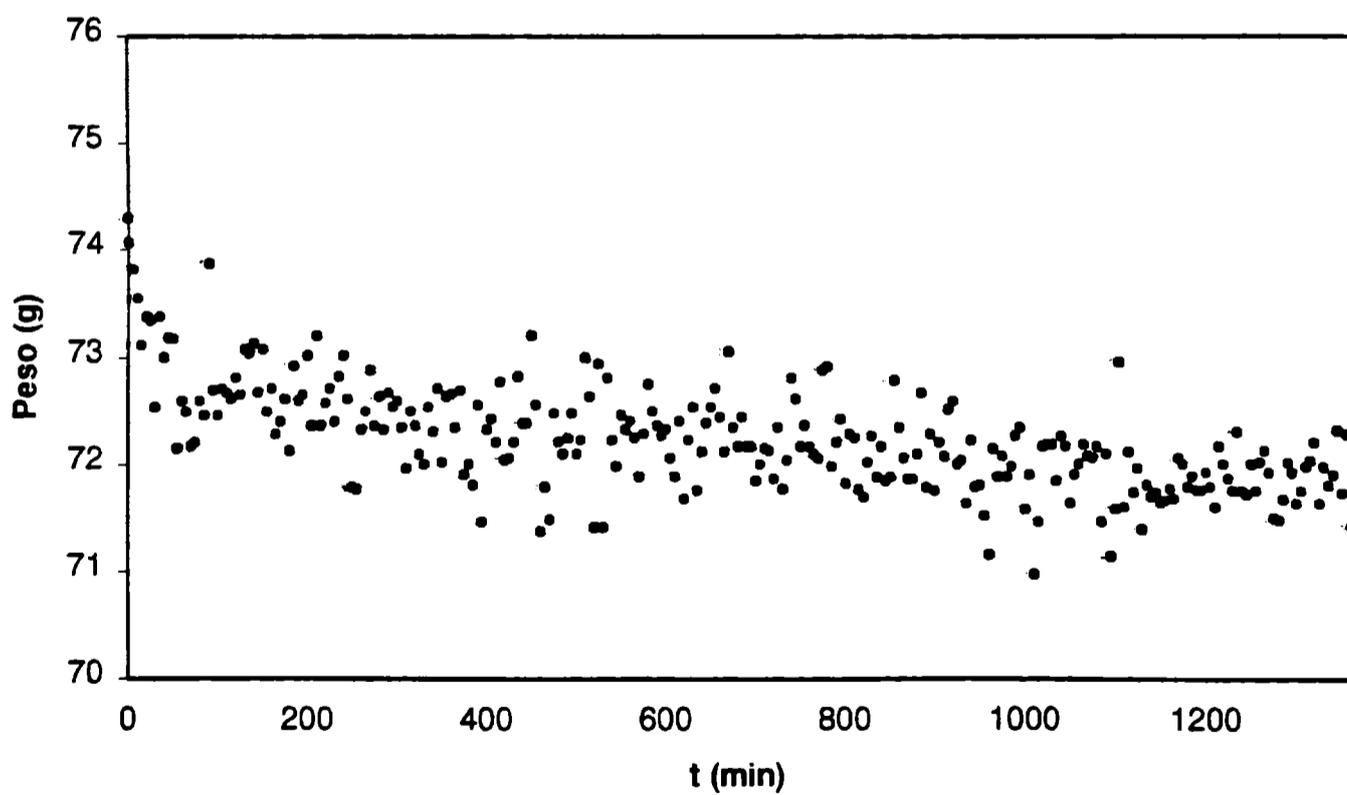


Figura 5.22: Pérdida de peso de albóndigas en la condición AC5.

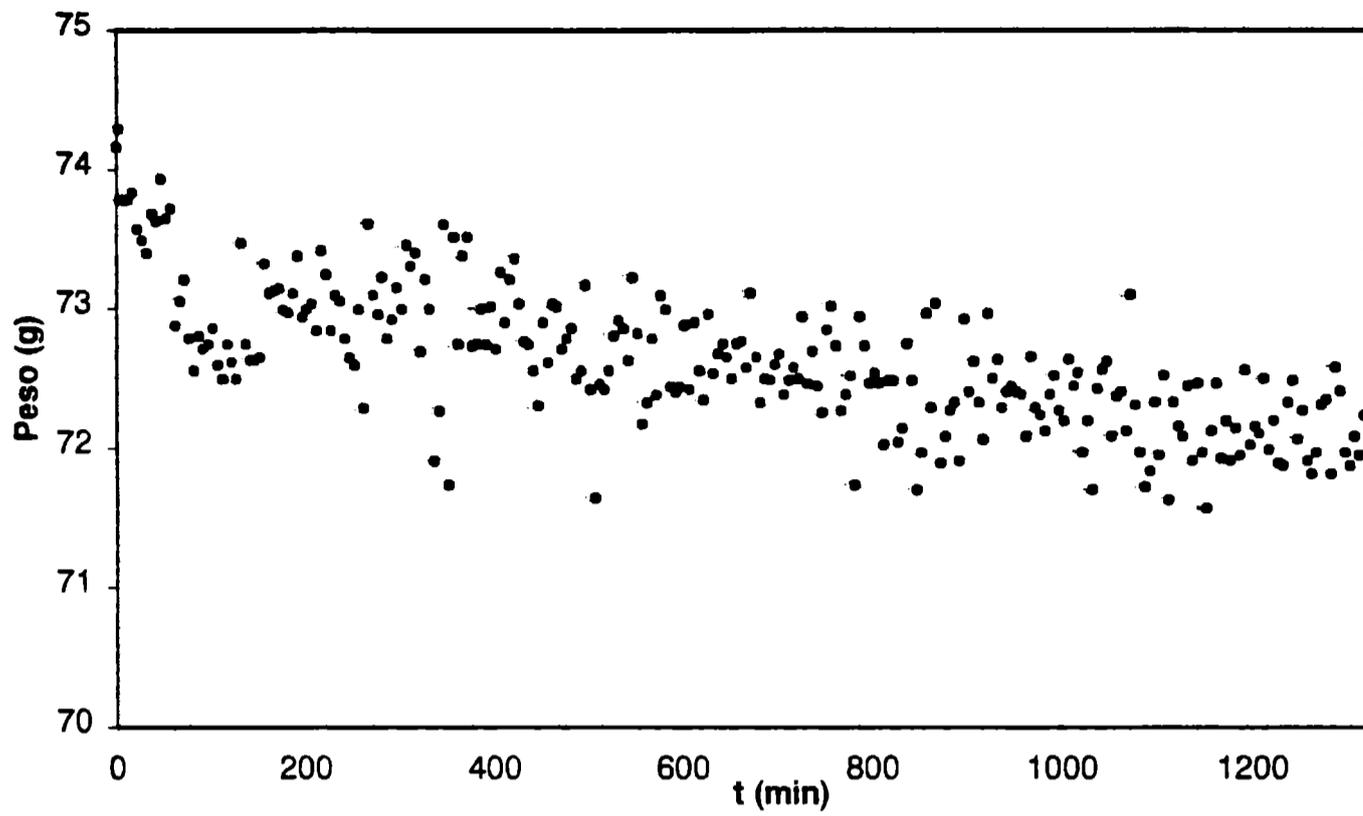


Figura 5.23: Pérdida de peso de albóndigas en la condición AC6.

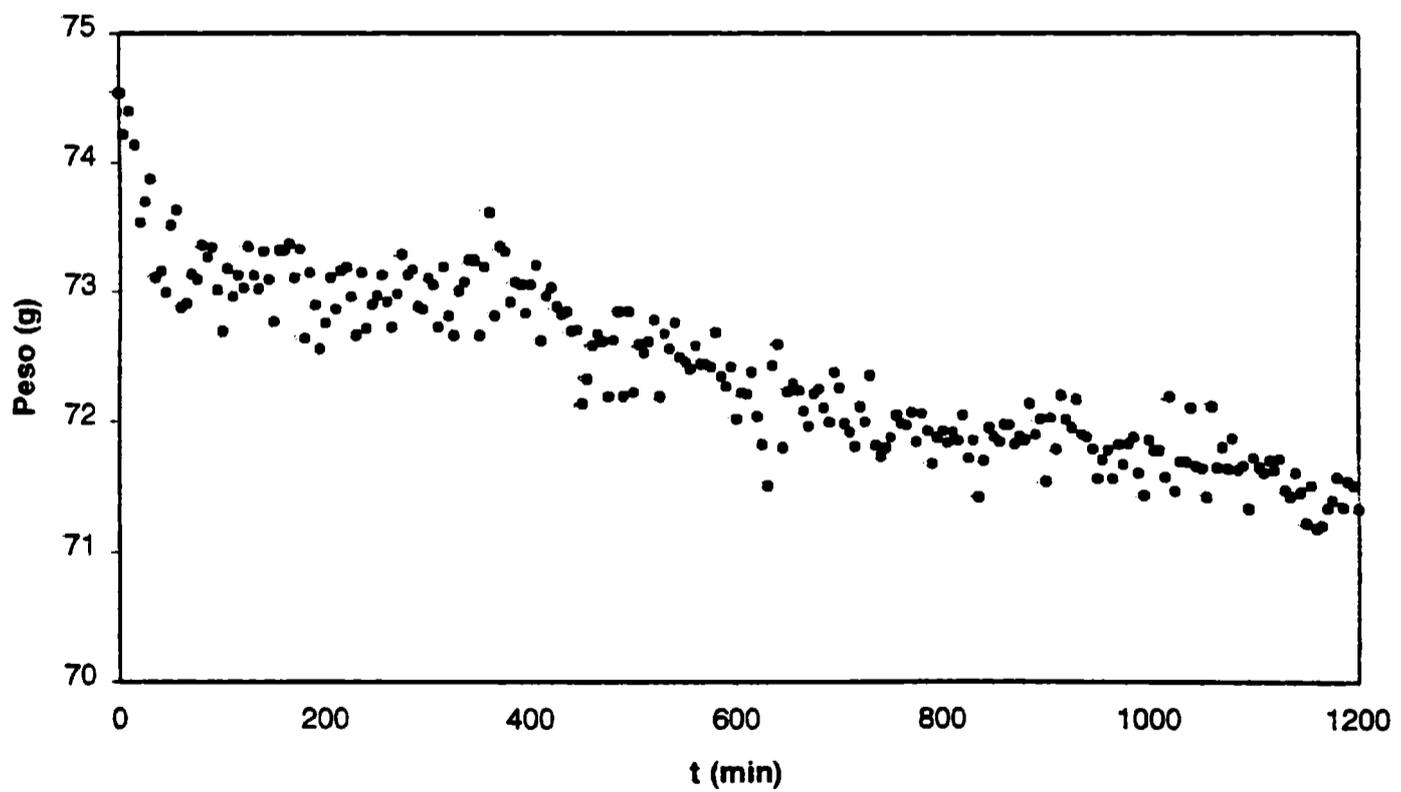


Figura 5.24: Pérdida de peso de albóndigas en la condición AC7.

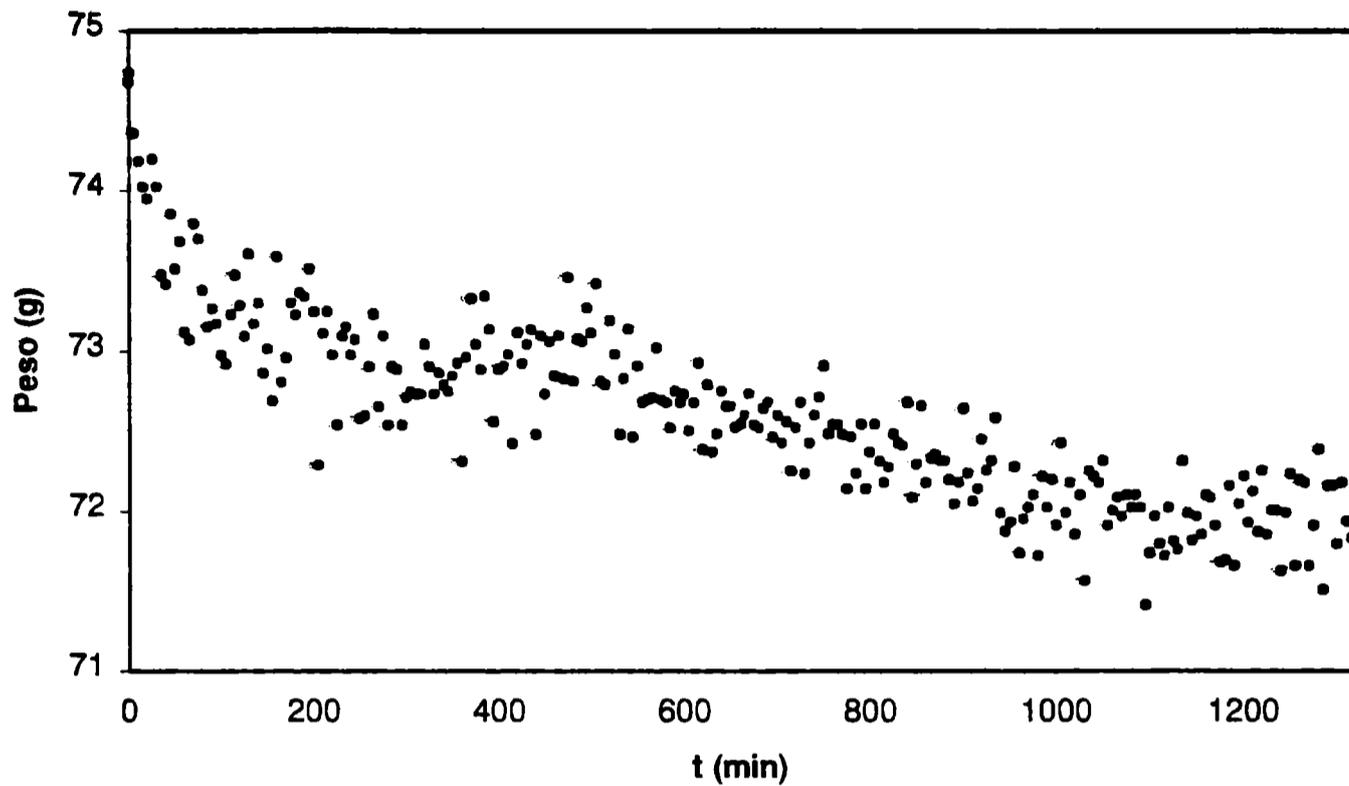


Figura 5.25: Pérdida de peso de albóndigas en la condición AC8.

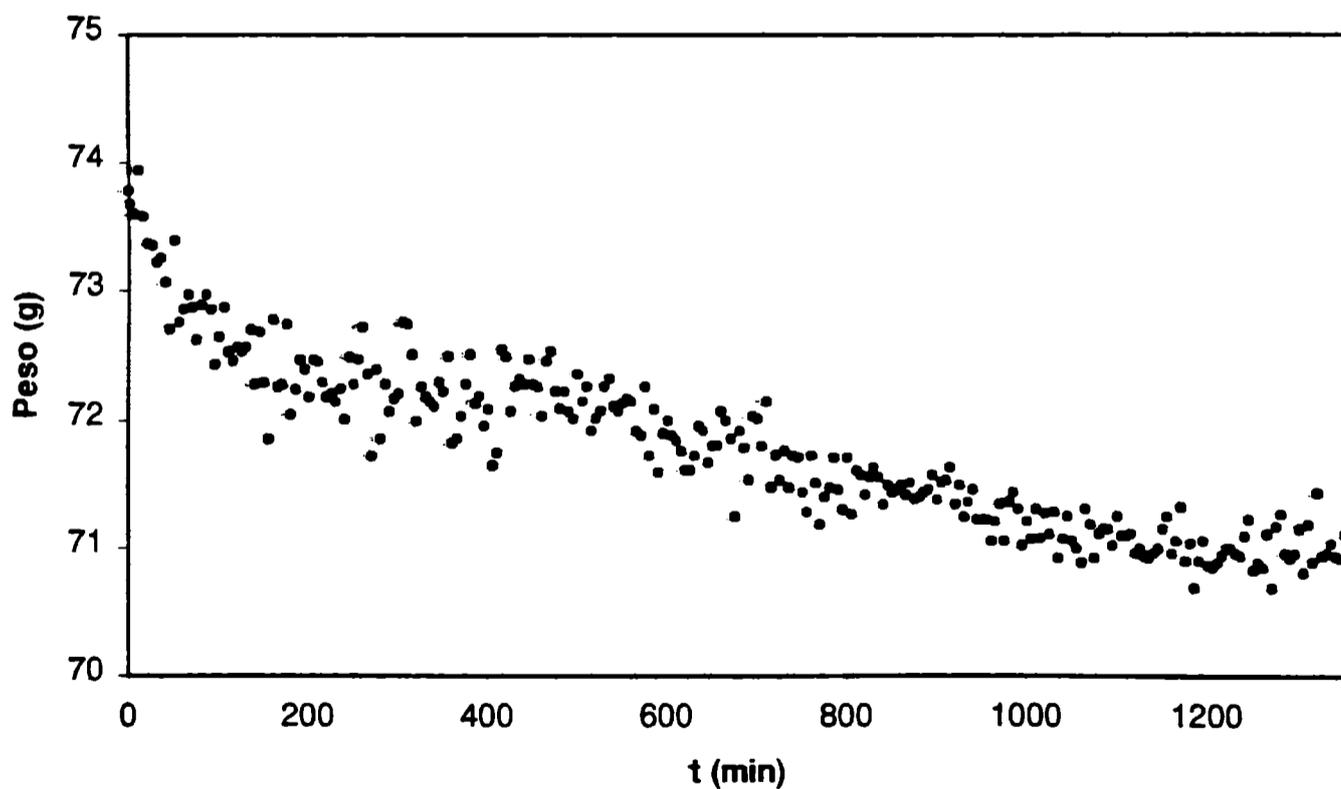


Figura 5.26: Pérdida de peso de albóndigas en la condición AC9.

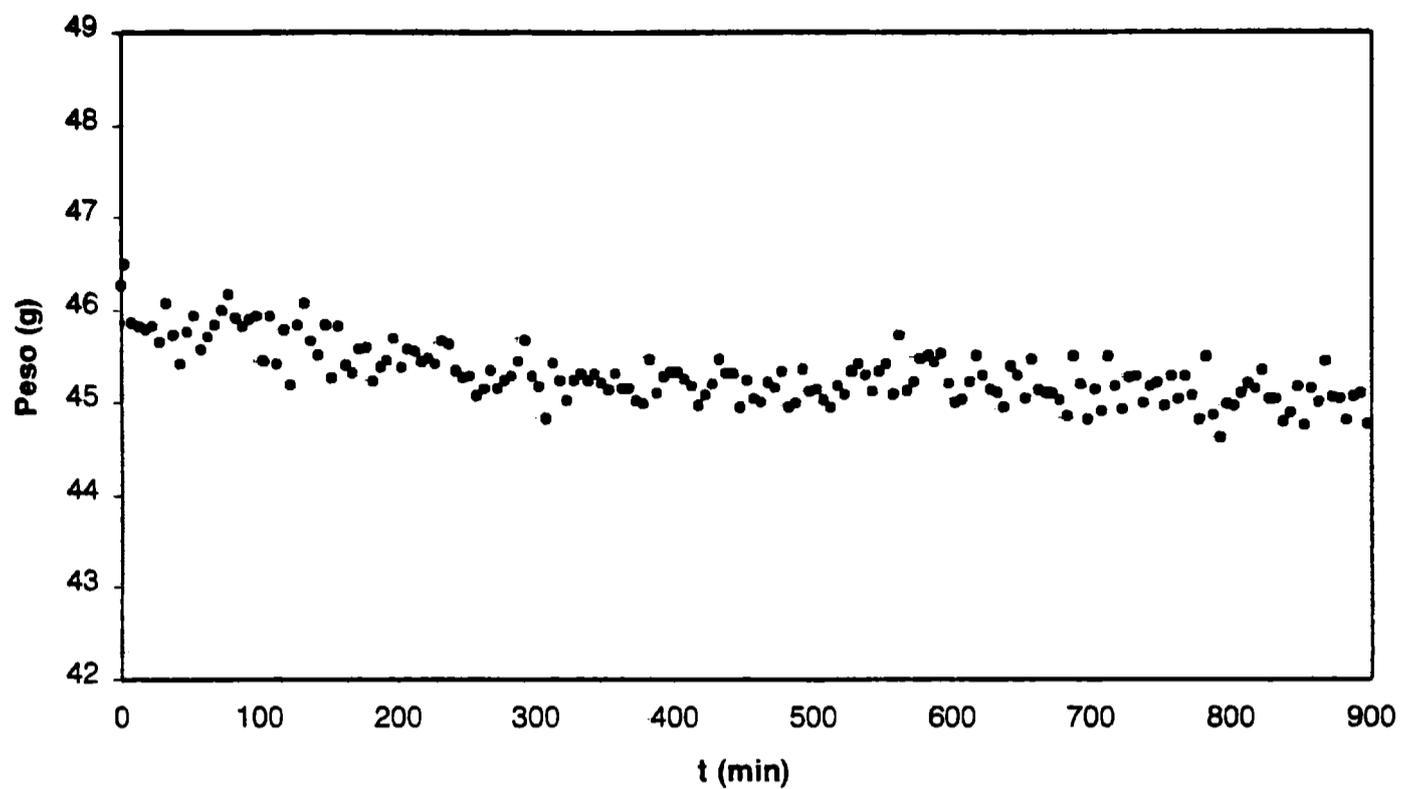


Figura 5.27: Pérdida de peso de cilindros de peceto en la condición PC1.

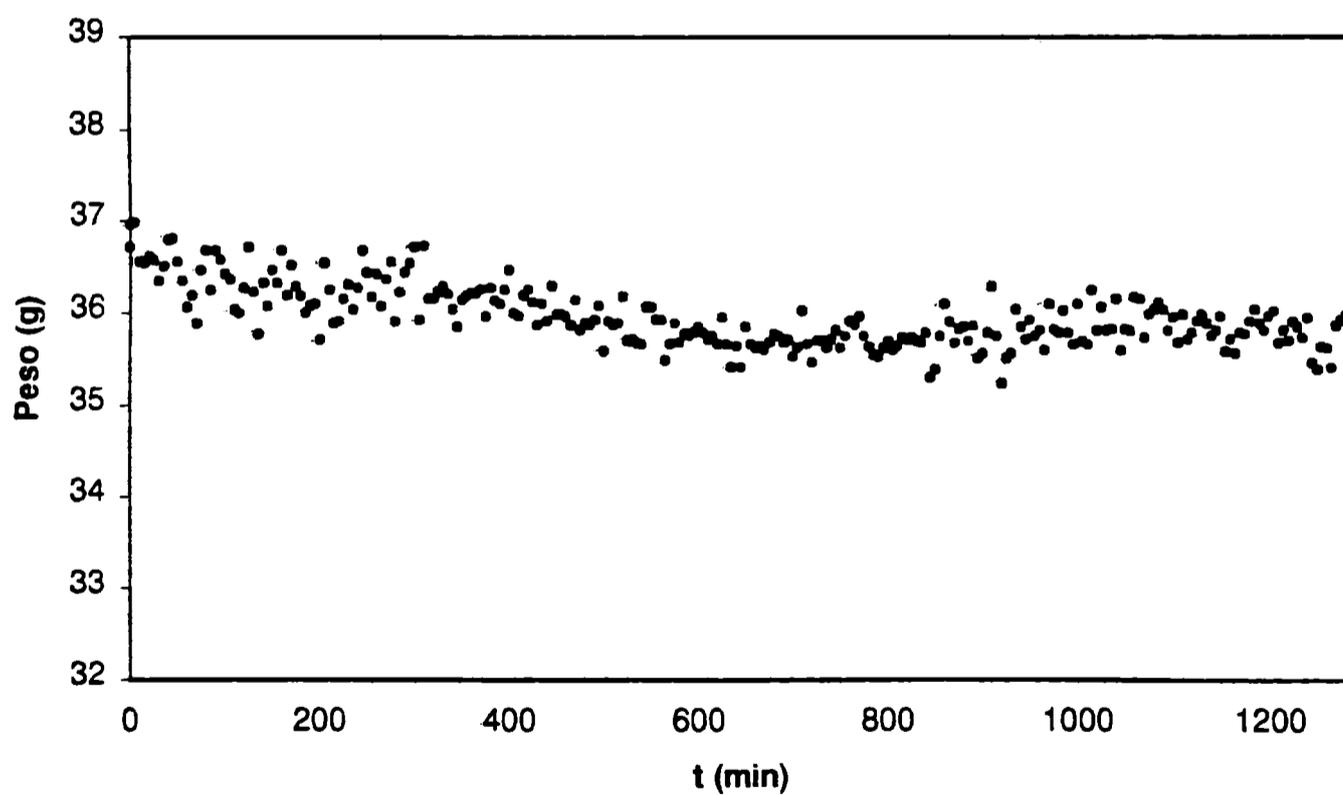


Figura 5.28: Pérdida de peso de cilindros de peceto en la condición PC2.

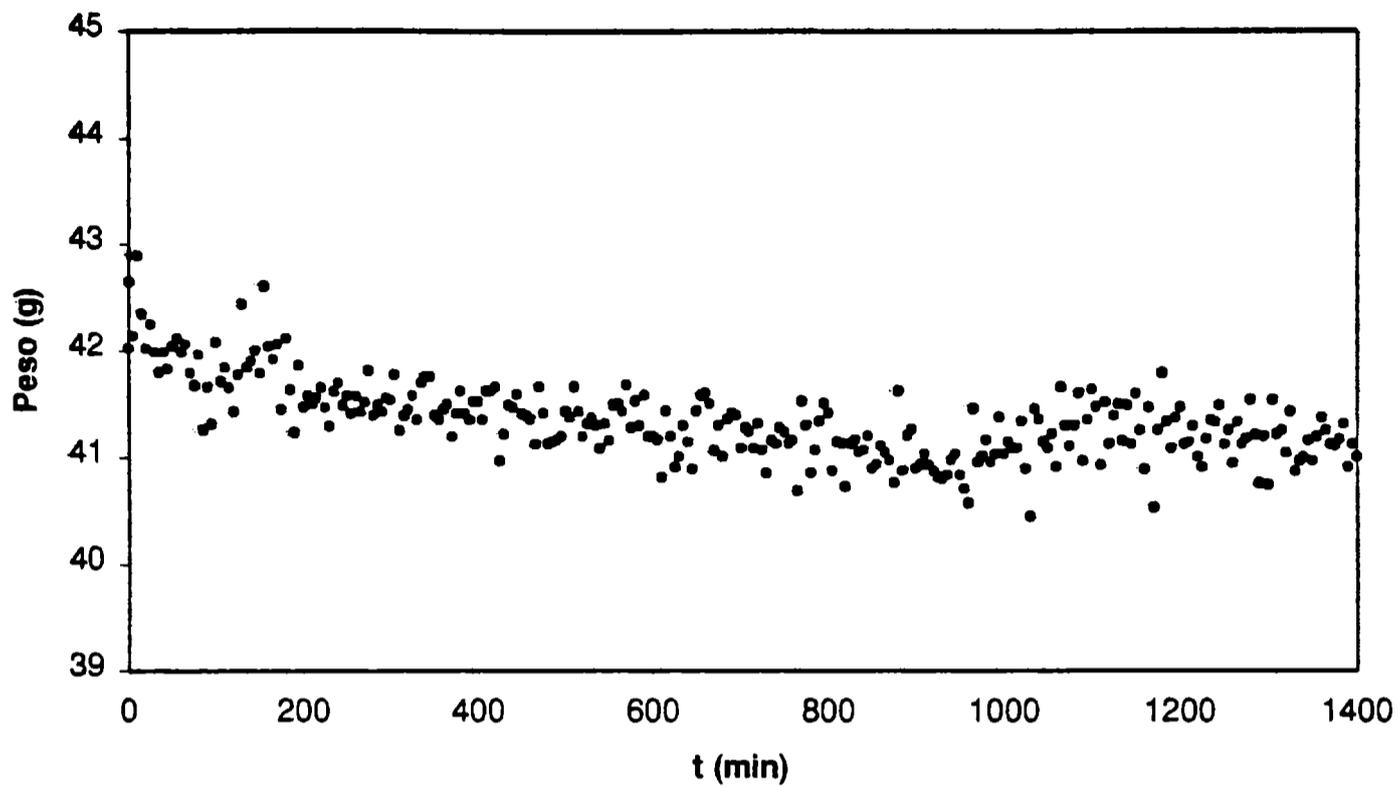


Figura 5.29: Pérdida de peso de cilindros de peceto en la condición PC3.

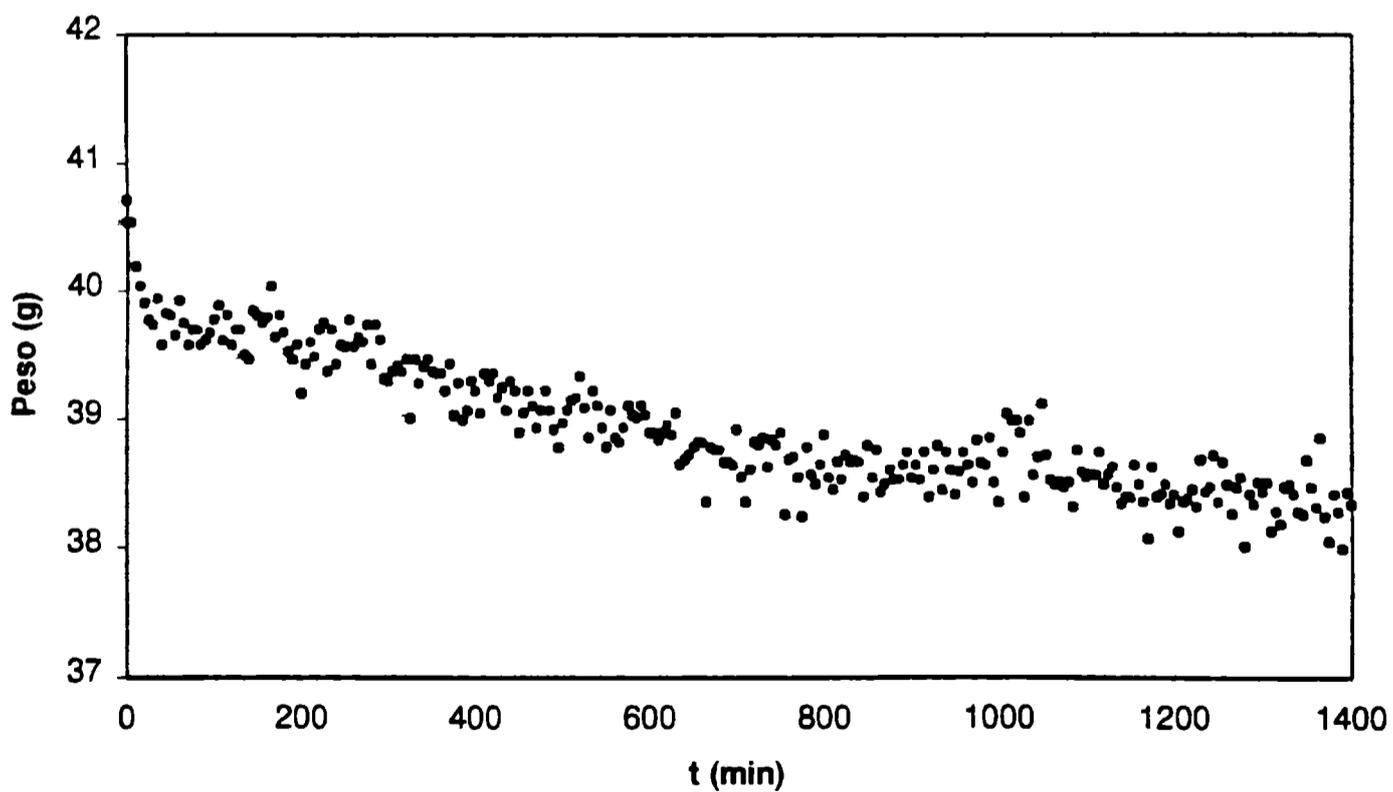


Figura 5.30: Pérdida de peso de cilindros de peceto en la condición PC4.

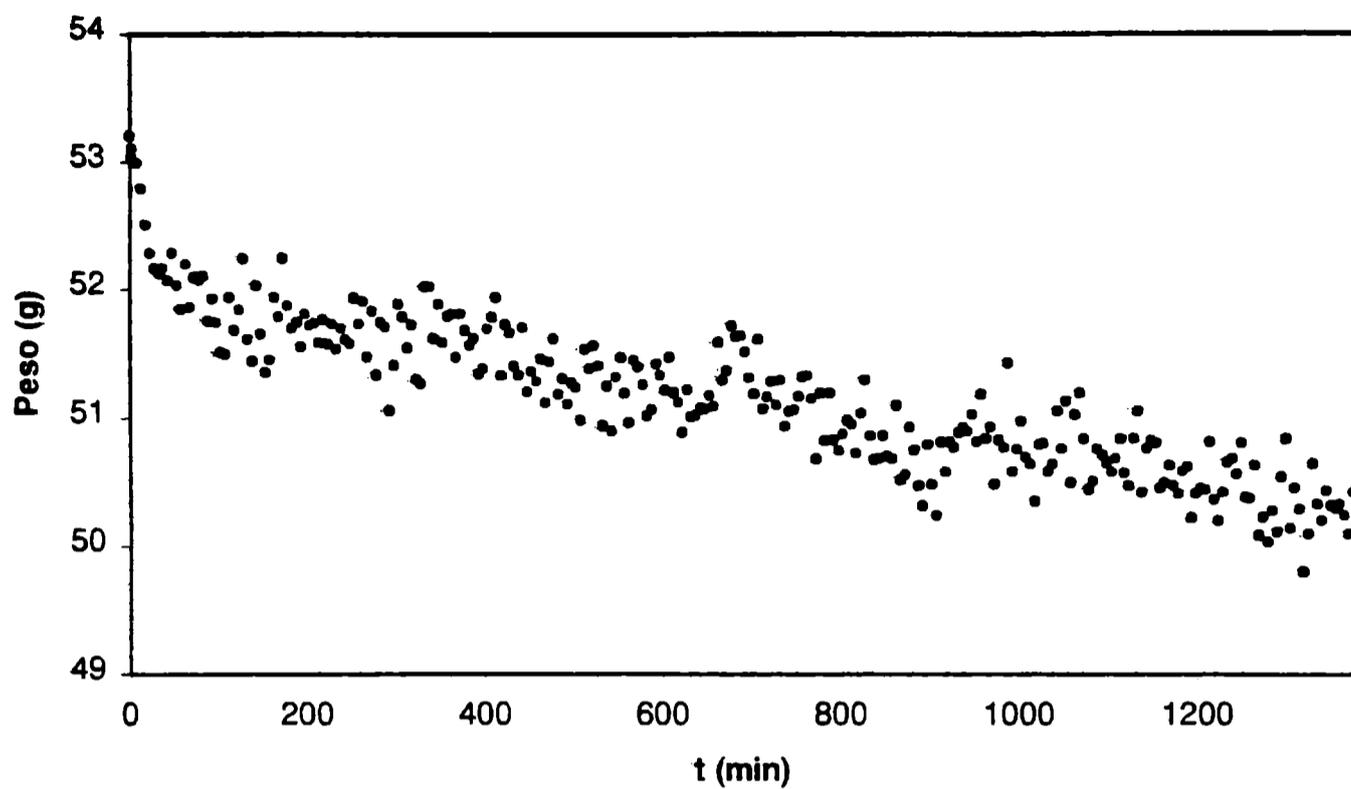


Figura 5.31: Pérdida de peso de cilindros de peceto en la condición PC5.

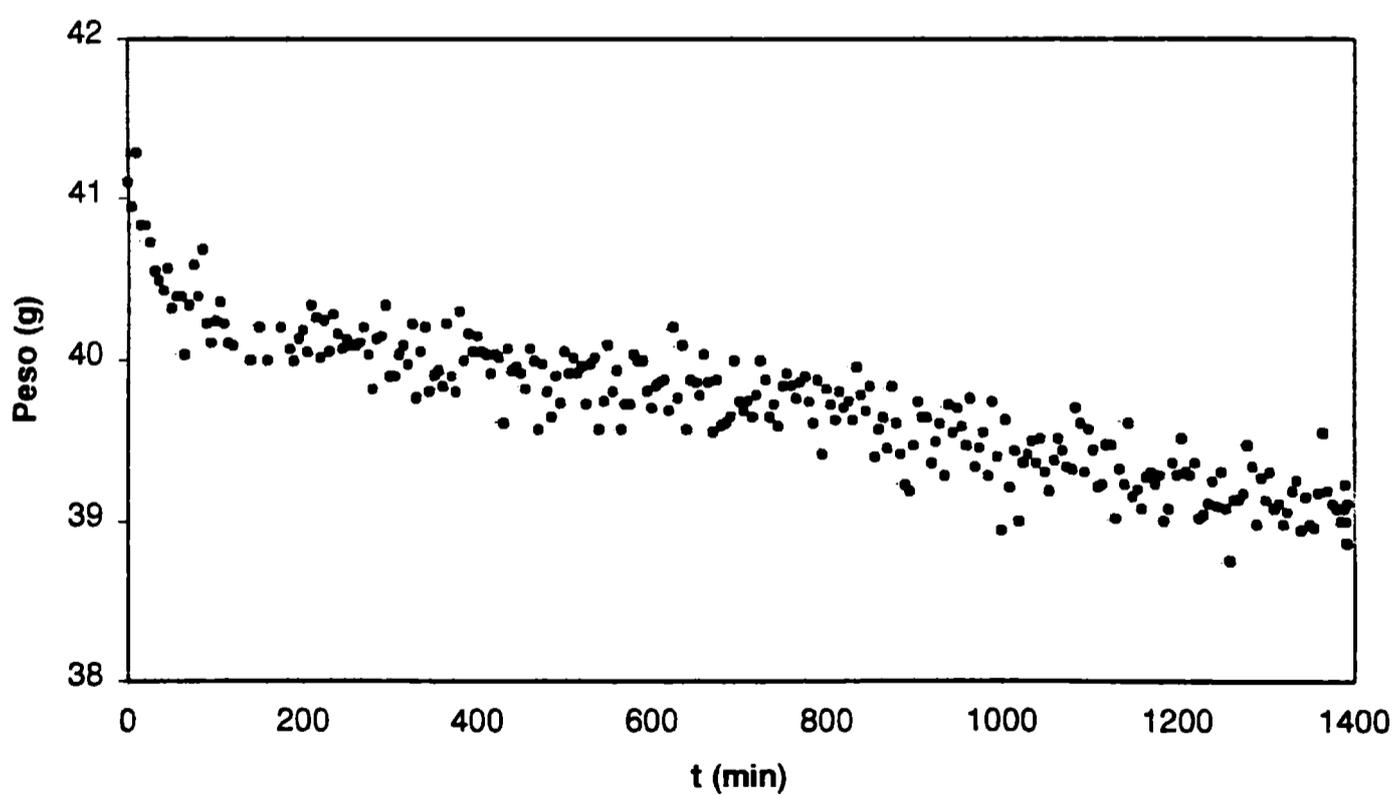


Figura 5.32: Pérdida de peso de cilindros de peceto en la condición PC6.

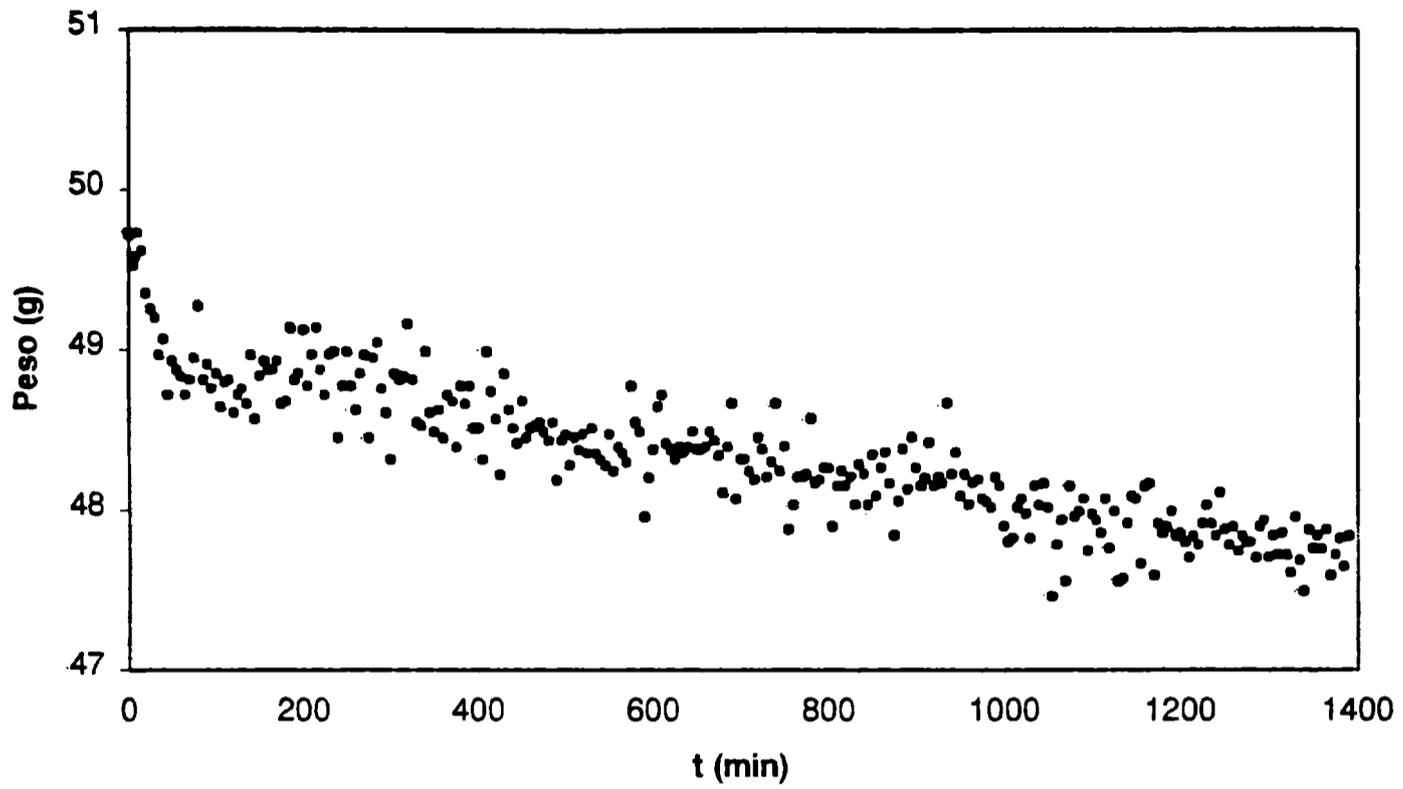


Figura 5.33: Pérdida de peso de cilindros de peceto en la condición PC7.

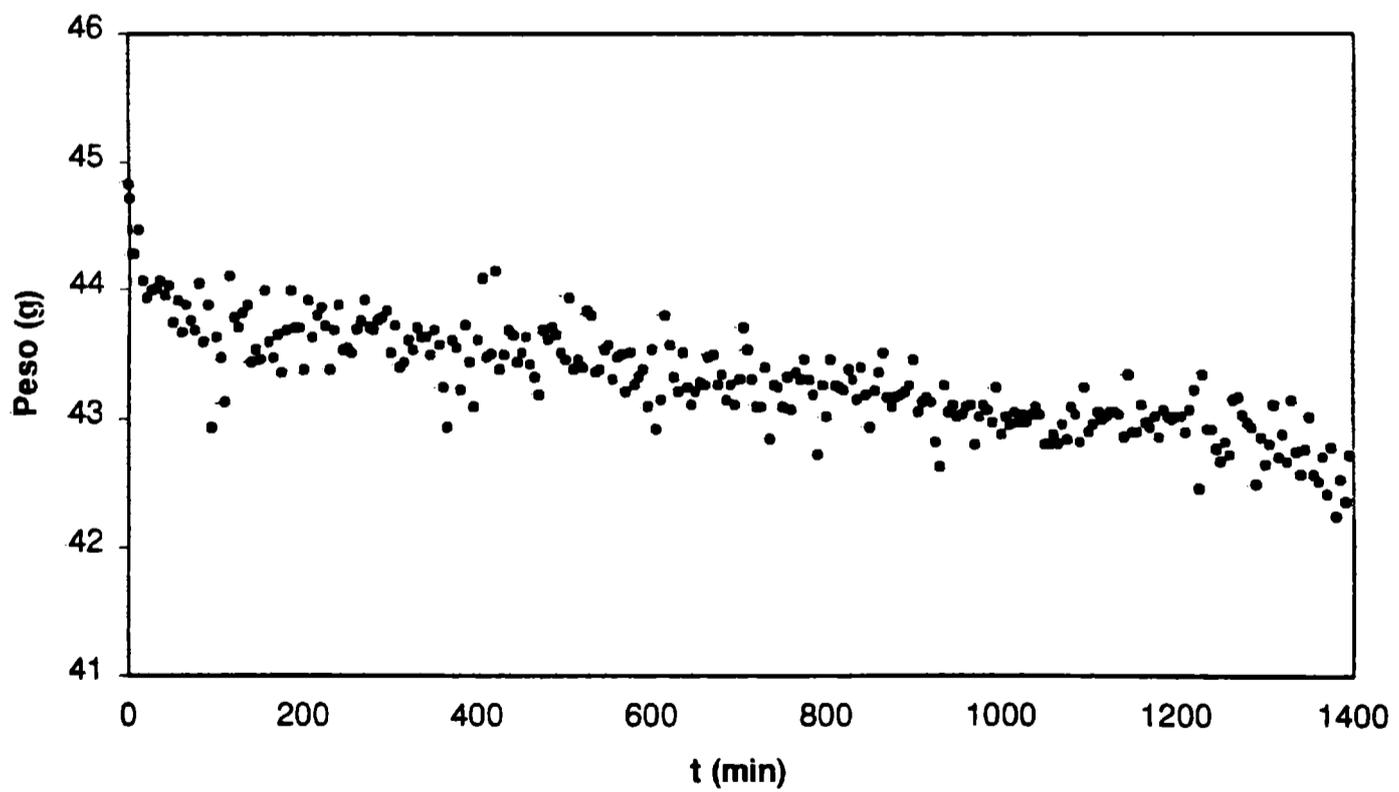


Figura 5.34: Pérdida de peso de cilindros de peceto en la condición PC8.

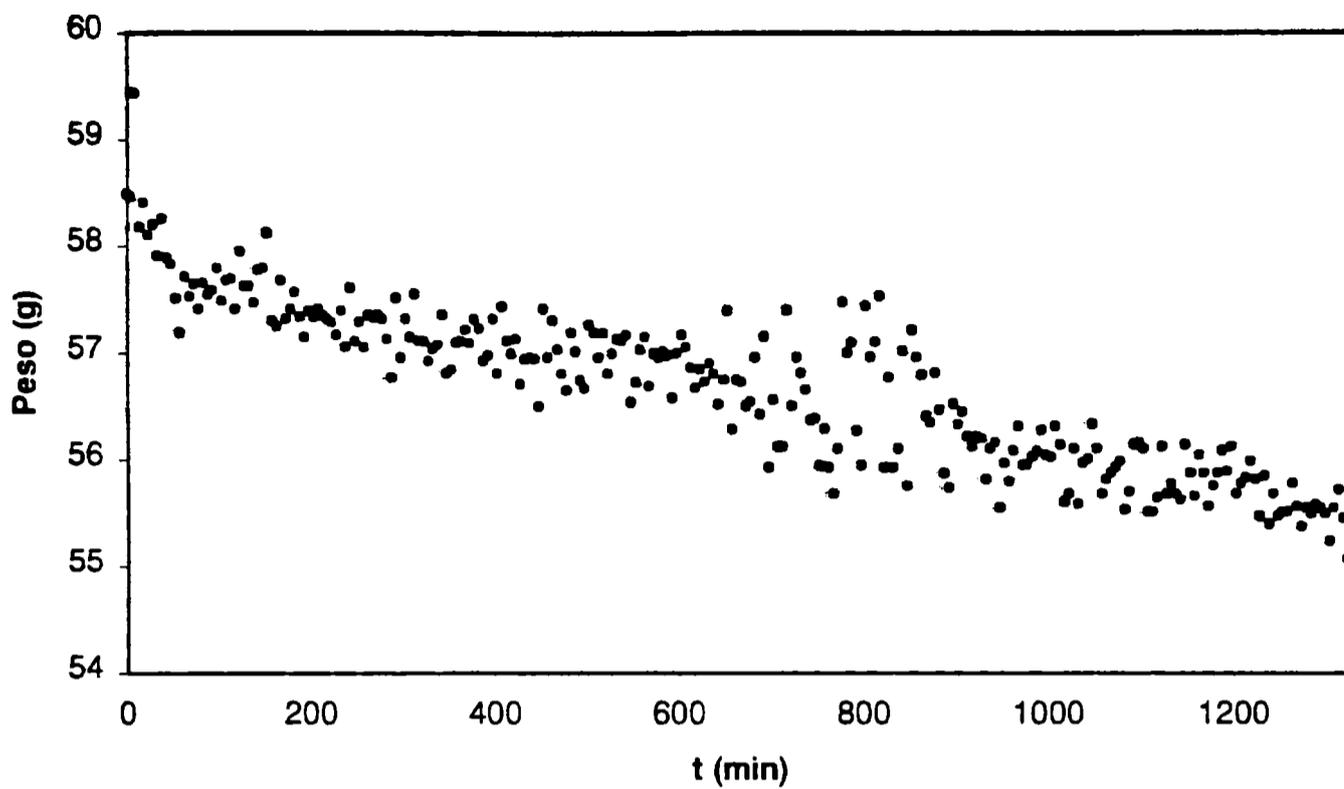


Figura 5.35: Pérdida de peso de cilindros de peceto en la condición PC9.

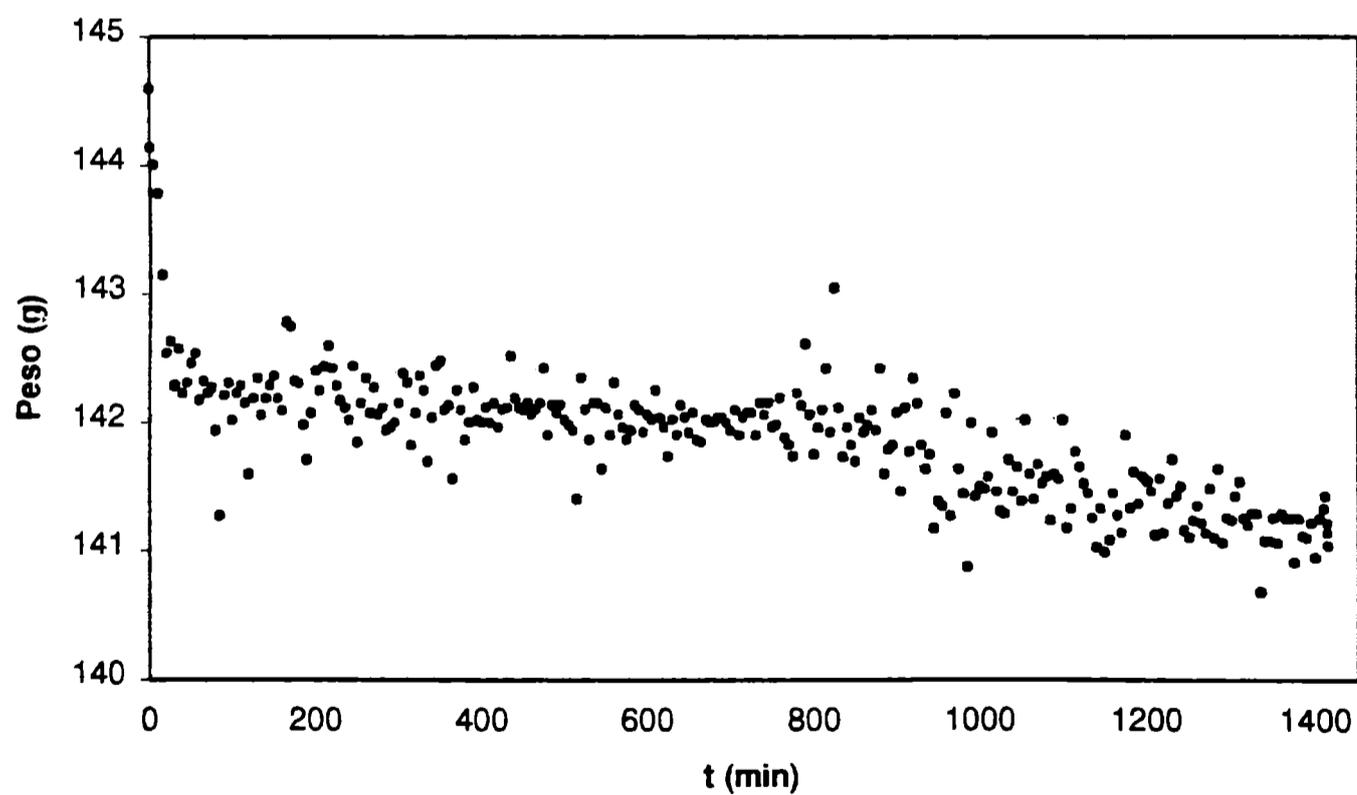


Figura 5.36: Pérdida de peso de pechugas de pollo en la condición POC1.

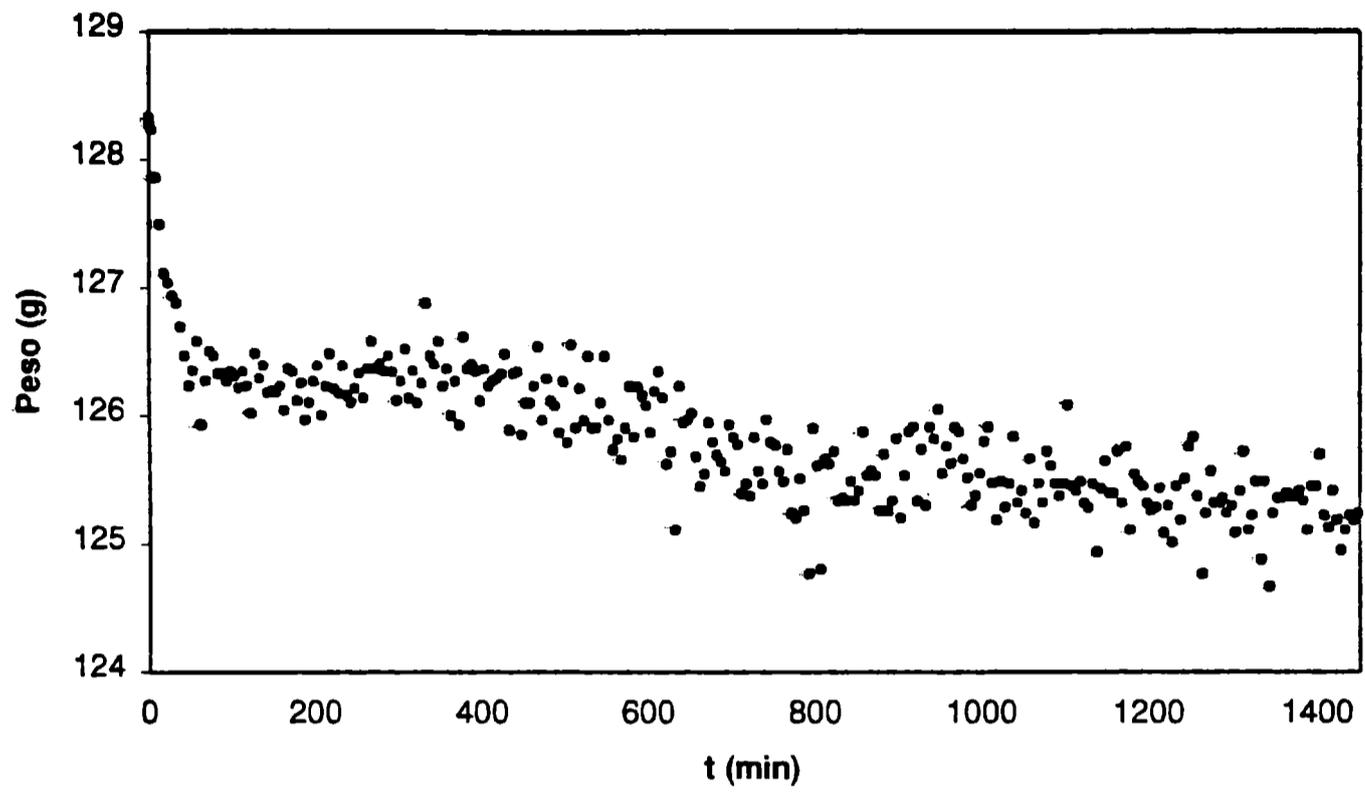


Figura 5.37: Pérdida de peso de pechugas de pollo en la condición POC2.

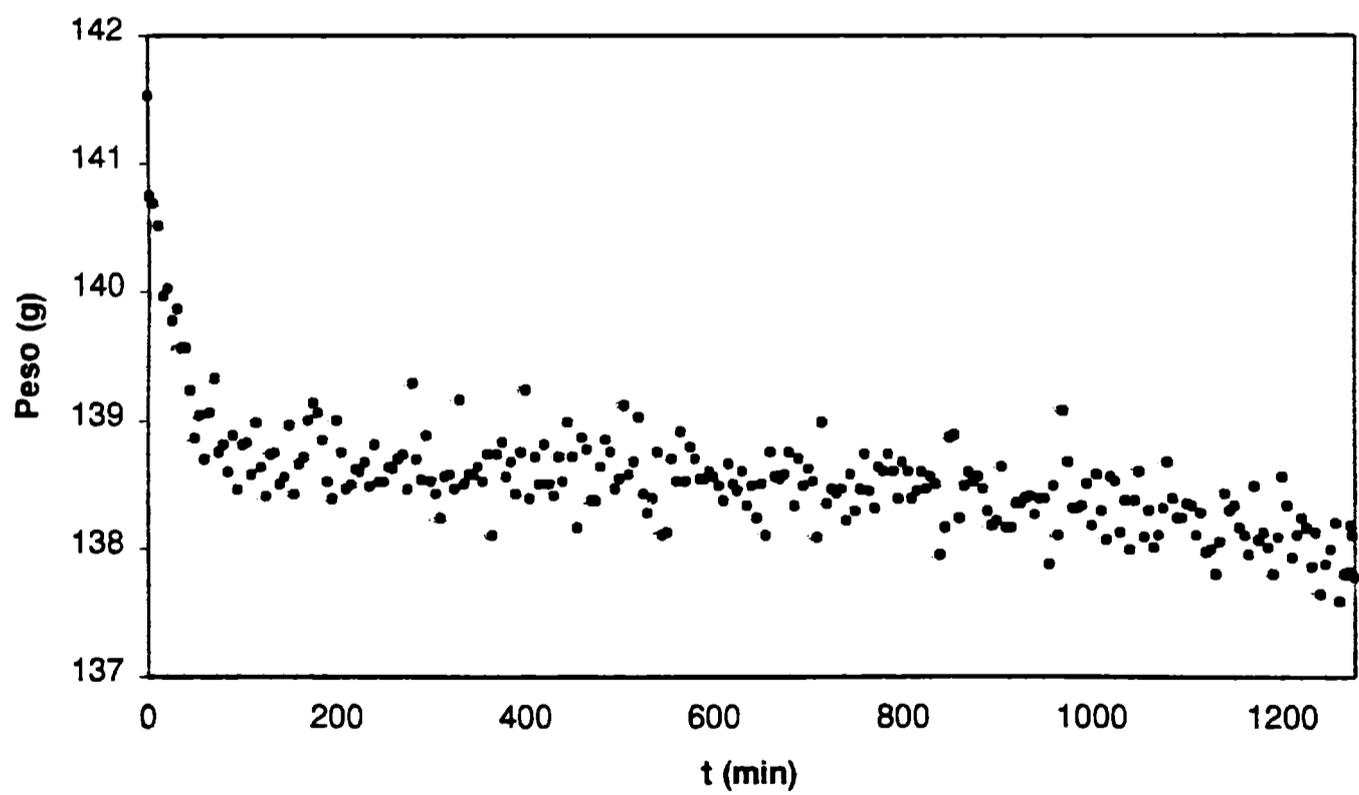


Figura 5.38: Pérdida de peso de pechugas de pollo en la condición POC3.

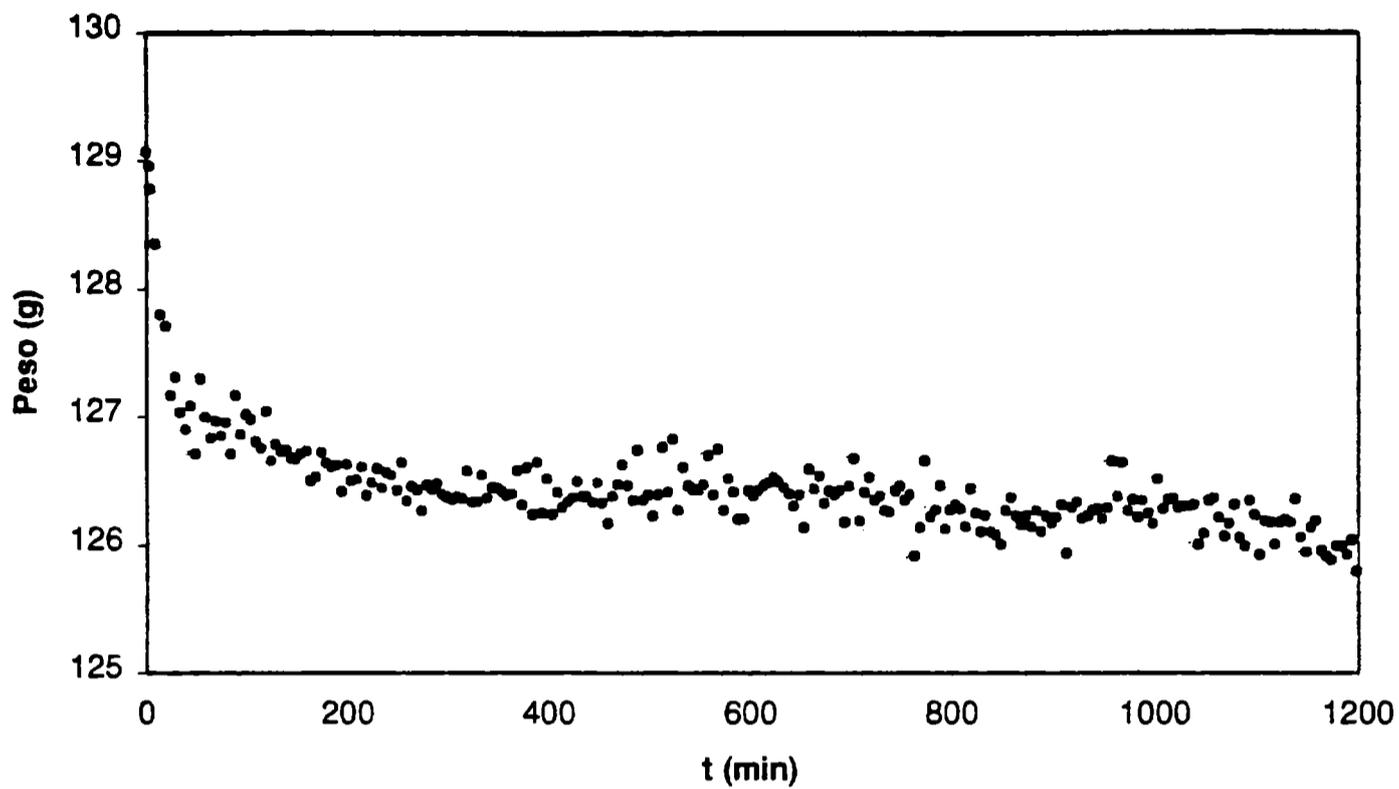


Figura 5.39: Pérdida de peso de pechugas de pollo en la condición POC4.

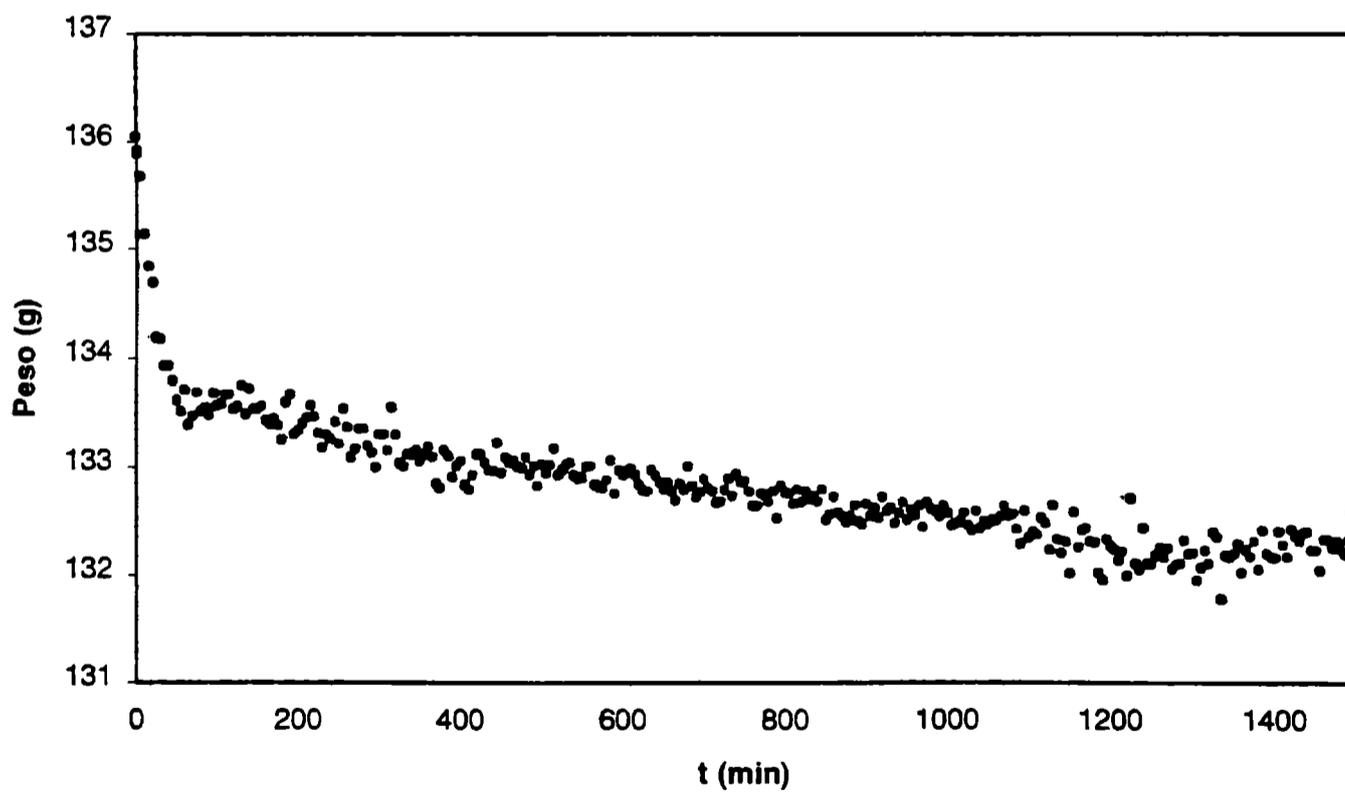


Figura 5.40: Pérdida de peso de pechugas de pollo en la condición POC5.

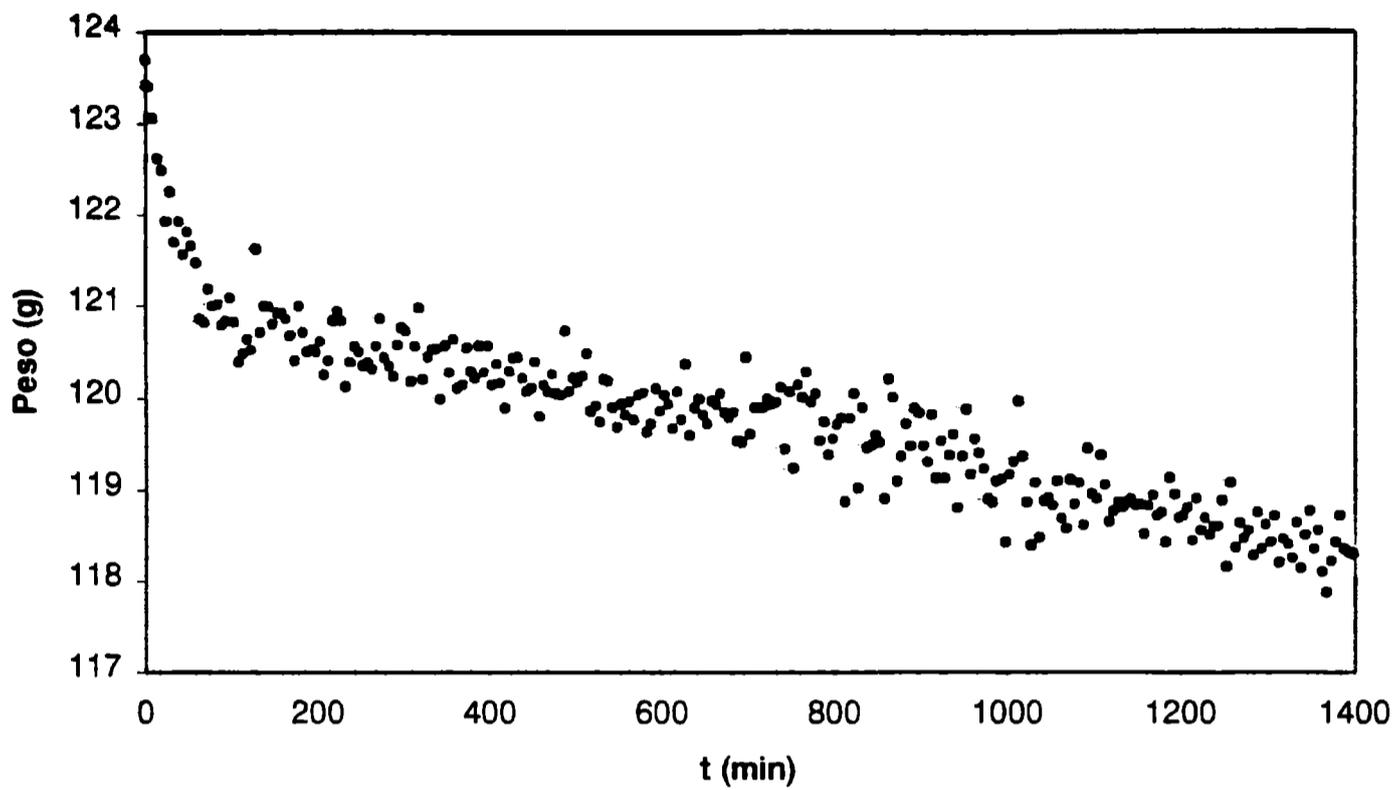


Figura 5.41: Pérdida de peso de pechugas de pollo en la condición POC6.

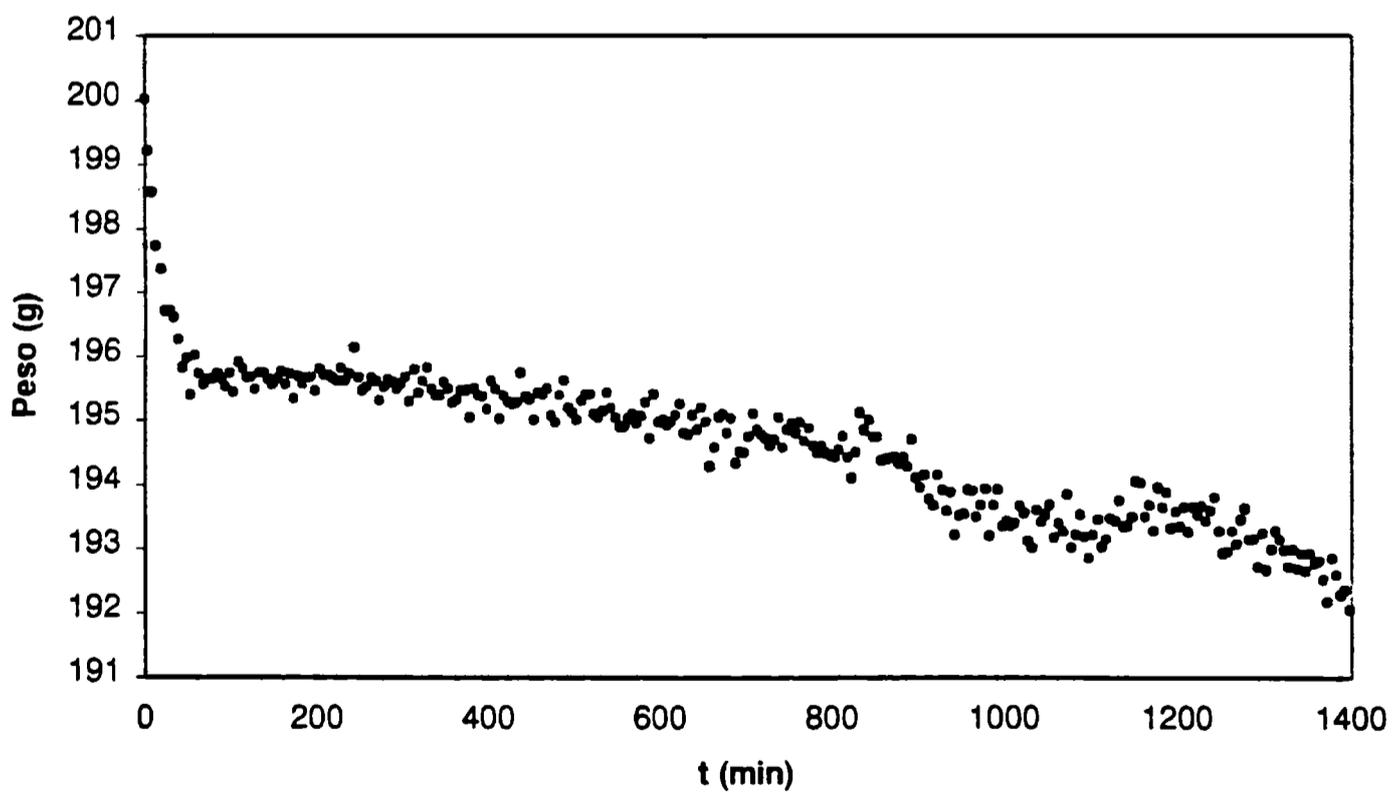


Figura 5.42: Pérdida de peso de pechugas de pollo en la condición POC7.

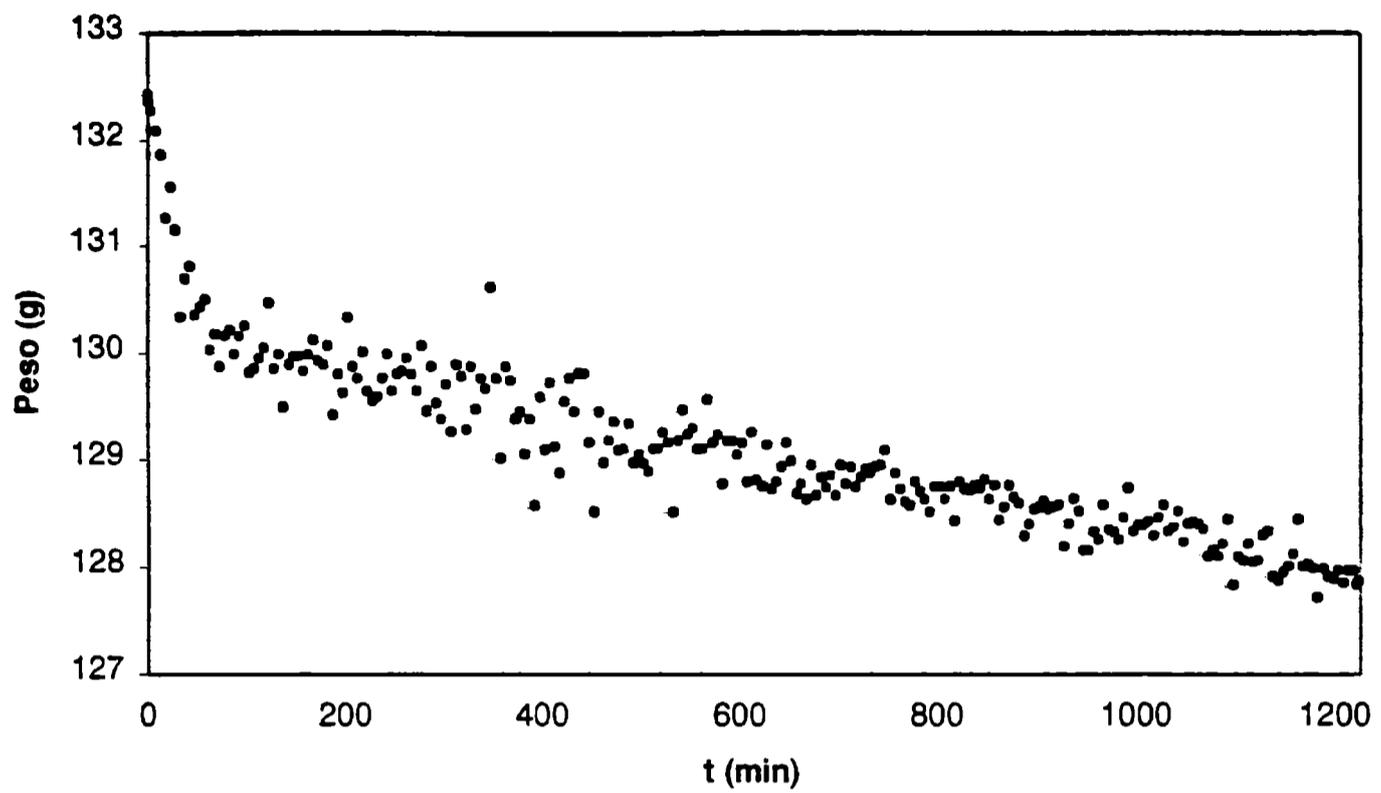


Figura 5.43: Pérdida de peso de pechugas de pollo en la condición POC8.

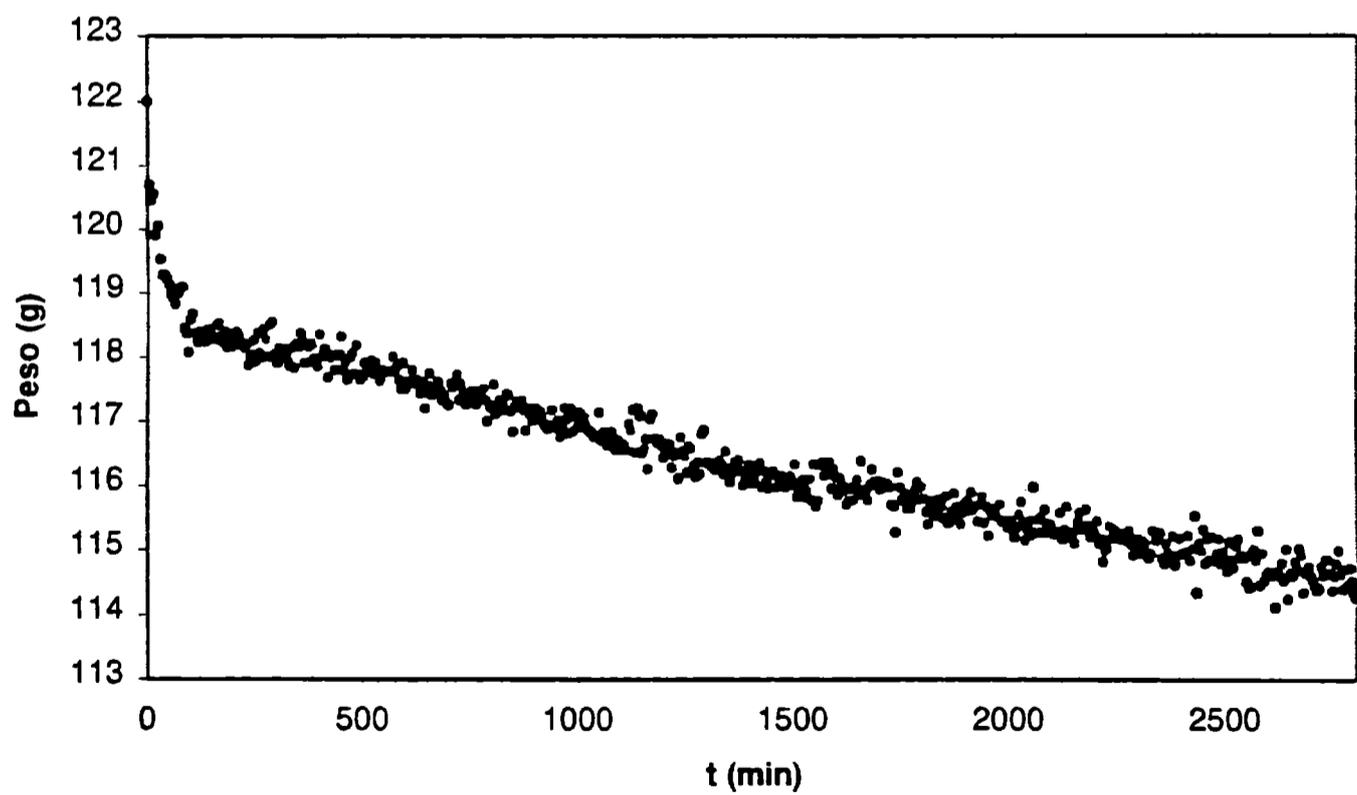


Figura 5.44: Pérdida de peso de pechugas de pollo en la condición POC9.

5.2.2 CONDICIONES OPERATIVAS VARIABLES

Los procesos de congelación y el almacenamiento congelado de alimentos que se llevan a cabo en la práctica industrial se realizan en condiciones de operación que muy difícilmente se pueden mantener constantes en el tiempo (Kondjoyan y col., 1993). En general se presentan fluctuaciones en la temperatura, velocidad y humedad relativa del aire ambiente. Para tener en cuenta como responden las muestras bajo condiciones operativas variables se realizaron dos experiencias con muestras cilíndricas de peceto, en las cuales se tuvieron en cuenta las siguientes situaciones:

- Temperatura del aire variable: se realizaron escalones de 4°C de amplitud, con valores de -22.5°C y -18.5°C. La temperatura real del túnel se puede observar en la Figura 5.45,
- Velocidad del aire variable: se realizaron ciclos de 60 minutos, cada uno en forma manual, en los cuales la velocidad alternó entre 5 m/s y 1 m/s (Figura 5.46).

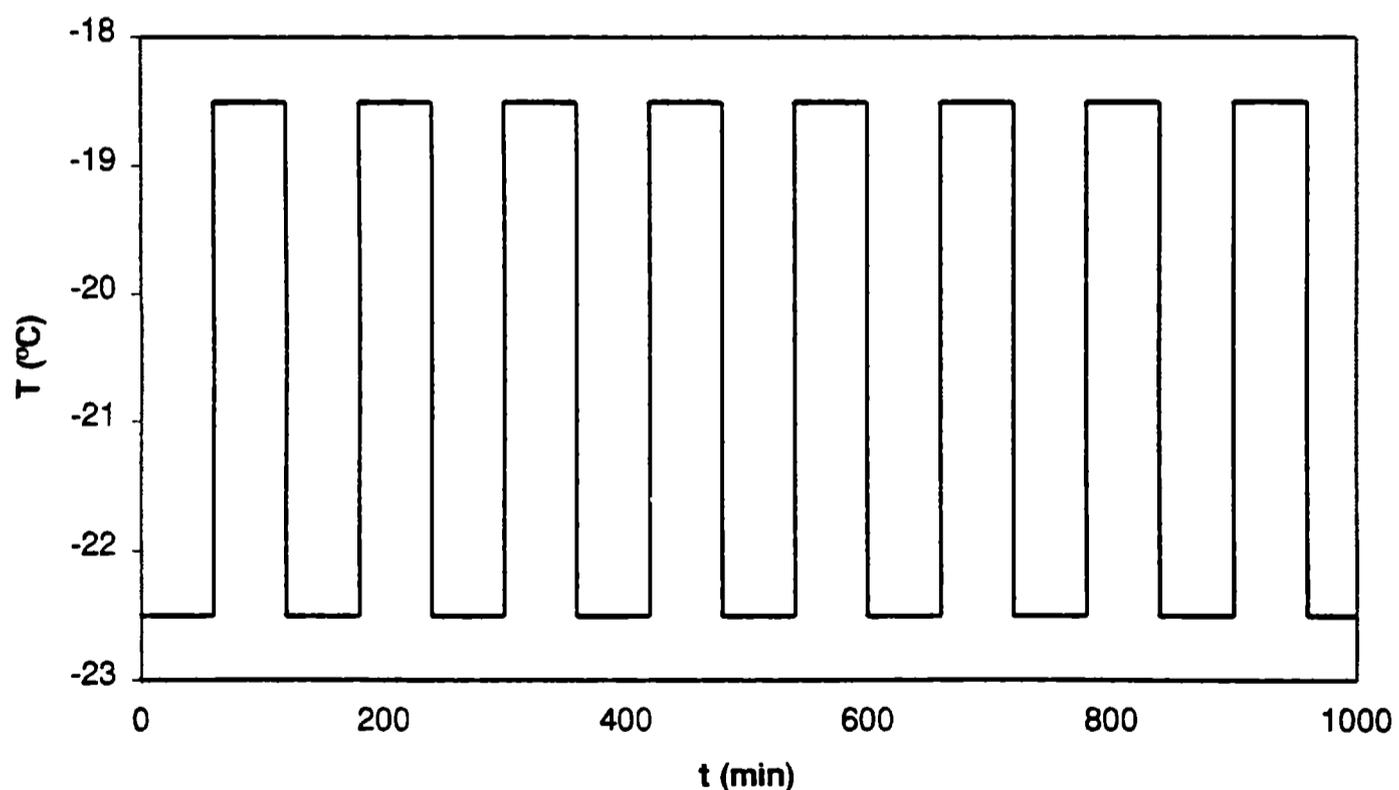


Figura 5.45: Variación de la temperatura del aire con el tiempo.

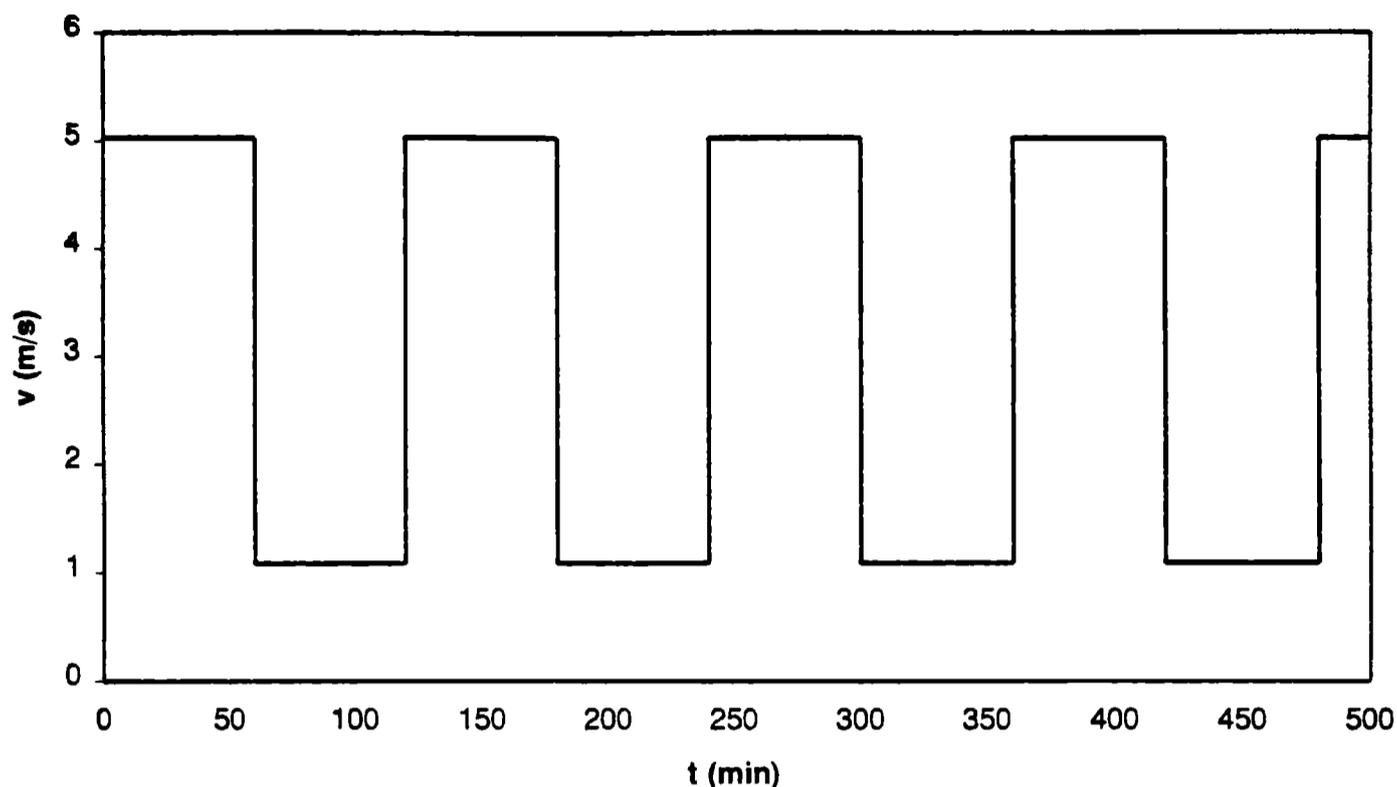


Figura 5.46: Variación de la velocidad del aire con el tiempo.

Las Figuras 5.45 y 5.46 muestran las curvas de pérdida de peso obtenidas en las condiciones de operación practicadas. El comportamiento de las muestras es similar al observado en condiciones de temperatura y velocidad de aire constantes. Las condiciones operativas fluctuantes influyen en la transferencia de energía y de materia, pero en ambas experiencias no se distinguen oscilaciones en las curvas de variación de peso en función del tiempo como respuesta a lo que ocurre en el medio ambiente.

Finalmente, cabe señalar que durante todas las experiencias realizadas en condiciones de operación constante se registró la temperatura interna de los productos en función del tiempo. Además, algunas muestras luego de ser sometidas a los procesos de congelación y almacenamiento congelado fueron empleadas para analizar el tamaño de la capa deshidratada generada por la sublimación del hielo superficial. La validación completa del modelo matemático empleando los resultados de pérdida de peso, perfiles de temperatura y crecimiento de la capa deshidratada superficial se describe en forma exhaustiva en el próximo Capítulo.

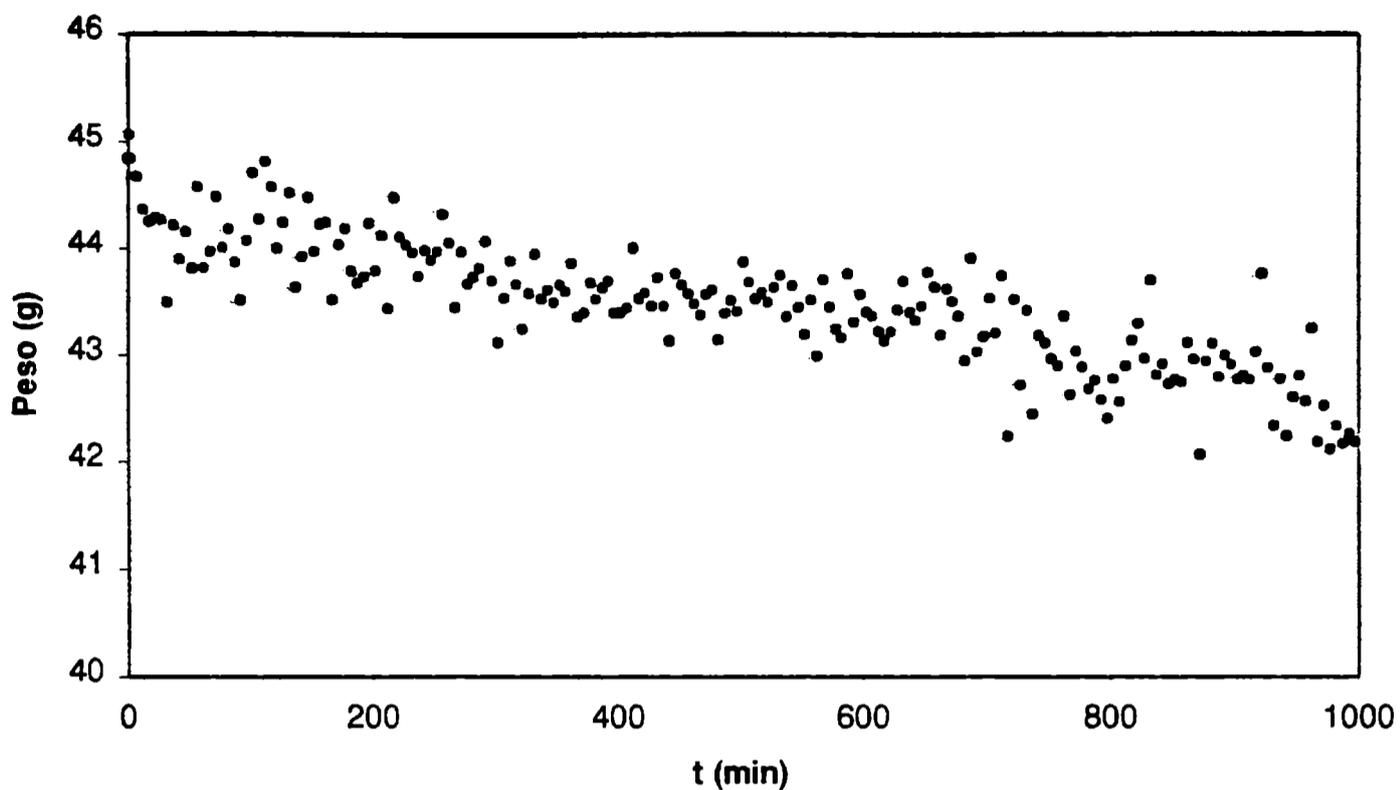


Figura 5.47: Pérdida de peso de peceto en la experiencia realizada con fluctuaciones de temperatura del aire ($v=5$ m/s, $T_{ini}=10.6^{\circ}\text{C}$, $\text{HR}=50\%$, $D=3\text{cm}$).

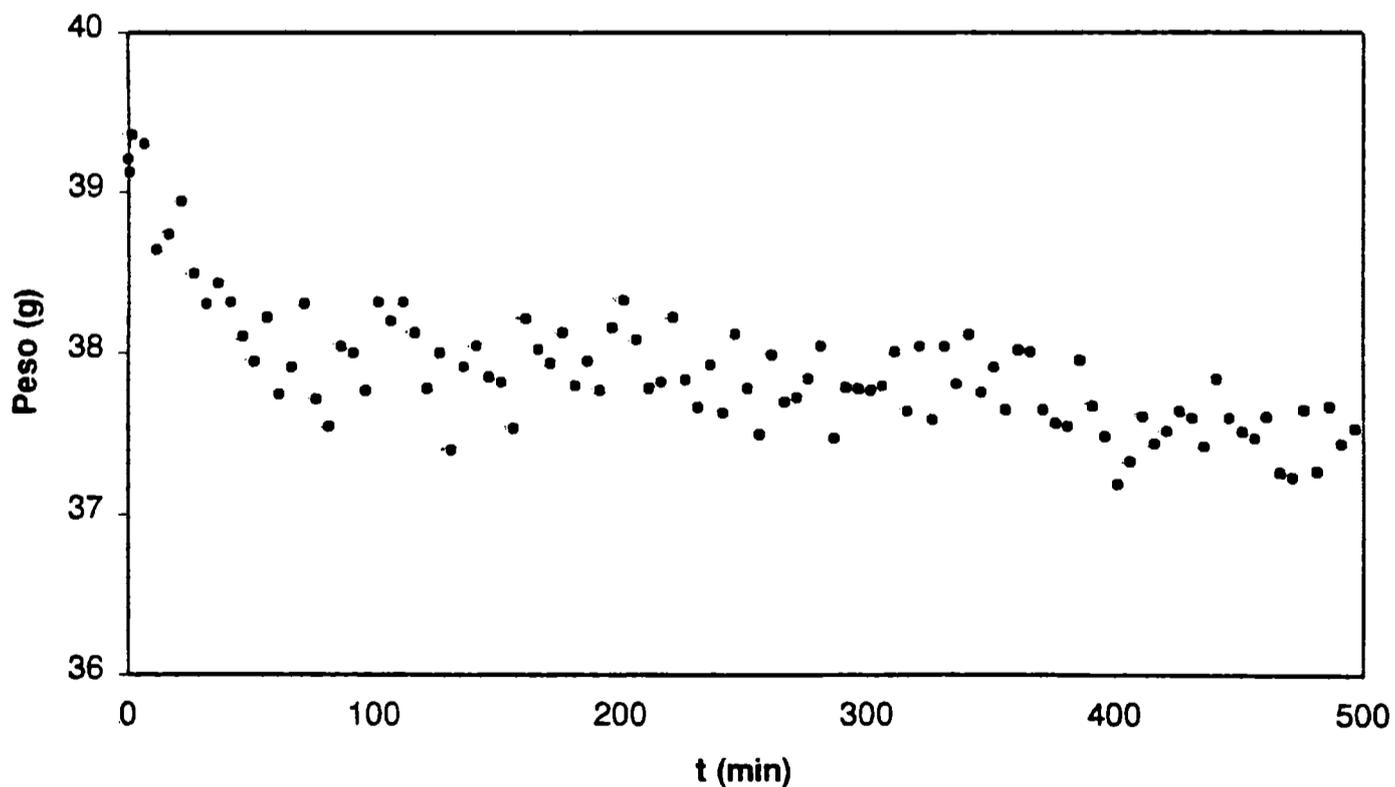


Figura 5.48: Pérdida de peso de peceto en la experiencia realizada con fluctuaciones de velocidad del aire ($T_a = -19^{\circ}\text{C}$, $T_{ini}=7.5^{\circ}\text{C}$, $\text{HR}=50\%$, $D=3\text{cm}$).

CAPÍTULO 6: VERIFICACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO

6.1 VALIDACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO

El modelo matemático desarrollado en el Capítulo 2 tiene como principal utilidad la capacidad de predecir la variación de la temperatura y la pérdida de peso durante la refrigeración, congelación y el almacenamiento congelado. Además permite el cálculo del tiempo de congelación a través del conocimiento de los perfiles de temperatura y la evaluación del espesor de capa deshidratada superficial.

Para comprobar que las predicciones del mismo son correctas se realizaron dos clases de validaciones:

- Validación contra datos de literatura,
- Validación contra datos experimentales propios.

Para la realización de los cálculos el modelo matemático emplea distintas propiedades térmicas, estructurales y de transporte que varían de acuerdo al producto seleccionado y al estado que el mismo presente (fresco, congelado y deshidratado). Además, es necesario el conocimiento de las propiedades del medio ambiente y de las correlaciones de los coeficientes de transferencia de energía y materia. Entonces, previamente a la simulación de las distintas situaciones presentadas en literatura y en las experiencias realizadas, se efectuó una búsqueda bibliográfica de las propiedades mencionadas. Cabe señalar, que los datos experimentales se simularon empleando 15 puntos y un incremento de tiempo de 0.1 s.

Los autores que han estudiado previamente este tema han empleado muestras de carne vacuna, papa y tilosa. En el caso de las experiencias que se describen en el Capítulo 5, los productos empleados fueron carne vacuna picada, peceto y pollo. Las propiedades seleccionadas para estos últimos productos son similares a las empleadas para carne vacuna.

Con el fin de organizar la información disponible, en primer lugar se presentan las propiedades y correlaciones que se aplican independientemente del producto seleccionado. Luego se describen las propiedades discriminadas por tipo de producto. En cada caso se indica la cita bibliográfica correspondiente.

6.1.1 PROPIEDADES GENERALES

Presión de saturación de vapor en aire: esta propiedad es necesaria para el cálculo de los gradientes de concentración. A temperaturas mayores que 0°C se emplea la siguiente correlación (Perry y Chilton, 1985):

$$P_{\text{sat}} = 100 \exp \left(72.73974 - 8.2 \ln(T + 273.16) + 0.00571(T + 273.16) - \frac{7235.42}{(T + 273.16)} \right) \quad (6.1)$$

A temperaturas menores que 0°C se utiliza la expresión de la presión de saturación del vapor de agua en el aire sobre el hielo en función de la temperatura (Fennema y Berny, 1974):

$$P_{\text{sat}} = 133.33 \exp \left(23.986 - \frac{6139.9094}{(T + 273.16)} \right) \quad (6.2)$$

Coefficiente de difusión del vapor de agua en el aire: se emplea para calcular el perfil de concentraciones de vapor en la capa deshidratada. La expresión que se implementa es la ecuación de Chapman-Enskog, donde la función Ω se regresionó en función de la temperatura (Bird y col., 1976):

$$D_{\text{va}} = 5.7 \cdot 10^{-9} \frac{(T + 273.16)^{1.5}}{1.8 - 2.1 \cdot 10^{-3}(T + 273.16)} \quad (6.3)$$

En el balance microscópico de materia debe utilizarse el coeficiente de difusión efectivo. Este incorpora las propiedades estructurales de la capa deshidratada de cada alimento en particular (Sherwood y col., 1975):

$$D_{\text{ef}} = \frac{D_{\text{va}} \varepsilon}{\tau} \quad (6.4)$$

Calor de vaporización del agua y de sublimación del hielo: los valores que se emplean son

los correspondientes al equilibrio en cambios de estado (Perry y Chilton, 1985):

$$L_s = 2.83 \cdot 10^6 \quad (6.5)$$

$$L_{vap} = 2.4 \cdot 10^6 \quad (6.6)$$

Coefficiente de transferencia de calor: el coeficiente de transferencia de calor se calcula, para cada geometría, con el empleo de distintas correlaciones de bibliografía suficientemente probadas en distintas condiciones de operación.

Para placa plana se emplea la siguiente relación (Treybal, 1968):

$$Nu = 0.664 Re_L^{0.5} Pr^{1/3} \quad (6.7)$$

Para cilindros en posición perpendicular al flujo se emplean las siguientes correlaciones (Morgan, 1975):

$$Nu = 0.193 Re_D^{0.618} Pr^{1/3} \quad Re < 4 \cdot 10^4 \quad (6.8)$$

$$Nu = 0.027 Re_D^{0.805} Pr^{1/3} \quad Re > 4 \cdot 10^4 \quad (6.9)$$

Por último, para geometría esférica se utiliza la siguiente ecuación (Bird y col., 1976):

$$Nu = 2 + 0.6 Re_D^{0.5} Pr^{1/3} \quad (6.10)$$

Para la simulación de las experiencias realizadas con hamburguesas descritas en el Capítulo 5, se dispone de una correlación particular para este producto congelado en cintas, con flujo de aire paralelo a las mismas (Flores y Mascheroni, 1988):

$$Nu = 8.77 Re_L^{0.328} Pr^{1/3} \quad (6.11)$$

Cabe señalar que esta correlación se aplica en forma exclusiva a la determinación del coeficiente de transferencia de energía en estas experiencias. En las experiencias realizadas con pechugas de pollo se emplea la correlación de literatura para placa plana descrita por la ecuación (6.7).

Coefficiente de transferencia de materia: para el cálculo del coeficiente de transferencia de materia se emplean las correlaciones obtenidas en el Capítulo 4.

El coeficiente de transferencia de materia se emplea en la condición de contorno del balance microscópico de materia, para la obtención del perfil de concentraciones de vapor (k_m).

El coeficiente que se aplica para el cálculo del perfil de concentraciones de agua en el interior del alimento a temperaturas mayores que la temperatura inicial de congelación, está expresado en unidades equivalentes de alimento (k'_m). Este coeficiente, se obtiene transformando al coeficiente k_m que está expresado en unidades de vapor. Para realizar esta transformación, se deben igualar los flujos de materia expresados en ambas unidades.

$$k_m (C_{va} - C_a) = k'_m (C_w - C_{equi})$$

Despejando k'_m se obtiene:

$$k'_m = k_m (C_{va} - C_a) / (C_w - C_{equi}) \quad (6.12)$$

donde C_{va} es la concentración de vapor de agua calculada en la superficie del producto y C_w es la concentración del agua líquida en el borde del alimento.

En nuestro estudio los productos se congelan sin empaquetar y cortados en alguna forma regular. Cuando los alimentos se congelan con cáscara o con una envoltura permeable al vapor, como es el caso de frutas y hortalizas, se debe incluir la resistencia adicional a la transferencia de materia que presentan las mismas, tanto en las propiedades del producto, como así también en el cálculo del coeficiente de transferencia de materia. En general, se puede considerar que ambas resistencias se encuentran en serie, de esta manera:

$$K_G = \frac{1}{\frac{1}{k_m} + \frac{1}{k_{piel}}} \quad (6.13)$$

Valores de coeficientes de piel se encuentran publicados para una gran variedad de productos (Fockens y Meffert, 1972; Sastry y Buffington, 1983).

6.1.2 PROPIEDADES PARTICULARES

6.1.2.1 CARNE VACUNA

Contenido acuoso de equilibrio: para el cálculo de los perfiles de concentración de humedad dentro del producto es necesario conocer la concentración acuosa de equilibrio. La misma se calcula a través de la isoterma de sorción del producto (Iglesias y Chirife, 1982):

$$wbs_{equi} = 0.119546 \left(\frac{HR/100}{(1 - HR/100)} \right)^{0.5194} \quad (6.14)$$

donde wbs_{equi} es la humedad de equilibrio expresada en base seca.

Coefficiente de difusión del agua en el alimento: para conocer el perfil de concentraciones cuando el alimento todavía no congeló, se debe emplear el coeficiente de difusión del agua en el producto. A temperaturas mayores que la temperatura inicial de congelación, la correlación que se emplea es la siguiente (Tocci y Mascheroni, 1995):

$$D_w = 8.510^{-8} \exp\left(\frac{-2300}{T + 273.15}\right) \quad (6.15)$$

Contenido inicial de agua: para simular las experiencias publicadas en literatura se emplea como dato de contenido inicial de agua un valor general obtenido para carne vacuna (Sanz y col., 1987):

$$Y_0 = 0.74 \quad (6.16)$$

VERIFICACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO

En el caso de las experiencias realizadas en el túnel de congelación, se determinó el contenido inicial de agua por medio del secado de las muestras en estufa con vacío (Capítulo 3). El rango de los resultados obtenidos en estas determinaciones para cada producto se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 6.1: Contenido inicial de agua de distintos productos cárneos.

Producto	Contenido inicial de agua
Carne picada vacuna	0.66-0.71
Peceto	0.71-0.76
Pechugas de pollo	0.72-0.74

Temperatura inicial de congelación: para la determinación de esta propiedad, se emplea una correlación en función del contenido inicial de agua (Mascheroni y Calvelo, 1978):

$$T_{if} = \frac{(1 - Y_0)}{(0.06908 - 0.4393 Y_0)} \quad (6.17)$$

Densidad: para el cálculo de esta propiedad se debe distinguir el estado que presenta el producto. Para carne vacuna fresca y congelada se hace uso de las siguientes correlaciones dependientes del contenido inicial de agua y de la temperatura (Sanz y col., 1987):

$$\rho = 1053 \quad T \geq T_{if} \quad (6.18)$$

$$\rho = \frac{1053}{0.982 + 0.113 Y_0 + 0.257 (1 - Y_0) T^{-1}} \quad T < T_{if} \quad (6.19)$$

Datos de densidad de la capa deshidratada superficial de la carne no se disponen en bibliografía. Una aproximación es considerar que esta propiedad es equivalente a la densidad de la carne deshidratada por liofilización. Para productos liofilizados, existen datos experimentales y para carne vacuna se encuentra el siguiente valor promedio a temperaturas menores que la temperatura inicial de congelación (Berlin y col., 1966):

$$\rho_d = 1000 \quad (6.20)$$

Contenido de hielo: para el cálculo del contenido de hielo se emplea una expresión en función de la temperatura y del contenido inicial de agua, presentada por Mascheroni y Calvelo (1978):

$$w = 1.1866 Y_0 - 0.1866 + 2.7013 (1 - Y_0) T^{-1} \quad T < T_{if} \quad (6.21)$$

Conductividad térmica: en forma equivalente al caso de la densidad, la conductividad depende del estado del producto, pero en todos los casos, el valor de esta propiedad cambia de acuerdo a la orientación del flujo de energía con respecto a las fibras de carne. En este estudio, se consideró que la transferencia ocurre en dirección perpendicular a las fibras (Sanz y col., 1987):

$$k = 0.0866 + 0.501 Y_0 + 5.0521 \cdot 10^{-4} Y_0 T \quad T \geq T_{if} \quad (6.22)$$

$$k = 0.378 + 1.376 Y_0 + 0.93 T^{-1} \quad T < T_{if} \quad (6.23)$$

Para el cálculo de la conductividad de la capa superficial, se emplea un modelo en el cual se consideran en serie las fibras, el hielo adsorbido a las mismas y los huecos provocados por la sublimación del hielo conteniendo en su interior aire y vapor de agua. El valor promedio encontrado en el rango de temperaturas menores que la temperatura inicial de congelación coincide con el valor publicado por Harper (1962) para carne vacuna liofilizada:

$$k_d = 0.07 \quad (6.24)$$

Calor específico: en el caso del producto fresco se considera la siguiente correlación con el contenido inicial de agua (Sanz y col., 1987):

$$C_p = 1448 (1 - Y_0) + 4187 Y_0 \quad T \geq T_{if} \quad (6.25)$$

Cuando la carne se congela, el calor específico utilizado es un valor aparente que incorpora el calor de cambio de fase (Sanz y col., 1987):

$$C_p = 3874 - 2534 Y_0 + 902893 (1 - Y_0) T^{-2} \quad T < T_{if} \quad (6.26)$$

Para el cálculo de esta propiedad en la capa porosa superficial, se emplea un valor experimental publicado por Polley y col. (1980):

$$C_{p_d} = 796 \quad (6.27)$$

Fracción de hielo adsorbido: la cantidad de hielo que permanece adsorbida a las fibras depende de las condiciones de equilibrio entre el hielo y el vapor. Chumak y Sibiariakov, (1988) proponen la siguiente correlación para la obtención de la curva de desorción del hielo en carne vacuna:

$$f_{ads} = \exp(A_1 + A_2 HR + A_3 HR^2 + A_4 HR^3) \quad (6.28)$$

donde los parámetros A_1 , A_2 , A_3 y A_4 dependen de la temperatura:

$$A_1 = -2.7349 - 0.01513 T - 5.063 \cdot 10^{-4} T^2 - 4.083 \cdot 10^{-6} T^3 \quad (6.29)$$

$$A_2 = 5.089 \cdot 10^{-2} + 2.269 \cdot 10^{-3} T + 8.285 \cdot 10^{-5} T^2 + 9.172 \cdot 10^{-7} T^3 \quad (6.30)$$

$$A_3 = -9.442 \cdot 10^{-4} - 7.085 \cdot 10^{-5} T - 2.673 \cdot 10^{-6} T^2 - 3.206 \cdot 10^{-8} T^3 \quad (6.31)$$

$$A_4 = 7.323 \cdot 10^{-6} + 6.188 \cdot 10^{-7} T + 2.337 \cdot 10^{-8} T^2 + 2.9 \cdot 10^{-10} T^3 \quad (6.32)$$

Propiedades estructurales: se consideran así a la porosidad y a la tortuosidad de la capa deshidratada. Estos datos son imprescindibles para el cálculo del perfil de concentraciones de vapor en el interior de la misma. En el caso de la porosidad, se emplea un valor obtenido por Harper (1962) para carne liofilizada:

$$\varepsilon = 0.74 \quad (6.33)$$

En el caso de la tortuosidad, se utiliza el valor presentado por Gros y col. (1984):

$$\tau = 1.5 \quad (6.34)$$

6.1.2.2 TILOSA

En el caso de tilosa y papa, las experiencias publicadas consisten en la pérdida de peso durante el almacenamiento congelado. Por lo tanto, las propiedades presentadas son sólo las necesarias para la realización de los cálculos durante dicho período.

Contenido inicial de agua: la tilosa es un material que de acuerdo a las normas DIN 8953 tiene en su constitución 77% de agua. Este valor se utiliza en la simulación de experiencias de almacenamiento congelado de este producto.

Temperatura inicial de congelación: se emplea el valor presentado por Cleland y Earle (1984):

$$T_{if} = -0.6 \quad (6.35)$$

Densidad: para el caso del producto congelado, se emplea el siguiente valor promedio (Sanz y col., 1987):

$$\rho = 939.6 \quad T < T_{if} \quad (6.36)$$

Para el cálculo de la densidad de la capa porosa superficial, se utilizó un valor experimental promedio en el rango de temperaturas menores que la temperatura inicial de congelación, obtenido para geles liofilizados (Berlin y col., 1966):

$$\rho_d = 1000 \quad (6.37)$$

Contenido de hielo: para la evaluación del contenido de hielo, se emplea la siguiente expresión en función de la temperatura y del contenido inicial de agua (Miles y col., 1983):

$$w = Y_0 0.875 \left(1 + \frac{0.6}{T}\right) \quad T < T_{if} \quad (6.38)$$

Conductividad térmica: en el caso del producto congelado se emplea un dato publicado por Cleland y Earle (1984):

$$k = 1.65 \quad T < T_{if} \quad (6.39)$$

Existen en literatura datos de conductividad de una gran variedad de geles liofilizados. En el caso de la conductividad de la capa deshidratada superficial de tilosa, se emplea el siguiente valor promedio (Saravacos y Pilsworth, 1965):

$$k_d = 0.056 \quad (6.40)$$

Calor específico: el calor específico aparente se calcula en función de la temperatura a través de la siguiente relación (Cleland y Earle, 1984):

$$C_p = 2028.6 + 135424 T^{-2} \quad T < T_{if} \quad (6.41)$$

Para el cálculo del calor específico de la capa deshidratada, se emplea un dato promedio proporcionado por Miles y col. (1983):

$$C_{p_d} = 875.8 \quad (6.42)$$

Fracción de hielo adsorbido: en literatura no se han encontrado curvas de sorción a temperaturas negativas para tilosa. En consecuencia, se emplea un valor medio obtenido de la curva de desorción presentada por Chumak y Sibiriakov (1988) para carne vacuna:

$$f_{ads} = 0.25 \quad (6.43)$$

Propiedades estructurales: con respecto a la porosidad de la capa deshidratada se emplea un valor de 0.77 publicado por Saravacos y Pilsworth (1965). En el caso de la tortuosidad, no se dispone de datos en literatura, por lo tanto se adopta un valor unitario.

6.1.2.3 PAPA

Contenido inicial de agua: para el contenido inicial de agua se emplea un dato general publicado por Lombardi y Zaritzky (1996):

$$Y_0 = 0.8 \quad (6.44)$$

Temperatura inicial de congelación: se utiliza un valor experimental presentado por Cleland y Earle (1984):

$$T_{if} = -0.6 \quad (6.45)$$

Densidad: para papas congeladas, se usa un dato de densidad promedio publicado por Mohsenin (1980):

$$\rho = 990 \quad T < T_{if} \quad (6.46)$$

La densidad de la capa deshidratada superficial de la papa se obtiene a partir de una curva de densidad en función de la humedad (Krokida y col., 1997):

$$\rho_d = 1400 \quad (6.47)$$

Conductividad térmica: datos de conductividad de papa congelada fueron publicados por Cleland y Earle (1984):

$$k = 1.9 \quad T < T_{if} \quad (6.48)$$

La conductividad de la capa deshidratada se obtiene a partir de la aplicación del modelo de Maxwell-Eucken considerando las fibras de papa deshidratada (Wang y Brennan, 1992) y los poros ocupados por aire y vapor de agua. Así el valor resultante es el siguiente:

$$k_d = 0.06 \quad (6.49)$$

Calor específico: el calor específico aparente se estima a partir de una correlación en función de la temperatura (Cleland y Earle, 1984):

$$C_p = 1969.7 + 144720 T^{-2} \quad T < T_{if} \quad (6.50)$$

El calor específico de la capa deshidratada se calcula mediante una correlación expresada en función de la temperatura y de la humedad (Wang y Brennan, 1993):

$$C_{p_d} = 1143.6 \quad (6.51)$$

Contenido de hielo: se obtiene a través de la siguiente expresión en función de la temperatura y del contenido inicial de agua (Miles y col., 1983):

$$w = Y_0 0.9 \left(1 + \frac{0.6}{T} \right) \quad T < T_{if} \quad (6.52)$$

Fracción de hielo adsorbido: no se dispone datos en literatura. Por lo tanto se emplea el mismo valor promedio obtenido para tilosa.

Propiedades estructurales: los datos de porosidad y tortuosidad fueron publicados por Lombardi y Zaritzky (1996):

$$\varepsilon = 0.8 \quad (6.53)$$

$$\tau = 1.23 \quad (6.54)$$

6.2 VALIDACIÓN CONTRA DATOS DE LITERATURA

La validación completa del modelo matemático requiere comparar los valores predichos por el mismo con valores experimentales, propios o publicados por otros autores, que resultan tanto de la solución del balance de energía (perfiles de temperatura, tiempos de congelación), como del balance de materia (perfiles de concentración de vapor, pérdida de peso total).

En primera instancia, las predicciones del modelo matemático fueron contrastadas con datos obtenidos por otros autores que han estudiado el tema.

Como no se han encontrado trabajos previos que reporten la pérdida de peso durante la congelación, la validación del modelo presentado en esta etapa sólo puede efectuarse contrastando los resultados provistos por el mismo con datos experimentales de tiempos de congelación.

6.2.1 TIEMPOS DE CONGELACIÓN

Datos de tiempos de congelación se presentan en una gran cantidad de trabajos (Cleland, 1990). Para la validación del modelo matemático se seleccionaron los obtenidos por Tocci y Mascheroni (1994) en albóndigas congeladas en túnel de congelación.

En la Tabla 6.2 se muestran las condiciones empleadas para la simulación, la predicción del modelo de la pérdida de peso, así como también el error relativo porcentual obtenido por comparación entre el tiempo de congelación predicho y el valor experimental.

Se puede observar que el porcentaje de error en la predicción de tiempos de congelación oscila entre 3.17% y -10.73%, este rango de errores indica que el modelo predice correctamente los datos experimentales de tiempos de congelación publicados. El rango de los valores predichos de pérdida de peso coincide con el reportado por distintos fabricantes de equipos de congelación.

VERIFICACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO

Tabla 6.2: Predicción de tiempos de congelación. Datos experimentales correspondientes a albóndigas congeladas en un túnel de congelación (Tocci y Mascheroni, 1994).

CONDICIONES EXPERIMENTALES				MÉTODO NUMÉRICO		
T_a (°C)	T_{ini} (°C)	h (W/m ² °C)	t_{exp} (min)	t_{pred} (min)	ER (%)	PP (%)
-30.2	6.6	66.5	21.0	20.76	-1.14	1.08
-26.0	13.9	66.5	27.6	26.16	-5.20	1.47
-28.9	11.2	59.3	25.2	24.19	-3.99	1.32
-28.9	1.4	59.3	22.7	22.39	-1.36	0.96
-24.8	6.6	59.1	28.9	28.27	-2.17	1.26
-25.0	7.6	59.1	29.4	28.19	-4.11	1.29
-26.7	0.8	55.6	26.0	25.55	-1.72	1.02
-23.3	-0.3	55.6	29.5	30.44	3.17	0.96
-30.0	17.7	48.2	28.5	29.20	2.47	1.47
-30.2	5.9	48.2	27.8	26.27	-5.50	1.17
-28.9	1.8	42.9	30.1	28.88	-3.99	1.08
-24.8	1.2	42.5	37.0	34.93	-5.60	1.20
-24.9	10.3	42.5	38.6	37.83	-1.99	1.47
-29.3	10.9	37.6	33.0	33.74	2.25	1.41
-28.9	13.1	37.6	36.3	34.95	-3.72	1.47
-30.5	19.0	29.4	44.8	41.48	-7.41	1.53
-30.8	10.4	29.4	41.0	38.02	-7.26	1.41
-24.9	10.1	21.1	68.5	61.15	-10.73	1.59
-30.8	13.1	42.9	31.0	29.55	-4.66	1.41
-23.7	1.3	21.1	66.3	60.40	-8.89	1.26

6.2.2 PÉRDIDA DE PESO DURANTE EL ALMACENAMIENTO CONGELADO

Durante el almacenamiento congelado, los alimentos se encuentran en equilibrio térmico con el medio ambiente, por lo tanto sólo es necesario realizar la comparación de los valores predichos de pérdida de peso con los experimentales.

Para el caso de almacenamiento congelado de alimentos con formas regulares unidimensionales (esfera, cilindro, placa plana), en literatura sólo se presentan experiencias realizadas con cilindros de carne, papa y tilosa (Sukhwal y Aguirre Puente, 1983; Lambrinos y Aguirre Puente, 1983), las que fueron simuladas con el método numérico presentado en este trabajo de Tesis.

Las experiencias se llevaron a cabo bajo las condiciones operativas que se describen en las Tablas 6.3, 6.4 y 6.5.

La Figura 6.1 muestra la pérdida de peso (predicha y experimental) para las muestras de carne vacuna (Sukhwal y Aguirre Puente, 1983). Las líneas continuas corresponden a los valores predichos por el modelo matemático.

De manera similar, la Figura 6.2 muestra la pérdida de peso (predicha y experimental) para las muestras de tilosa (Sukhwal y Aguirre Puente, 1983).

Por último, la Figura 6.3 muestra la pérdida de peso (predicha y experimental) para las muestras de papa (Lambrinos y Aguirre Puente, 1983).

Como puede observarse en las Figura 6.1, el modelo predice correctamente el comportamiento de las muestras de carne, excepto para las condiciones CC4, CC5 y CC6 (todas a -20°C) las que presentan mayor error.

Por otro lado, de la Figura 6.2 se infiere que el modelo permite calcular con buena precisión la pérdida de peso de las muestras de tilosa, excepto para la condición TIC3.

Para las experiencias realizadas con papas los datos experimentales publicados eran bastantes dispersos en especial para las condiciones PAC1 y PAC2, con lo cual se puede observar que el modelo respeta la tendencia general, excepto para estas condiciones.

Teniendo en cuenta que las corridas experimentales cubren 3 temperaturas y 3 velocidades de aire, se puede concluir que la precisión de los valores calculados numéricamente es muy buena.

Un análisis más detallado de los resultados anteriores permite estudiar la influencia de cada una de las condiciones de almacenamiento en la pérdida de peso. En la Figura 6.4 se muestra el efecto de la velocidad del aire en la pérdida de peso. Los datos experimentales corresponden a las muestras de carne bajo las condiciones del almacenamiento detalladas en la Tabla 6.3. Se puede observar que los valores de la pérdida de peso aumentan con el aumento de la velocidad del aire. Además, en la Figura 6.5 se muestra el efecto de temperatura del aire en pérdida de peso para muestras de tilosa. Los datos confirman que a

VERIFICACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO

mayor temperatura del aire, mayor es la pérdida de peso. Ambos efectos son discutidos en forma exhaustiva en el Capítulo 7.

De esta forma se verifican las predicciones el modelo usando temperaturas y velocidades de aire diferentes y para productos distintos. Se puede concluir que el modelo predice correctamente el comportamiento de los datos de literatura durante el almacenamiento congelado.

Tabla 6.3: Condiciones operativas de las experiencias de almacenamiento congelado de cilindros de carne vacuna ($E=2.95$ cm).

Condición	T_a (°C)	v (m/s)	HR (%)	Símbolo
CC1	-9	2.5	47	■
CC2	-9	1.5	45	●
CC3	-9	0.5	45	▲
CC4	-20	2.5	45	□
CC5	-20	1.5	48	○
CC6	-20	0.5	49	△
CC7	-30	2.5	45	×
CC8	-30	1.5	45	◆
CC9	-30	0.5	40	◇

Tabla 6.4: Condiciones operativas de las experiencias de almacenamiento congelado de cilindros de tilosa ($E=2.5$ cm).

Condición	T_a (°C)	v (m/s)	HR (%)	Símbolo
TIC1	-9	2.5	52	■
TIC2	-9	1.5	47	●
TIC3	-9	0.5	40	▲

VERIFICACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO

Tabla 6.4: Condiciones operativas de las experiencias de almacenamiento congelado de cilindros de tilosa (continuación).

Condición	T_a (°C)	v (m/s)	HR (%)	Símbolo
TIC4	-20	2.5	51	□
TIC5	-20	1.5	37	○
TIC6	-20	0.5	35	△
TIC7	-30	2.5	50	×
TIC8	-30	1.5	37	◆
TIC9	-30	0.5	48	◇

Tabla 6.5: Condiciones operativas de las experiencias de almacenamiento congelado de cilindros de papa ($E=2.5$ cm).

Condición	T_a (°C)	v (m/s)	HR (%)	Símbolo
PAC1	-9	2.5	44	■
PAC2	-9	1.5	40	●
PAC3	-9	0.5	35	▲
PAC4	-20	2.5	42	□
PAC5	-20	1.5	38	○
PAC6	-20	0.5	40	△
PAC7	-30	2.5	48	×
PAC8	-30	1.5	50	◆
PAC9	-30	0.5	60	◇

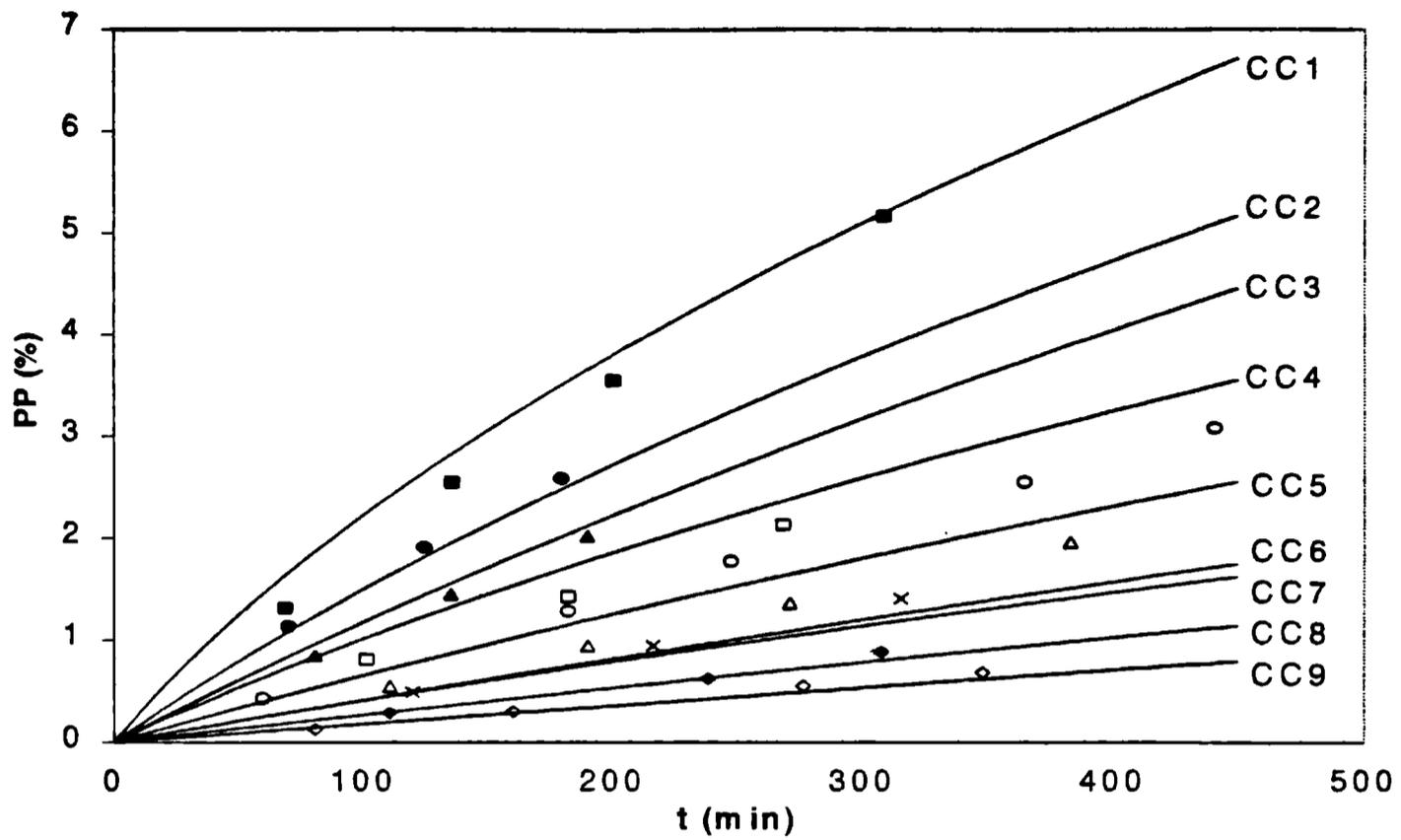


Figura 6.1: Pérdida de peso en carne.— Valores predichos, Símbolos: Datos experimentales (Sukhwal y Aguirre Punte, 1983).

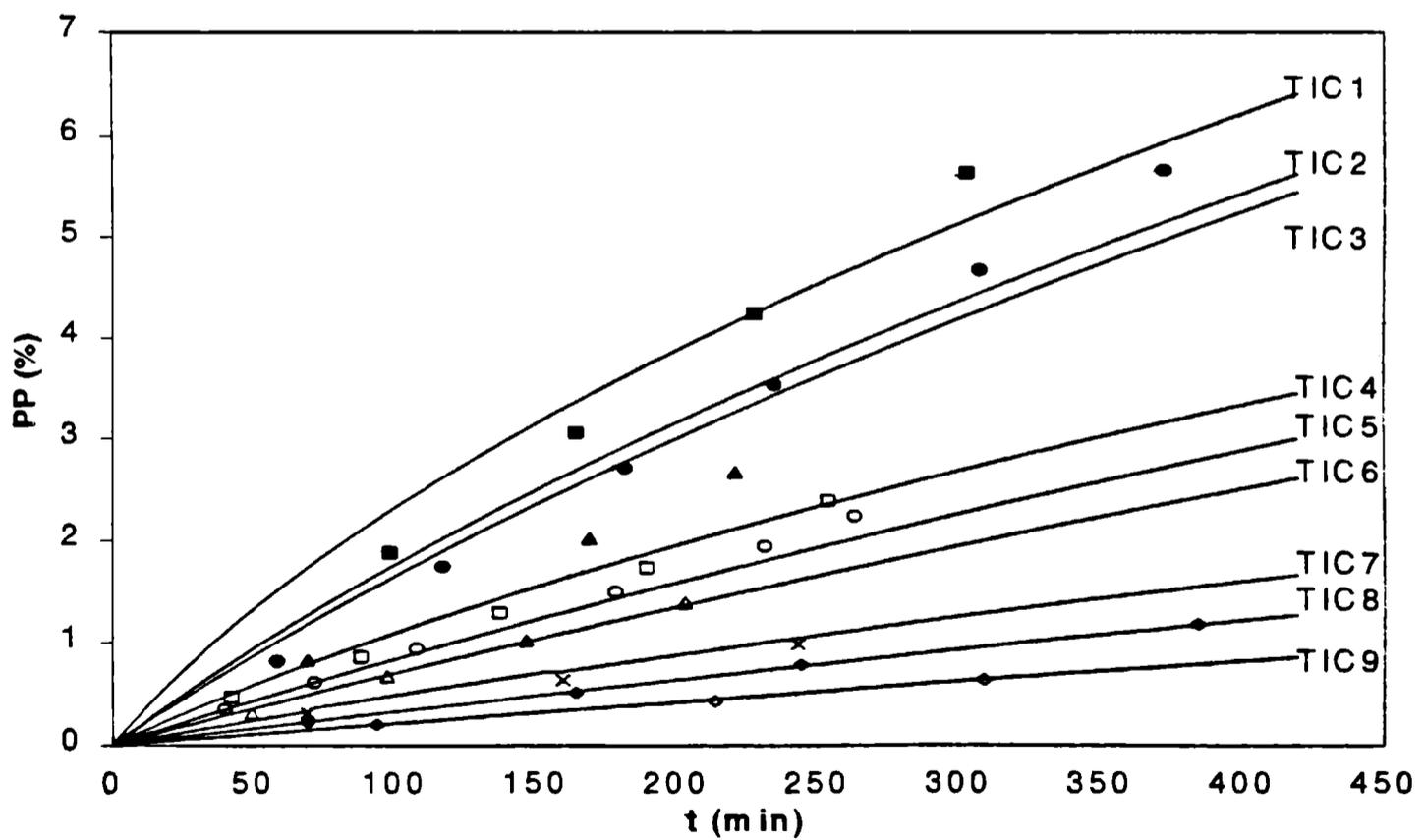


Figura 6.2: Pérdida de peso en tilosa. — Valores predichos, Símbolos: Datos experimentales (Sukhwal y Aguirre Punte, 1983).

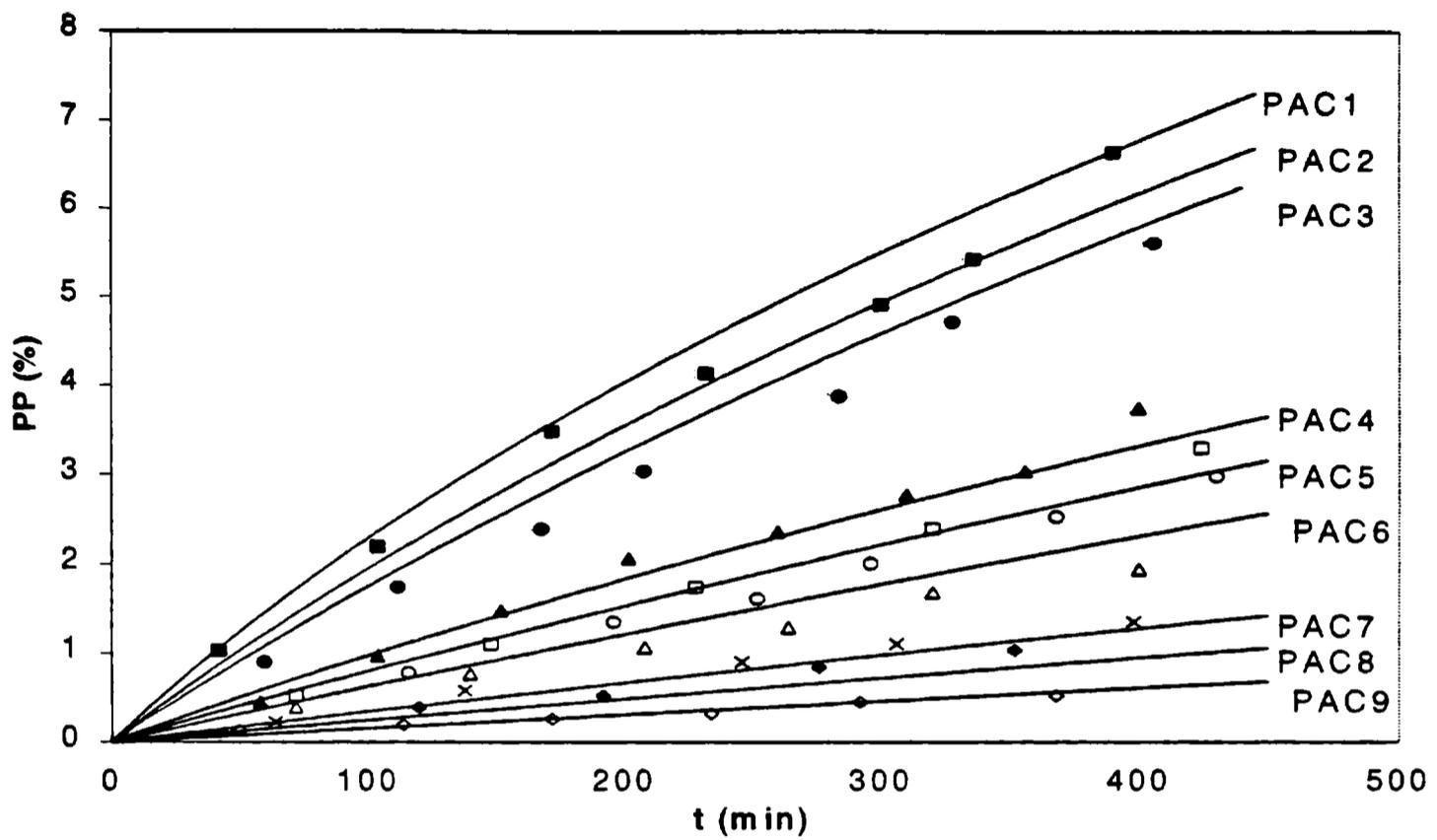


Figura 6.3: Pérdida de peso en papa. — Valores predichos, Símbolos: Datos experimentales (Lambrinos y Aguirre Puente, 1983).

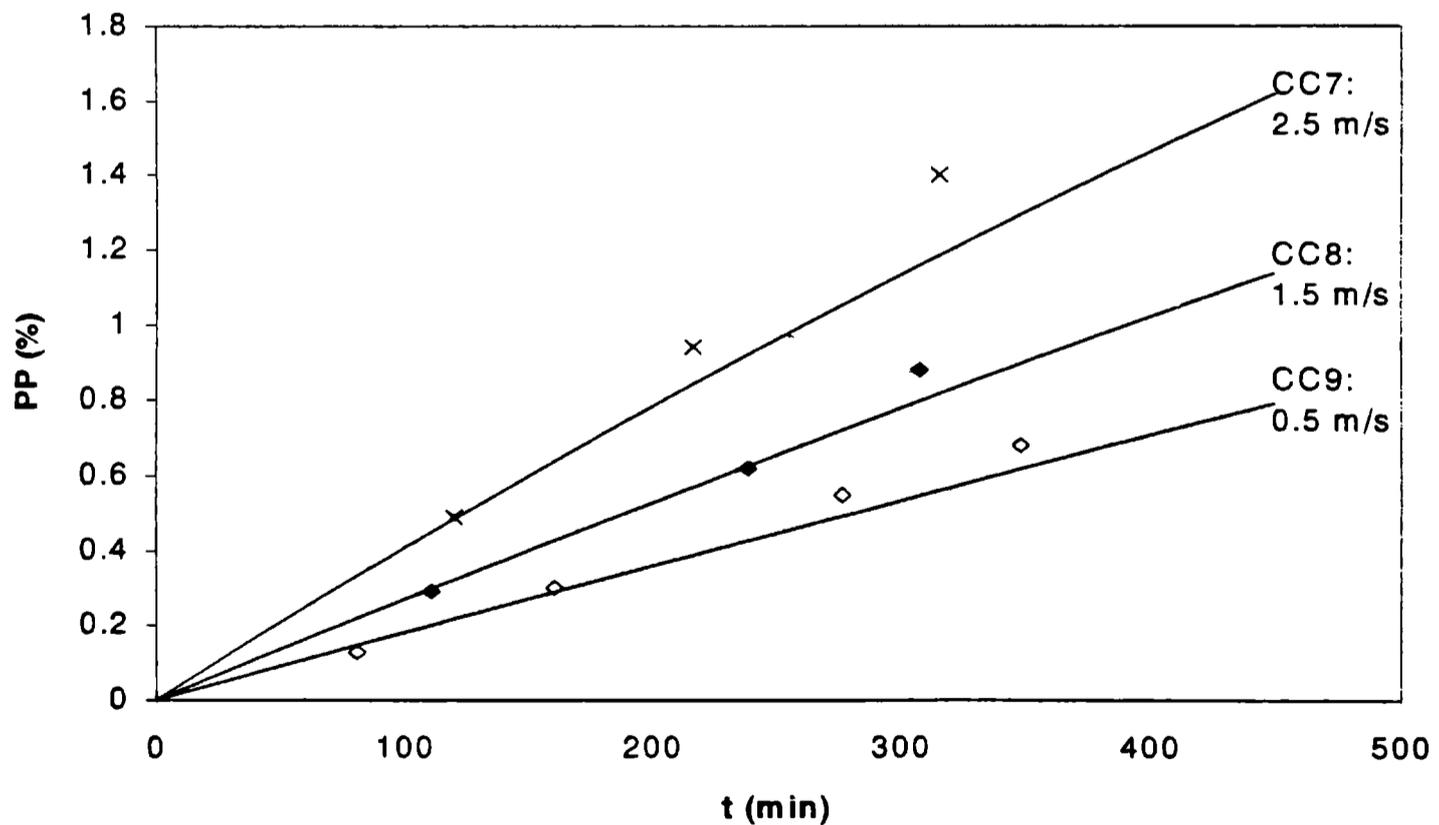


Figura 6.4: Efecto de la velocidad del aire en la pérdida de peso de carne vacuna.

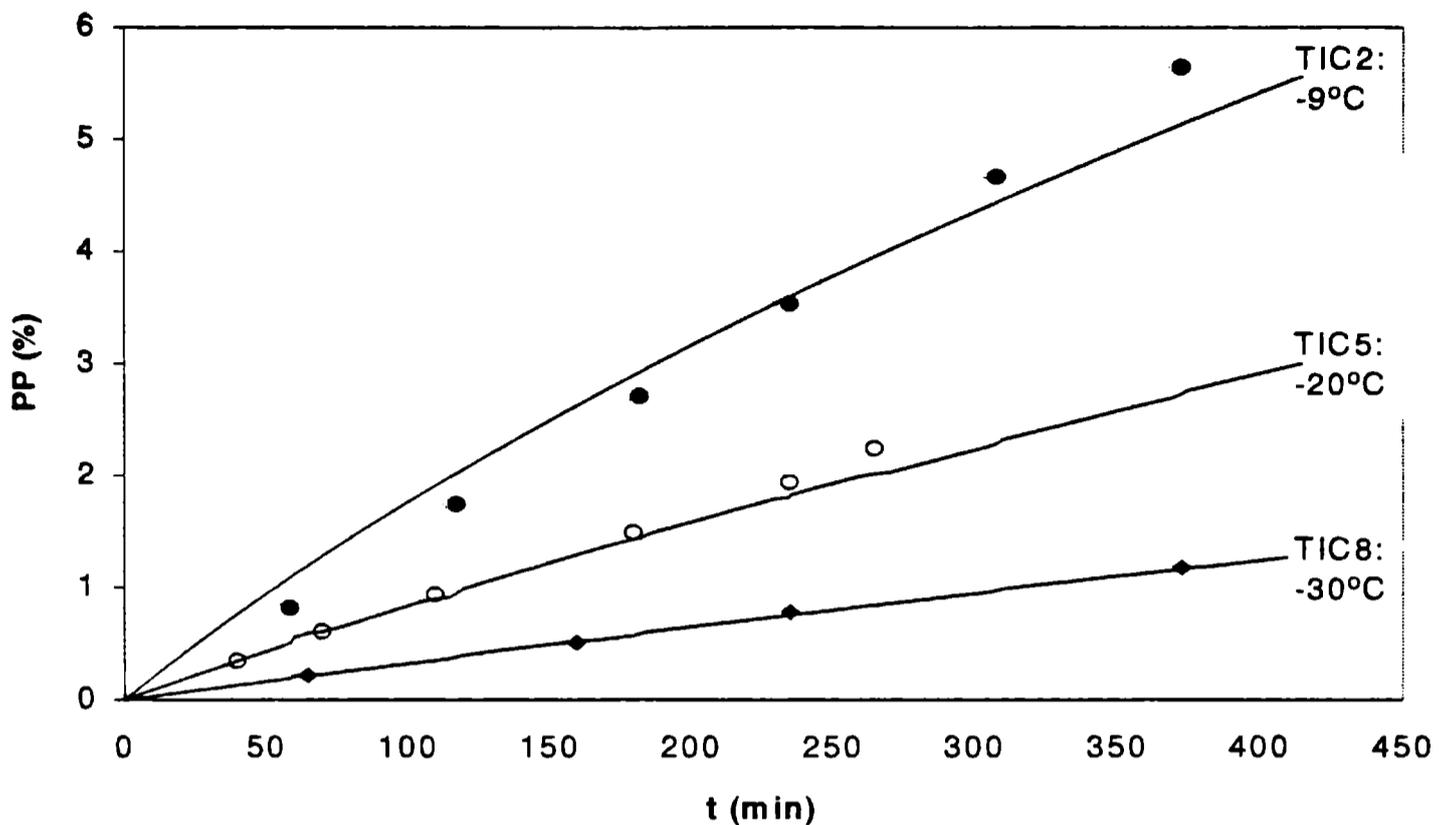


Figura 6.5: Efecto de la temperatura del aire en la pérdida de peso de muestras de tilosa.

6.3 VALIDACIÓN CONTRA DATOS EXPERIMENTALES PROPIOS

Los resultados obtenidos de pérdida de peso y temperatura del centro durante las experiencias de congelación y almacenamiento congelado de hamburguesas, albóndigas, cilindros de peceto y pechugas de pollo se emplearon para validar las predicciones de modelo. El mismo se verifica con todas sus etapas, pues las muestras ingresan a temperatura positiva, se congelan, alcanzan la temperatura del aire y permanecen dentro de la cámara durante un día.

6.3.1 PERFIL DE TEMPERATURAS

Se emplearon los datos experimentales obtenidos de la temperatura del centro de albóndigas para verificar las predicciones del modelo.

Las condiciones operativas bajo las cuales se realizaron los experimentos se encuentran descritas en la Tabla 5.2 del Capítulo 5.

En las Figuras 6.6, 6.7, 6.8 y 6.9 se muestra el descenso de la temperatura del centro de las muestras cuando son colocadas dentro del túnel de congelación. En todos los casos la temperatura inicial es mayor a la temperatura inicial de congelación. Los resultados experimentales se presentan con el símbolo ■ y los predichos en línea continua.

El modelo predice con exactitud el descenso de la temperatura durante el enfriamiento, el cambio de estado y el descenso de temperatura hasta que el producto alcanza la temperatura del aire de la cámara. Esto confirma que la formulación de la transferencia de energía del modelo matemático es acertada y adecuada para describir tanto la refrigeración, como la congelación y el almacenamiento congelado.

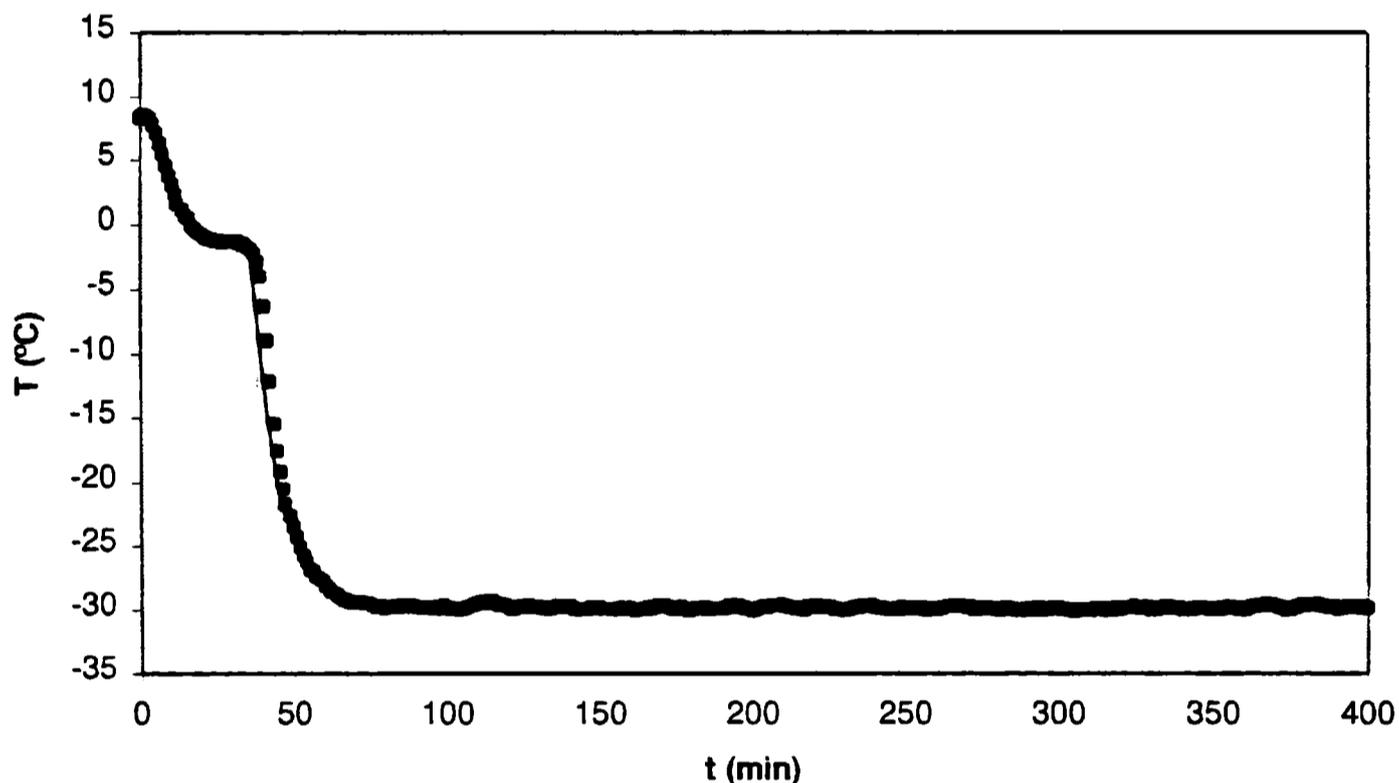


Figura 6.6: Temperatura del centro de albóndigas en la condición AC1.

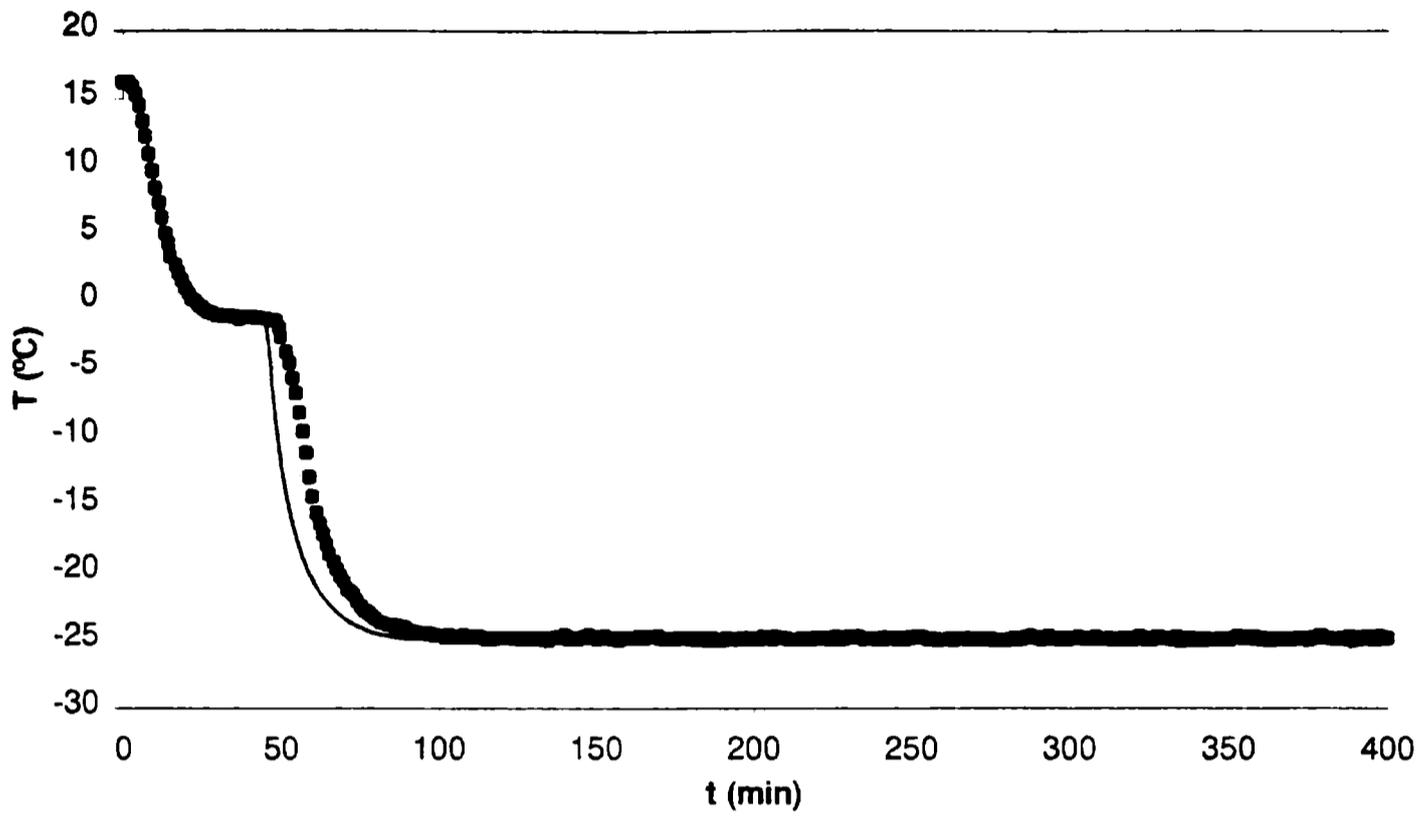


Figura 6.7: Temperatura del centro de albóndigas en la condición AC4.

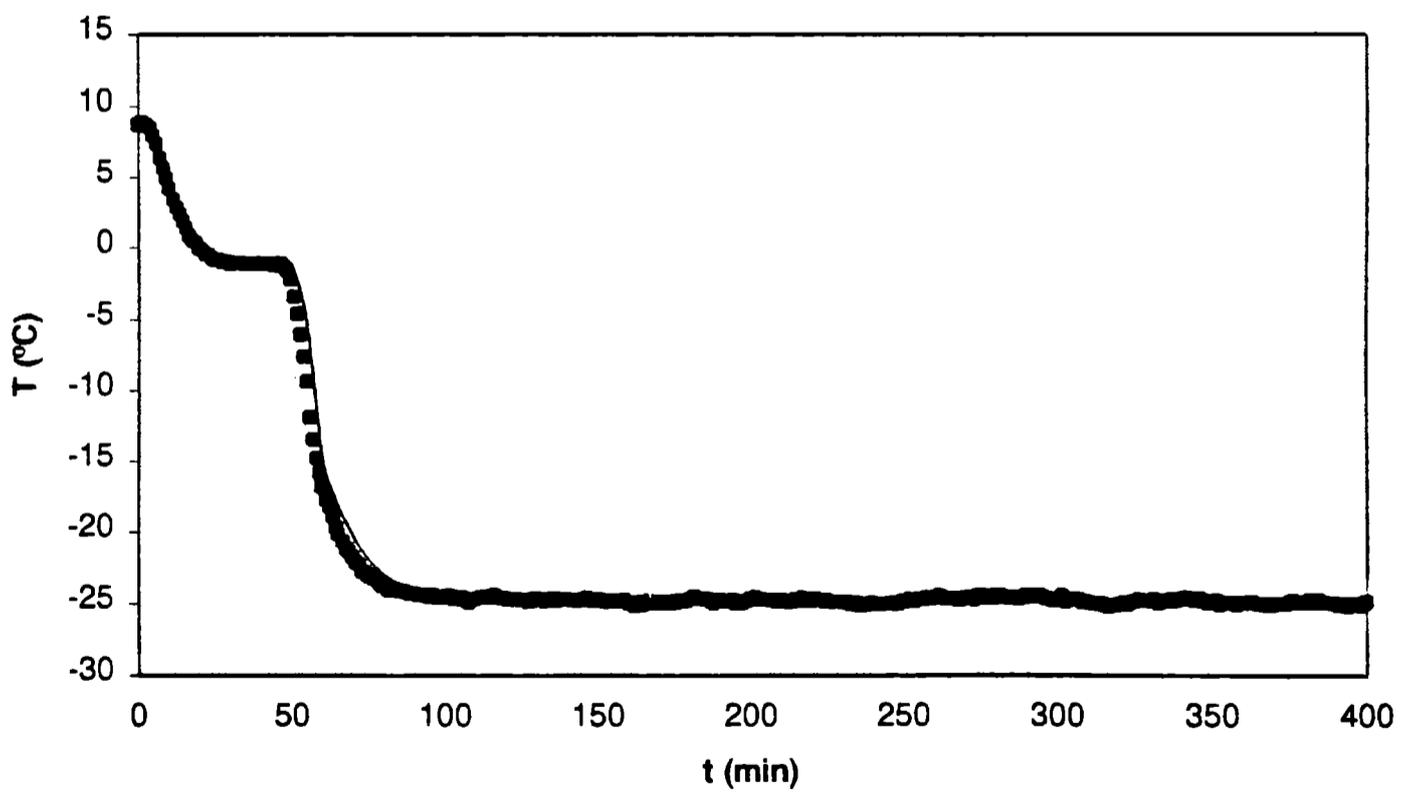


Figura 6.8: Temperatura del centro de albóndigas en la condición AC5.

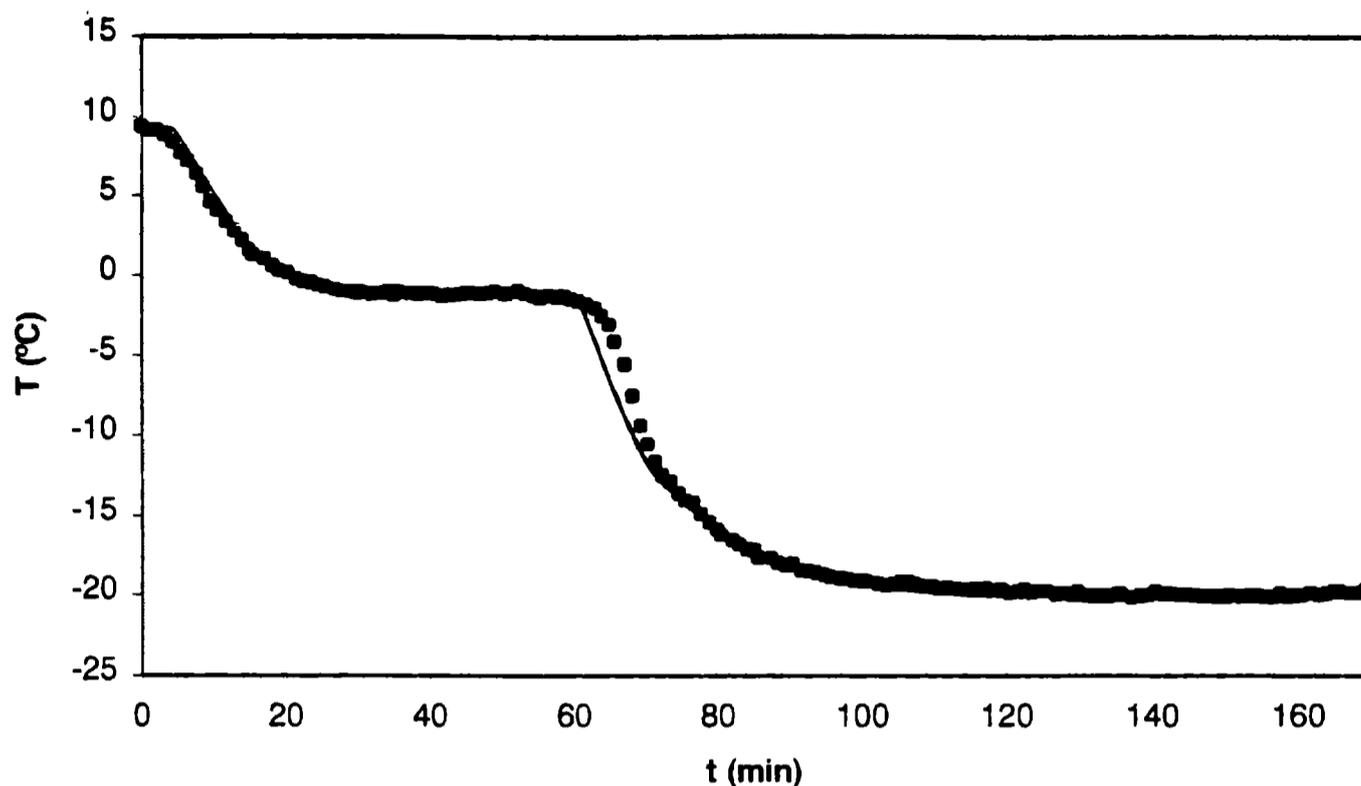


Figura 6.9: Temperatura del centro de albóndigas en la condición AC8.

6.3.2 PÉRDIDA DE PESO

Las experiencias descritas en el Capítulo 5 se emplearon también para validar las predicciones que realiza el modelo matemático con respecto a la pérdida de peso. Como se ha señalado, para la realización de las mismas se han empleado condiciones operativas constantes y variables con el tiempo, esto implica que no solamente se tiene en cuenta la respuesta del modelo frente a una situación en particular, sino que también, se consideran distintas clases de condiciones de contorno.

6.3.2.1 CONDICIONES OPERATIVAS CONSTANTES

Los resultados de pérdida de peso obtenidos para hamburguesas, albóndigas, peceto y pechugas de pollo son empleados para la validación frente a las condiciones operativas consideradas en cada caso.

Las Figuras 6.10-6.45 nos presentan los resultados predichos y los experimentales para cada condición operativa seleccionada. Las mismas se describen en las Tablas 5.1, 5.2, 5.3 y

5.4 en el Capítulo 5. Los resultados experimentales se presentan con el símbolo ■ y los resultados predichos por el modelo en línea continua.

En las figuras se puede observar que el modelo calcula adecuadamente el descenso del peso de las muestras durante los procesos de refrigeración y congelación. Cuando la temperatura de las muestras alcanza la temperatura del medio el modelo matemático predice el cambio en la pendiente de la velocidad de pérdida de materia que se observa en la práctica.

Es importante señalar que los valores experimentales se desvían por encima y por debajo de la curva predicha por el modelo. No presentan un error sistemático hacia un sentido determinado, por lo cual la desviación se debe, fundamentalmente, al error experimental.

El modelo matemático se adecua en cada situación al comportamiento de los resultados experimentales. Esto nos permite afirmar que la formulación realizada en el modelo matemático para la transferencia de materia durante el enfriamiento, congelación y almacenamiento congelado es correcta conforme a lo que ocurre en la práctica.

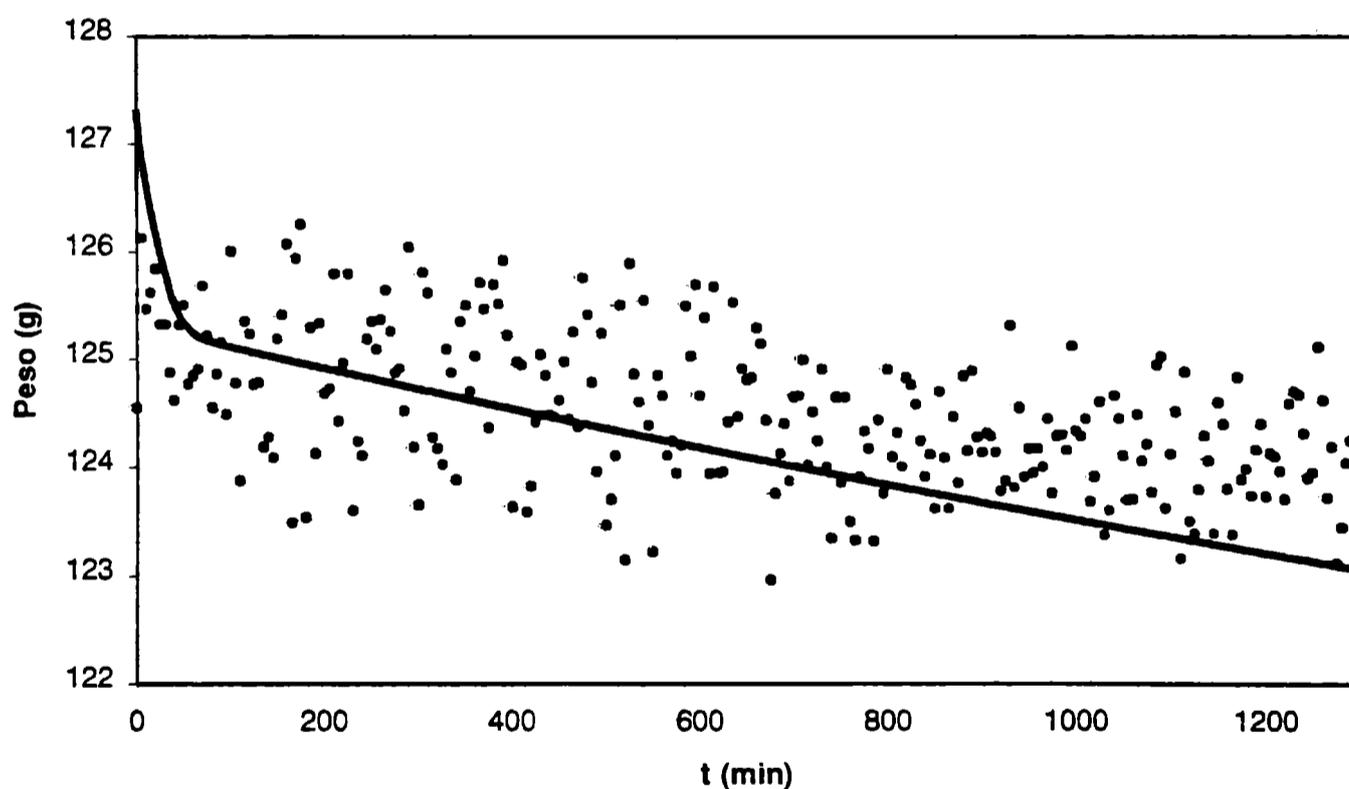


Figura 6.10: Pérdida de peso de hamburguesas en la condición HC1.

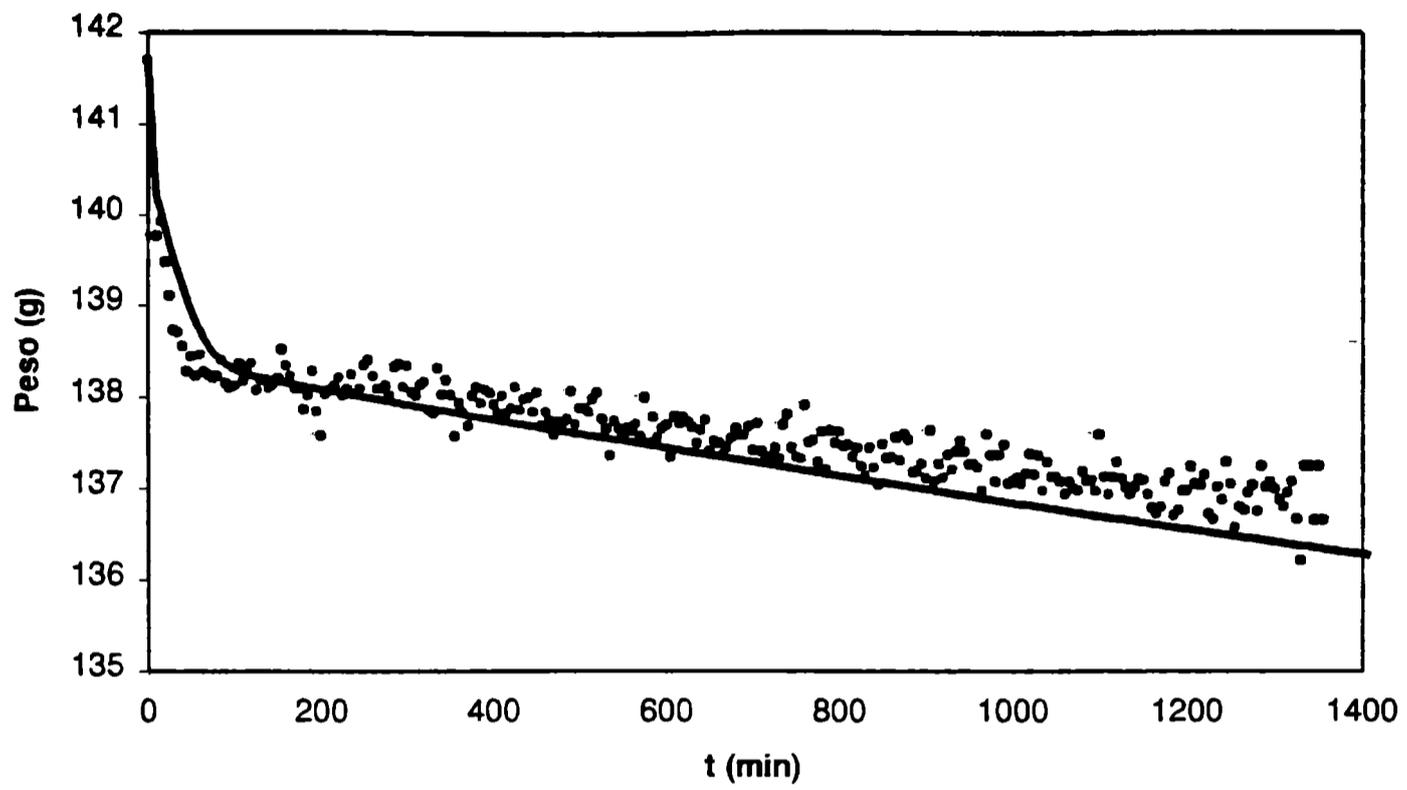


Figura 6.11: Pérdida de peso de hamburguesas en la condición HC2.

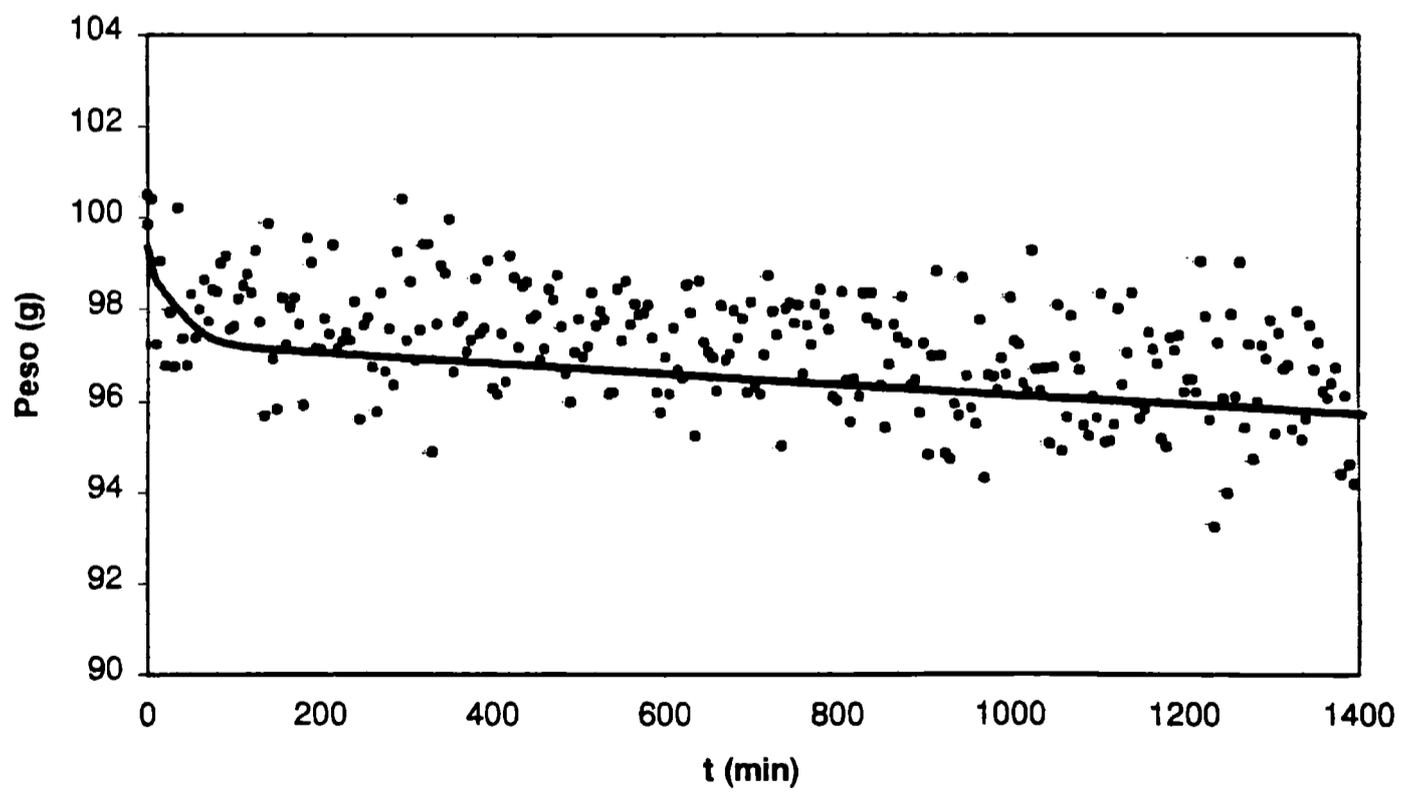


Figura 6.12: Pérdida de peso de hamburguesas en la condición HC3.

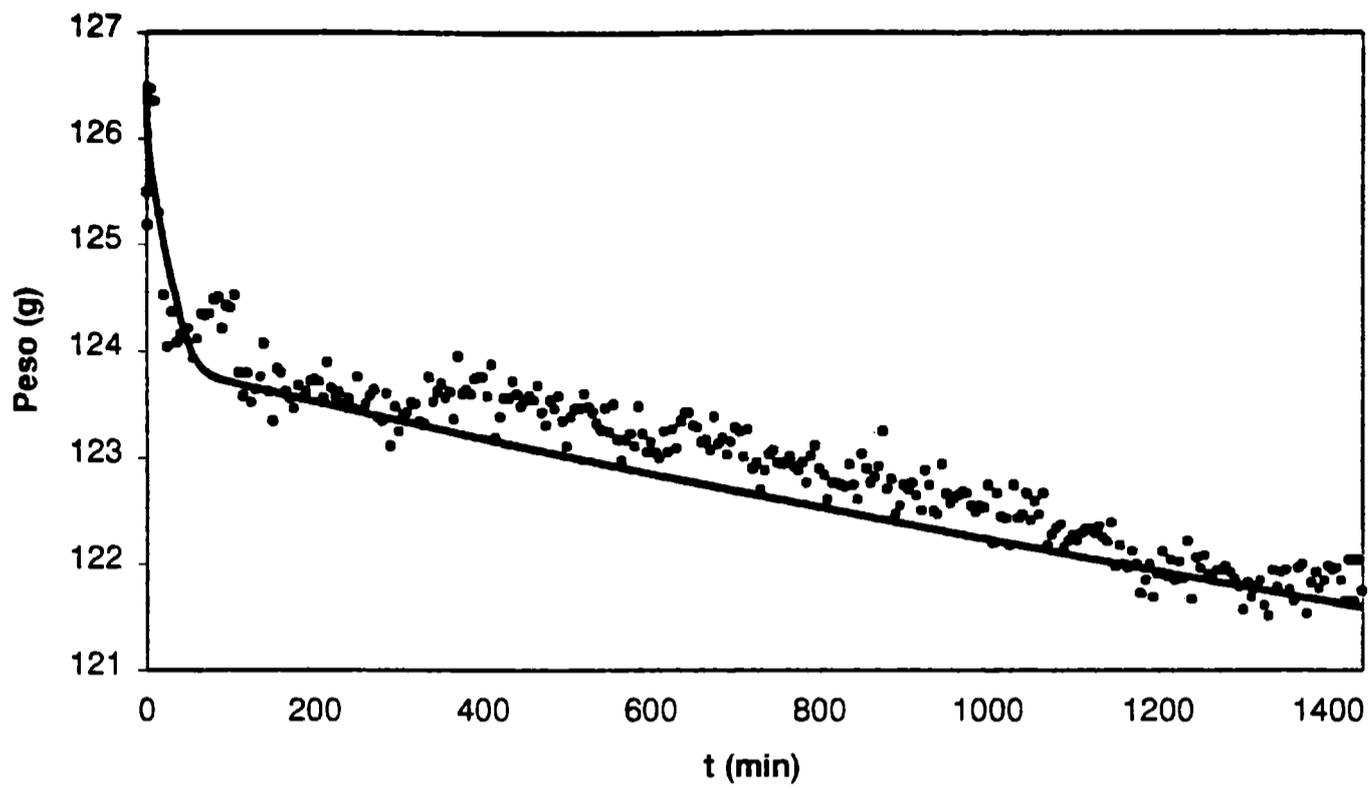


Figura 6.13: Pérdida de peso de hamburguesas en la condición HC4.

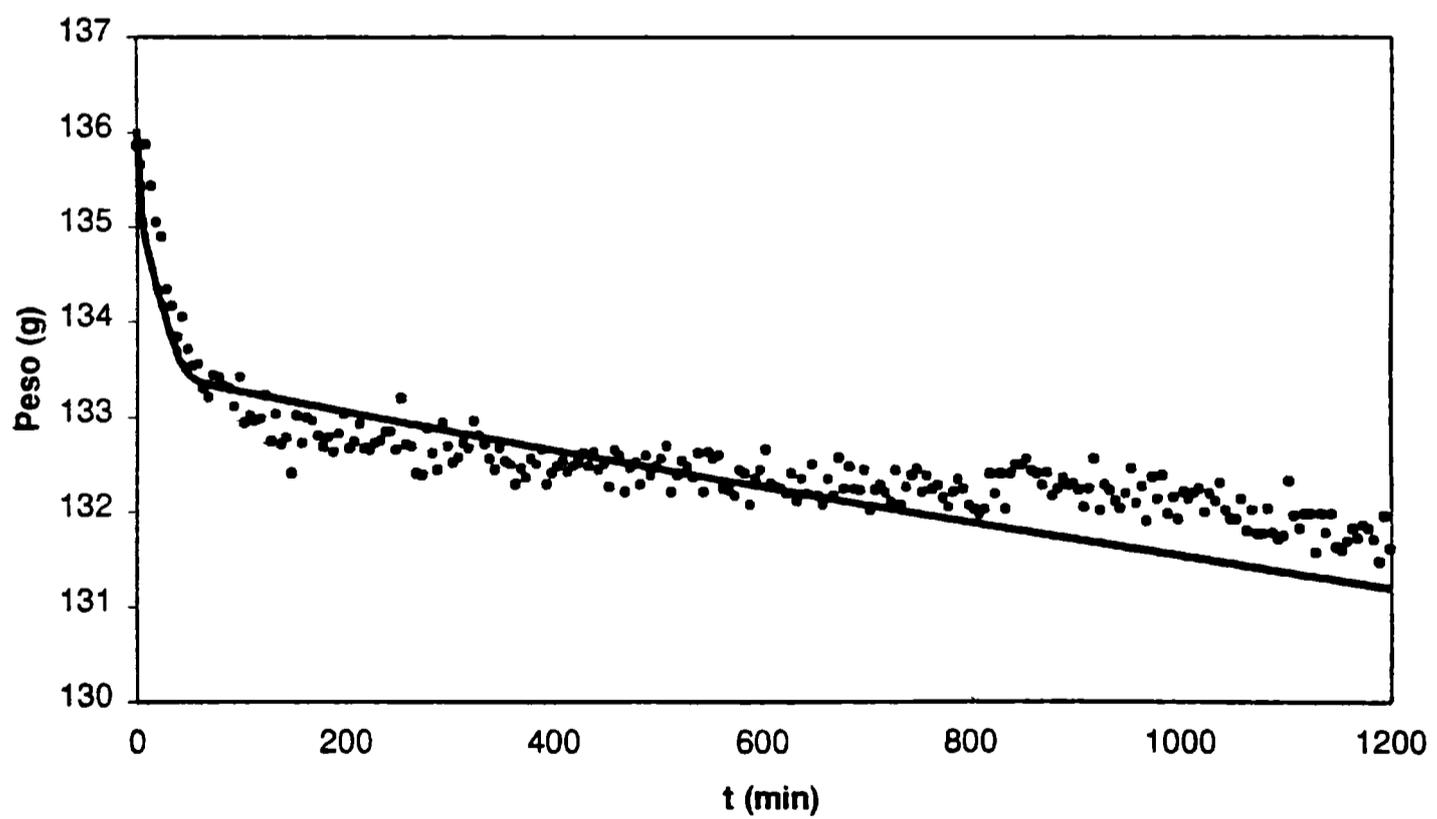


Figura 6.14: Pérdida de peso de hamburguesas en la condición HC5.

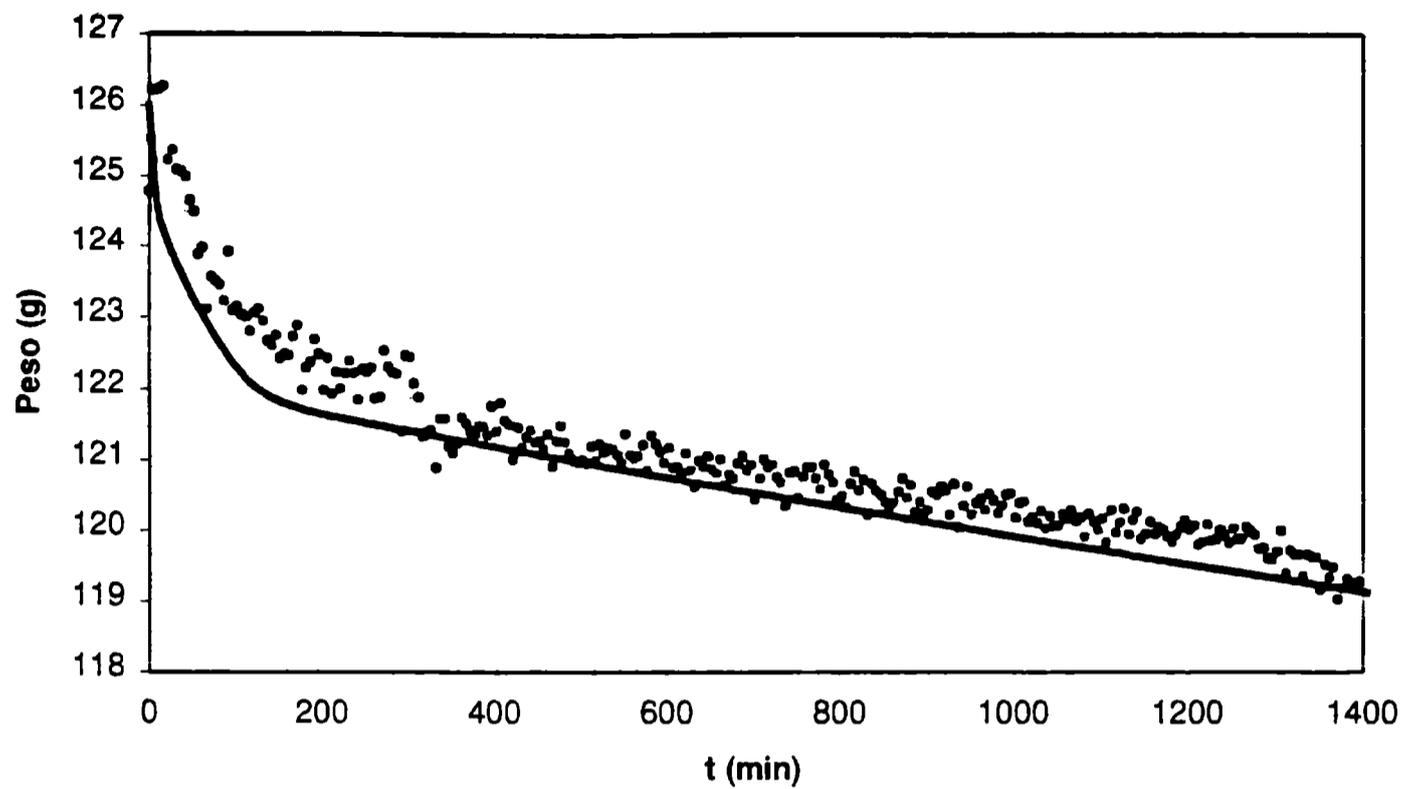


Figura 6.15: Pérdida de peso de hamburguesas en la condición HC6.

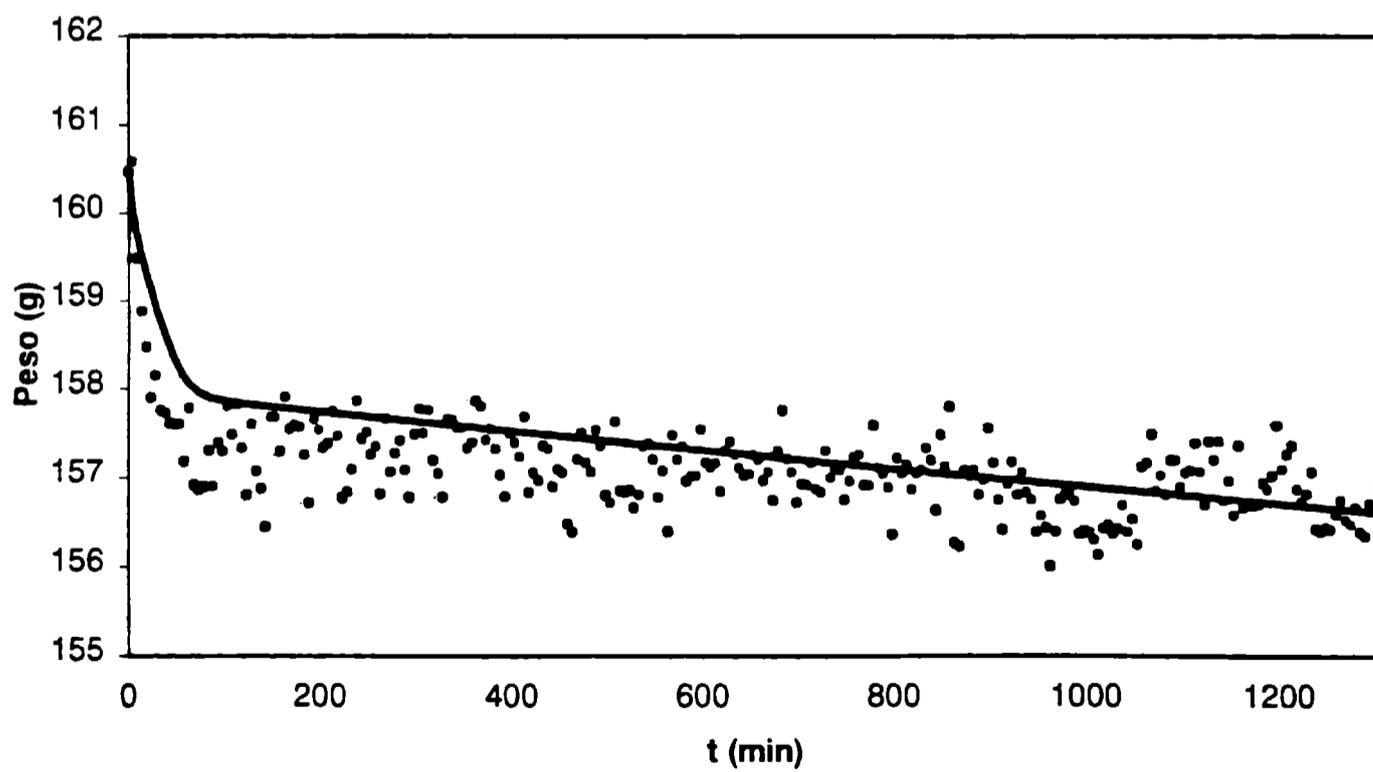


Figura 6.16: Pérdida de peso de hamburguesas en la condición HC7.

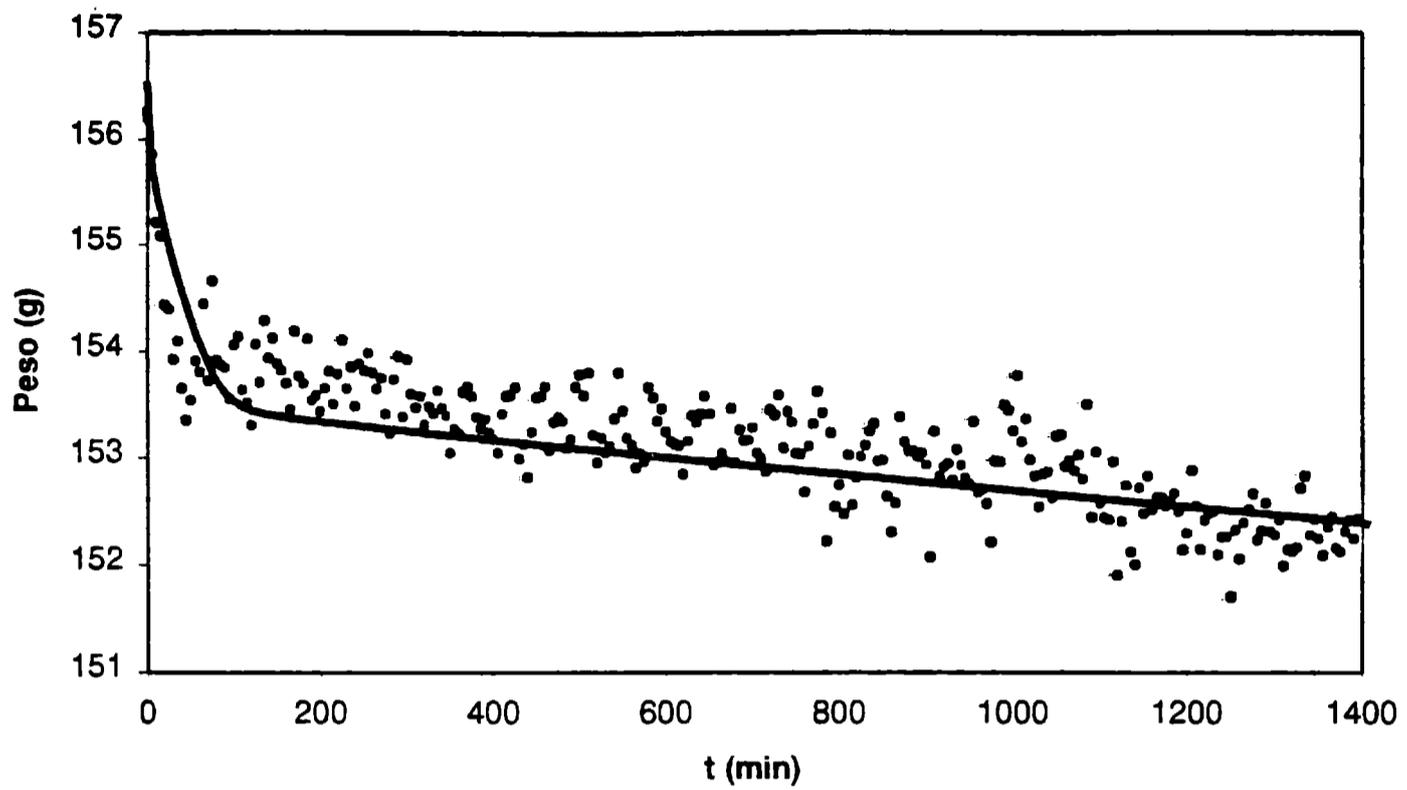


Figura 6.17: Pérdida de peso de hamburguesas en la condición HC8.

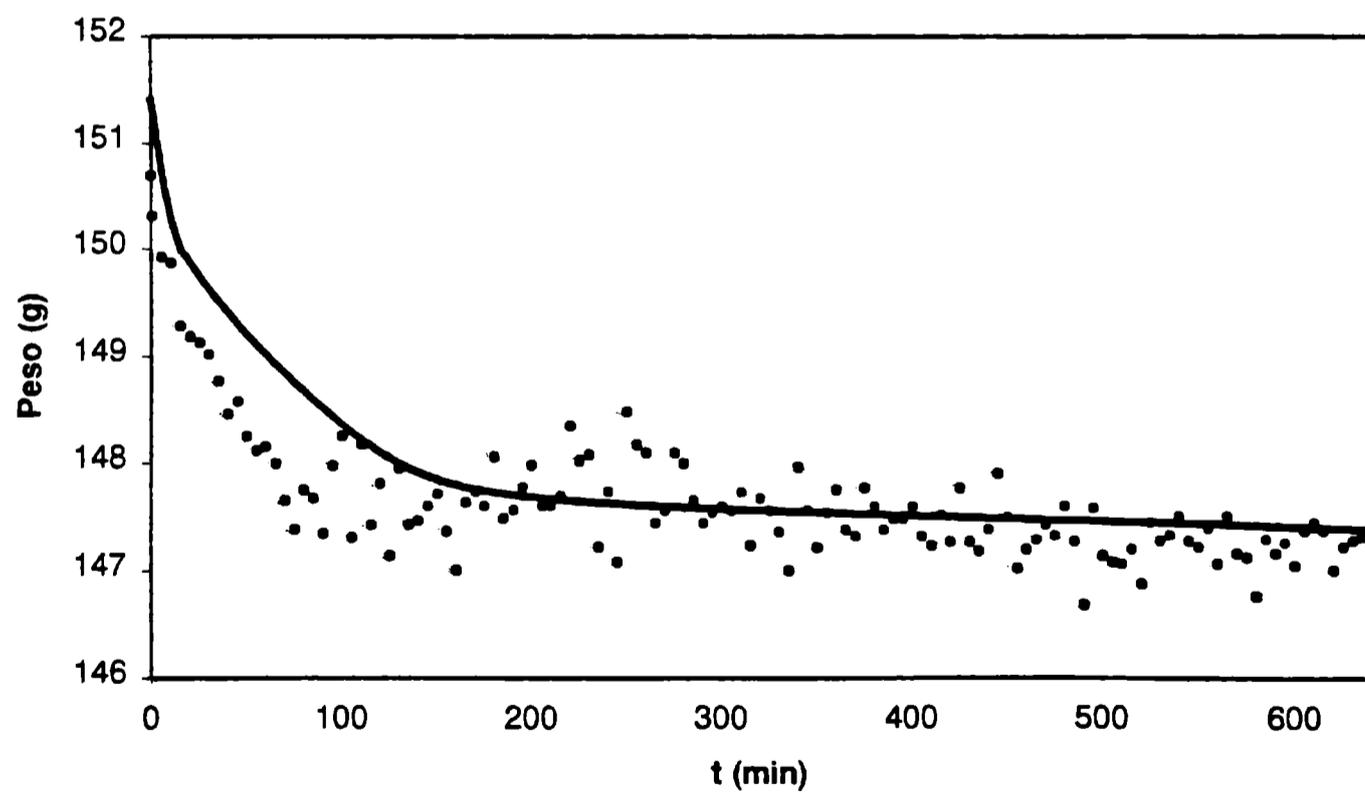


Figura 6.18: Pérdida de peso de hamburguesas en la condición HC9.

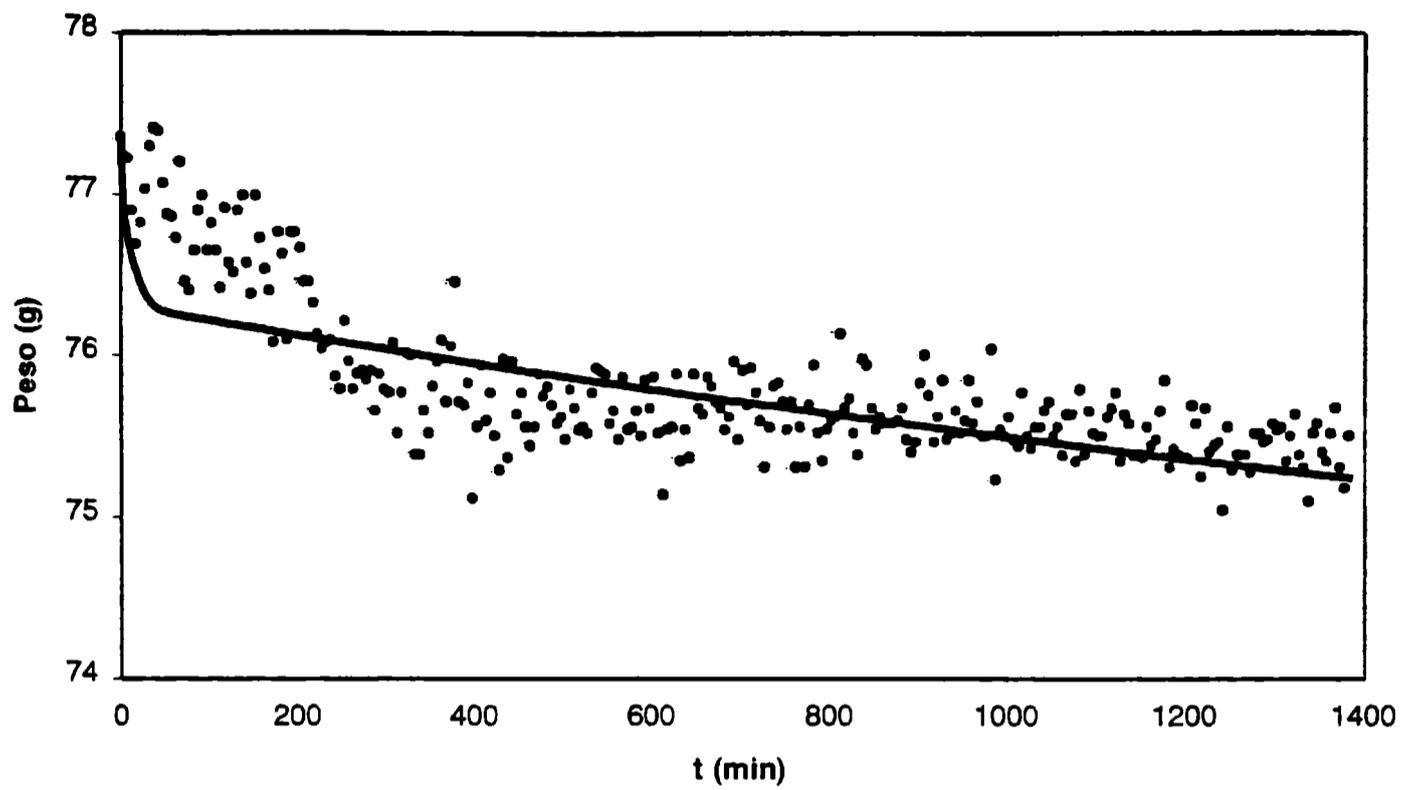


Figura 6.19: Pérdida de peso de albóndigas en la condición AC1.

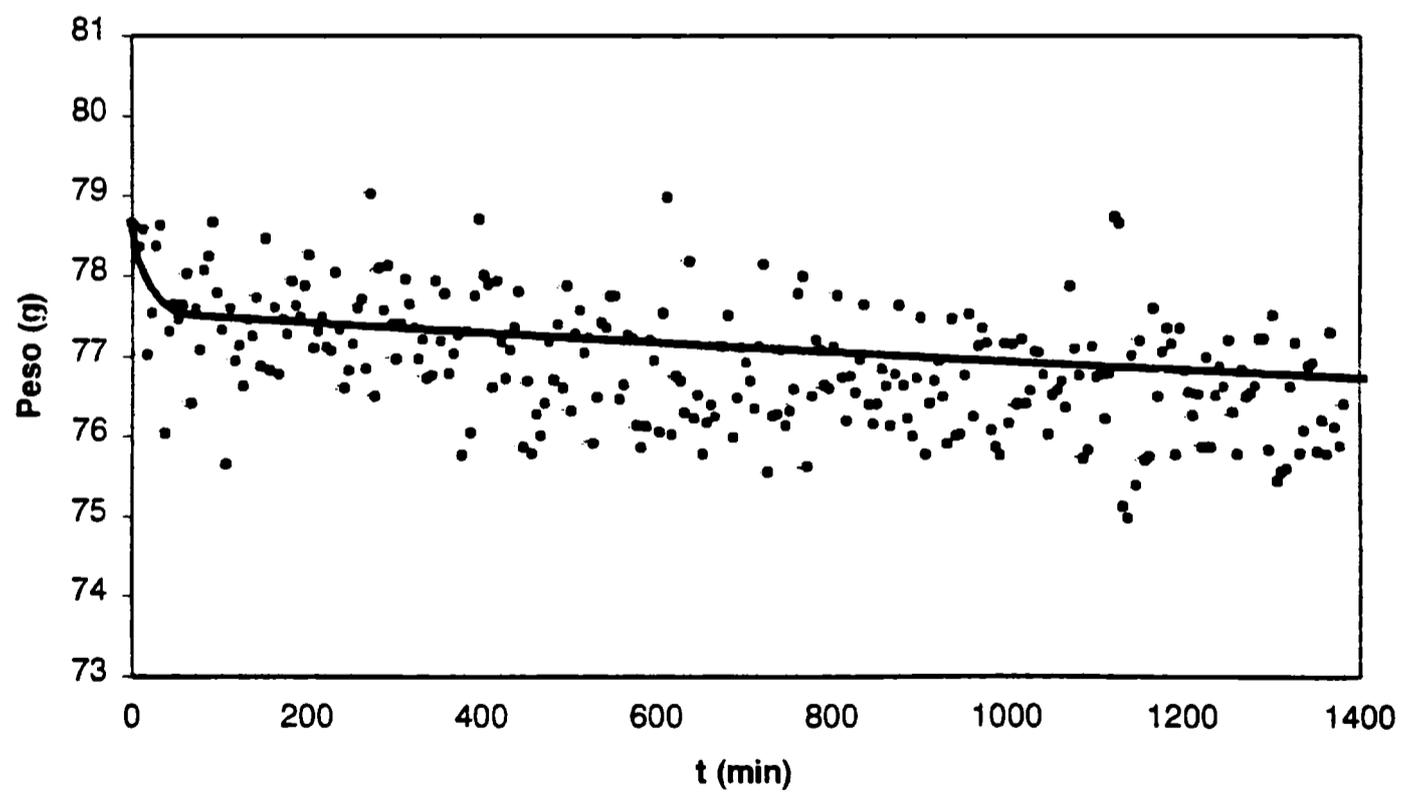


Figura 6.20: Pérdida de peso de albóndigas en la condición AC2.

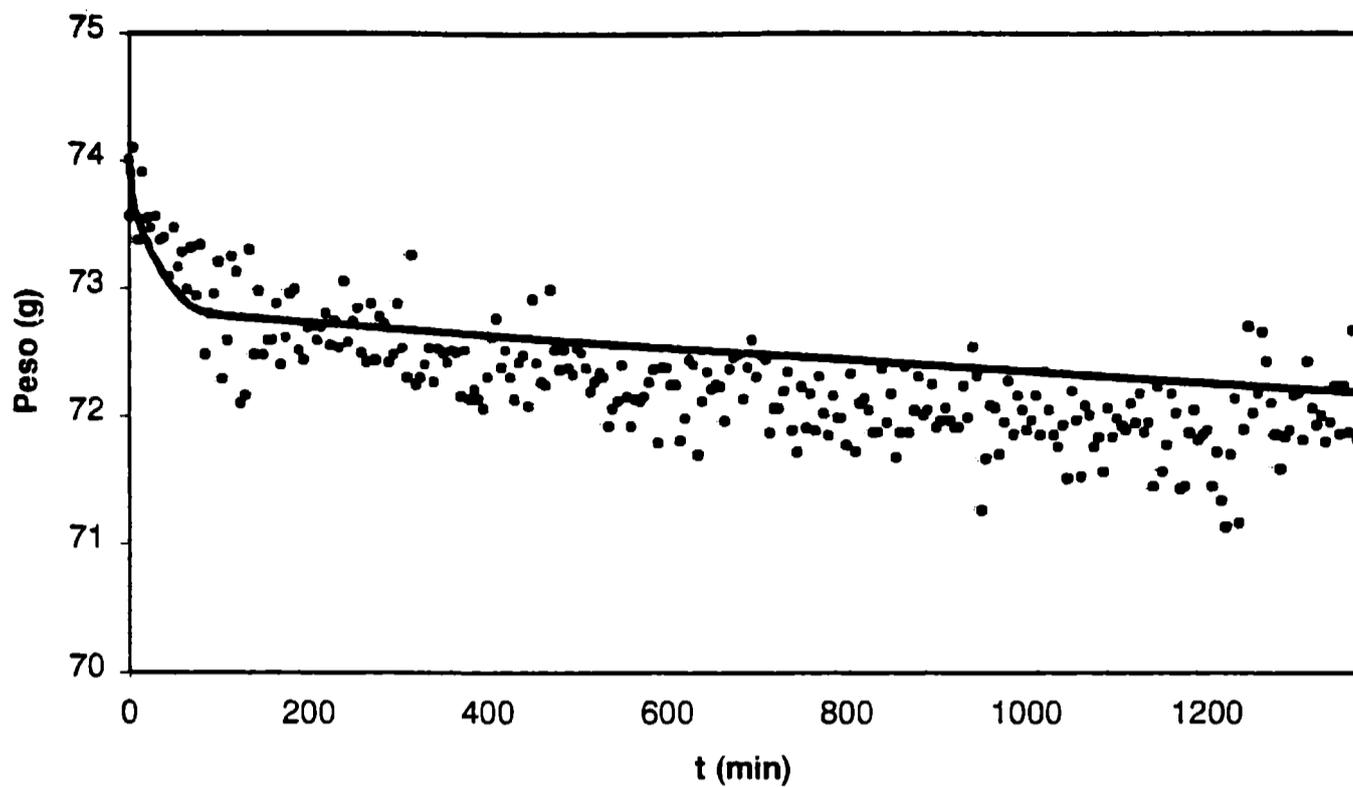


Figura 6.21: Pérdida de peso de albóndigas en la condición AC3.

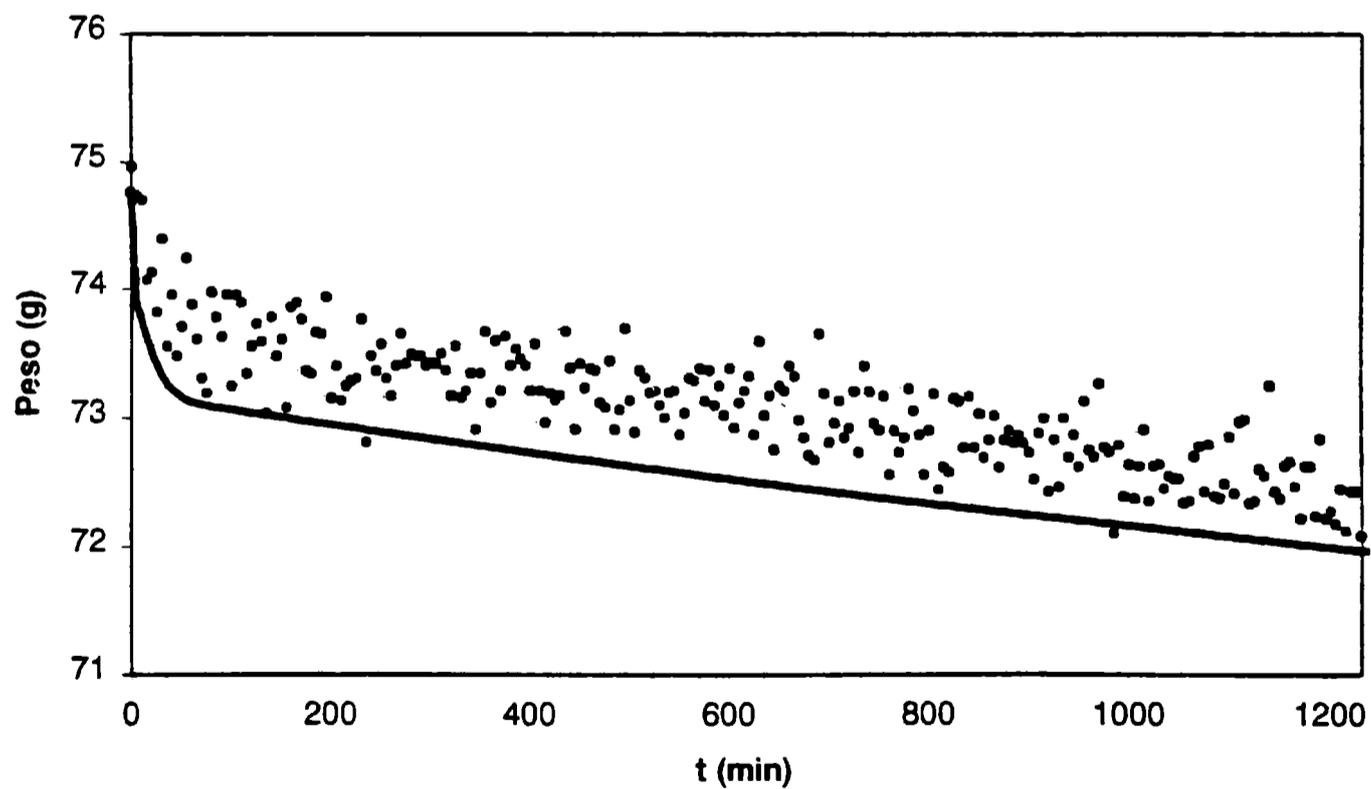


Figura 6.22: Pérdida de peso de albóndigas en la condición AC4.

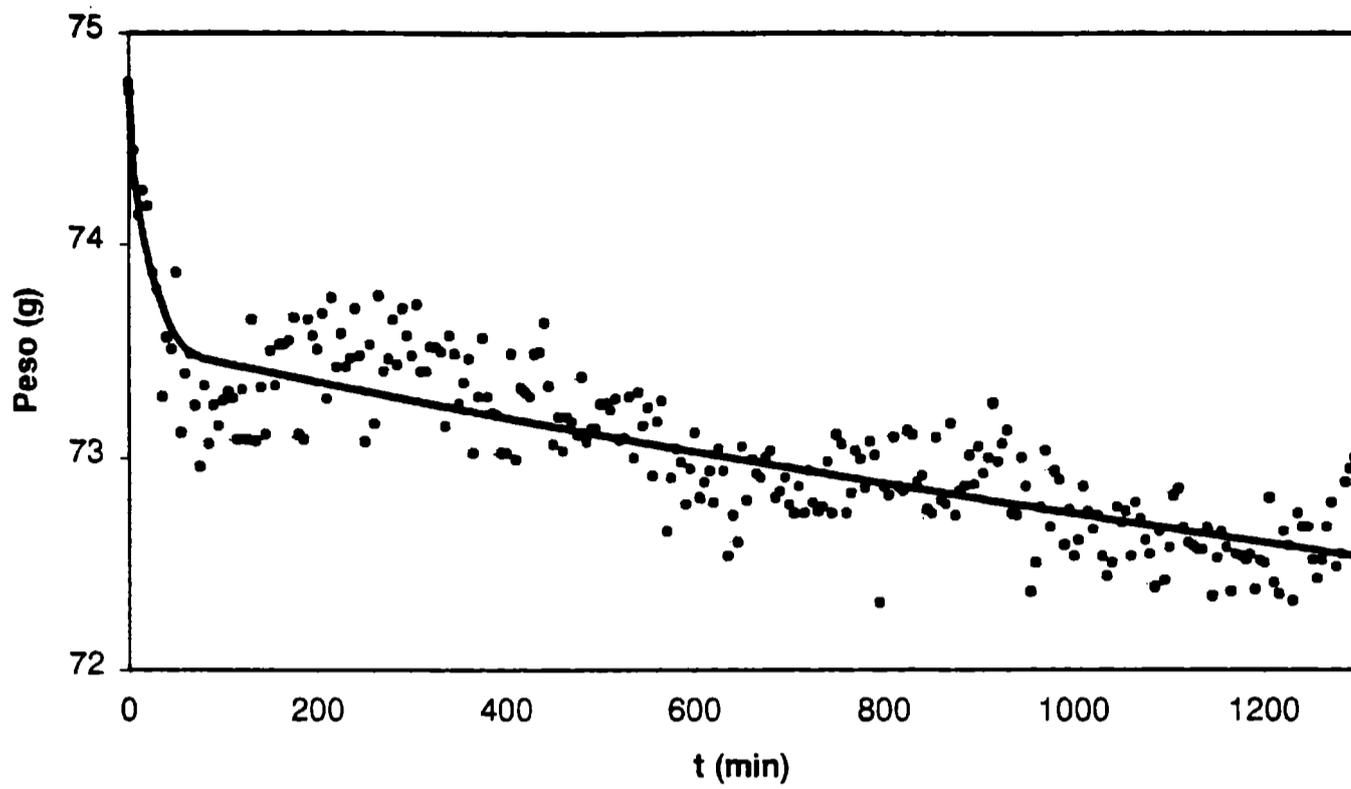


Figura 6.23: Pérdida de peso de albóndigas en la condición AC5.

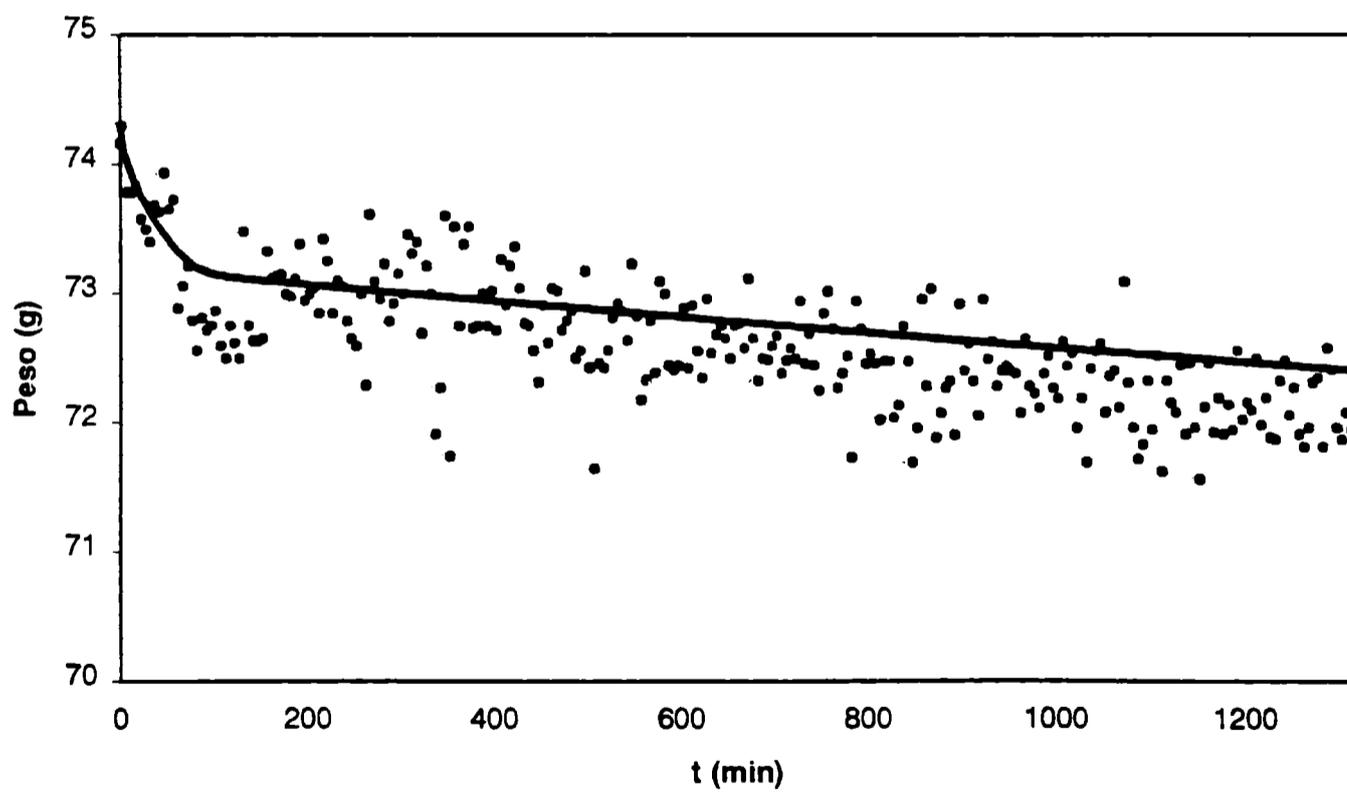


Figura 6.24: Pérdida de peso de albóndigas en la condición AC6.

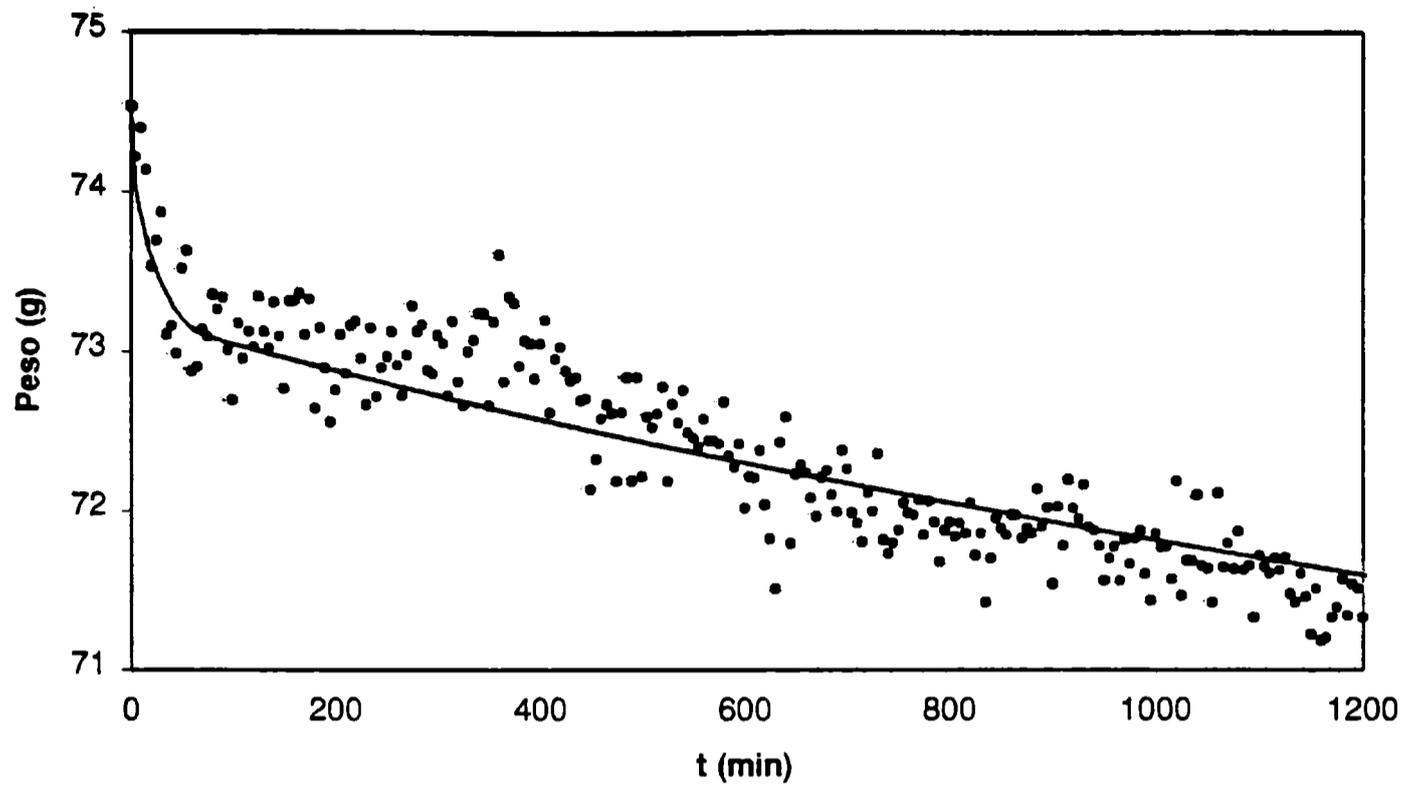


Figura 6.25: Pérdida de peso de albóndigas en la condición AC7.

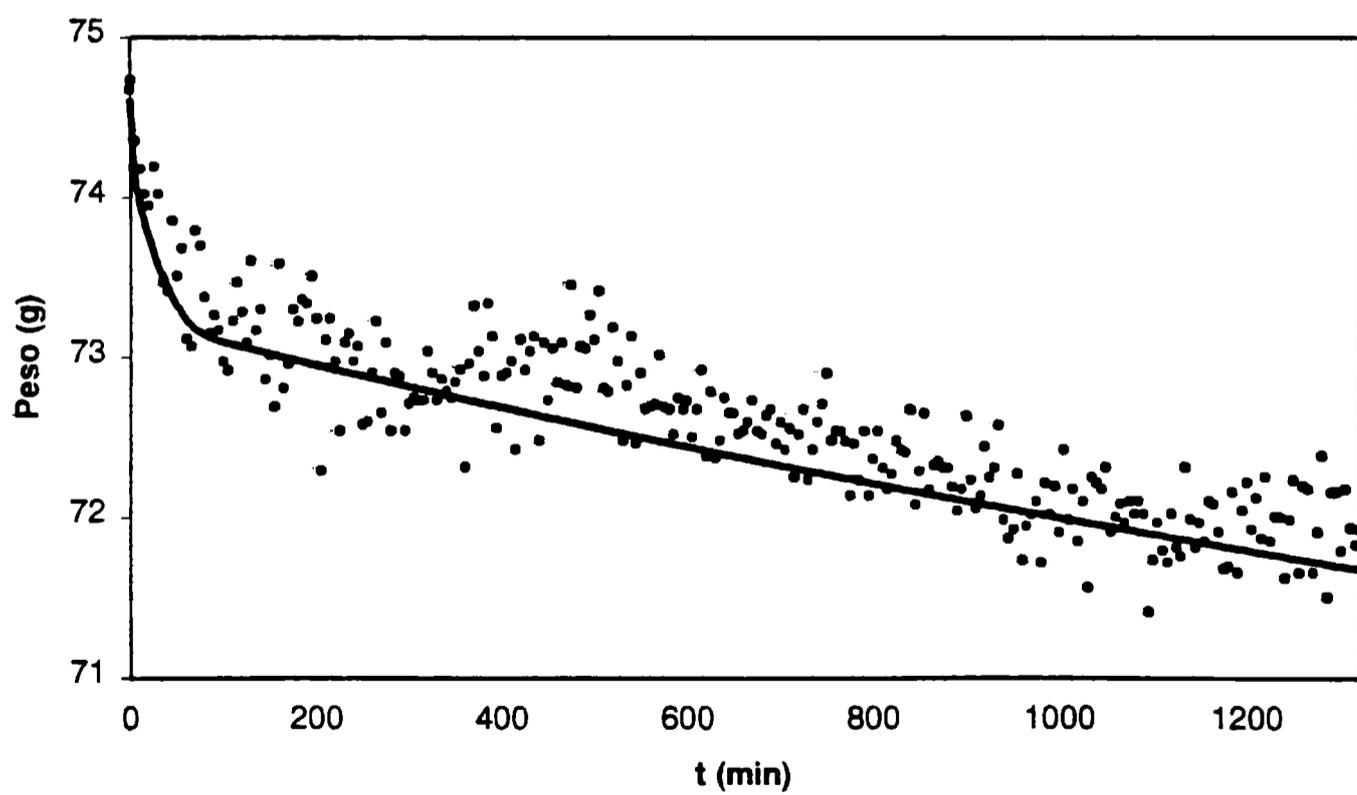


Figura 6.26: Pérdida de peso de albóndigas en la condición AC8.

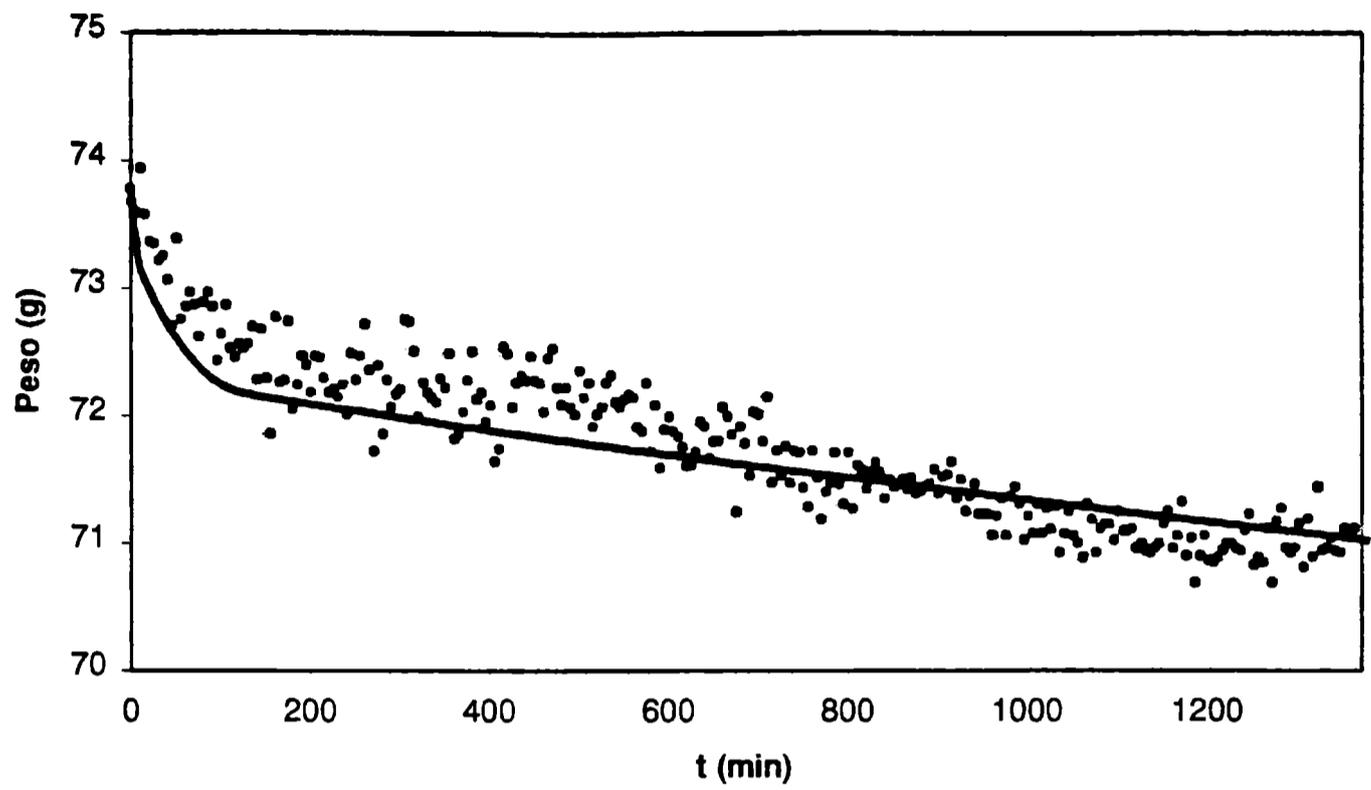


Figura 6.27: Pérdida de peso de albóndigas en la condición AC9.

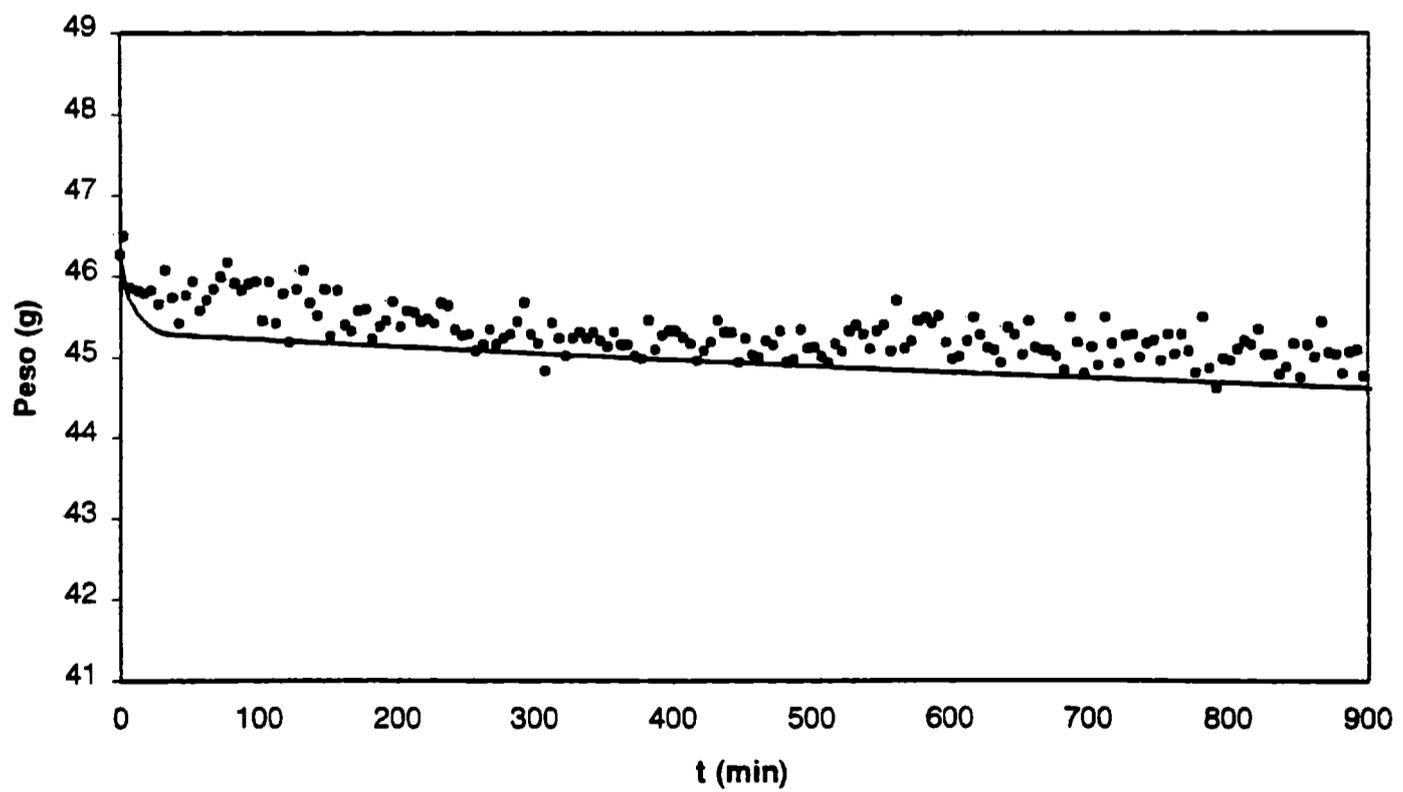


Figura 6.28: Pérdida de peso de cilindros de peceto en la condición PC1.

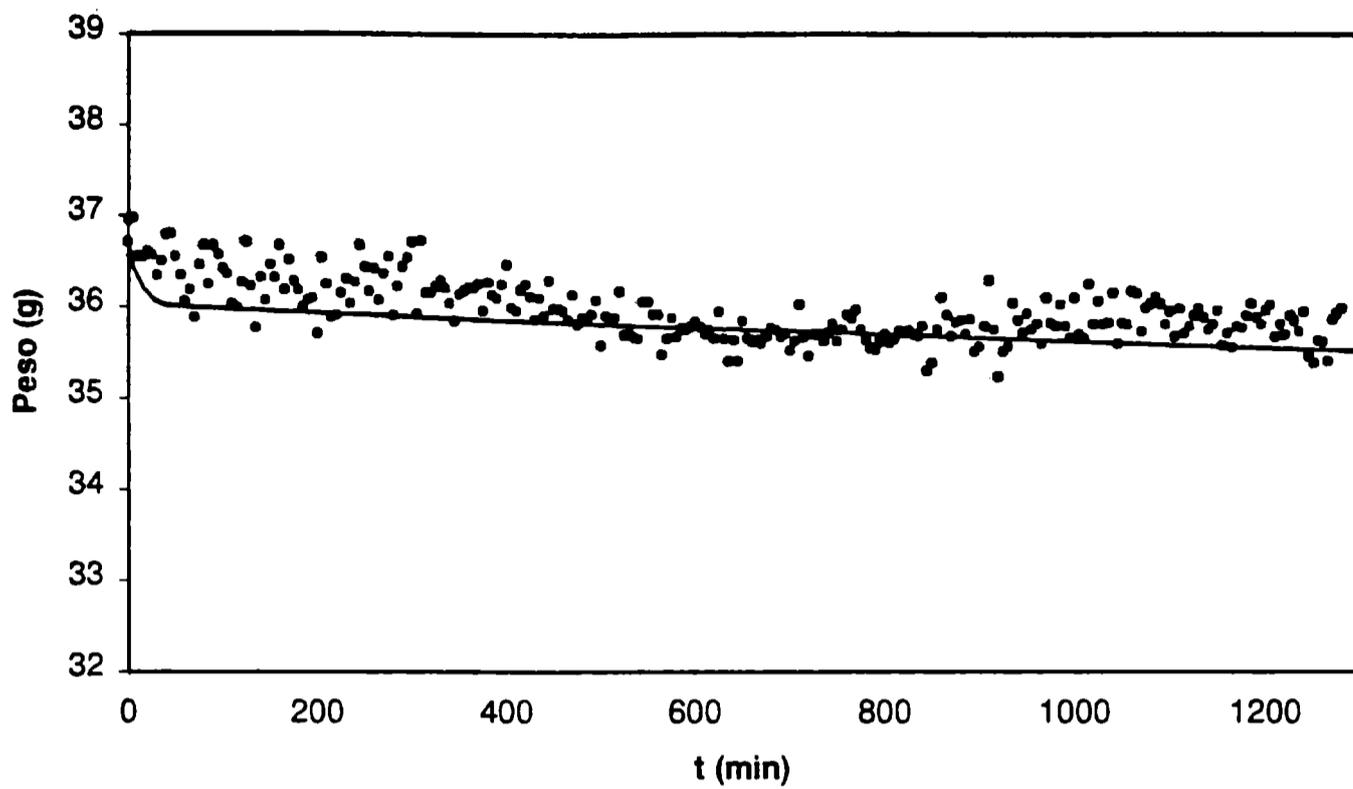


Figura 6.29: Pérdida de peso de cilindros de peceto en la condición PC2.

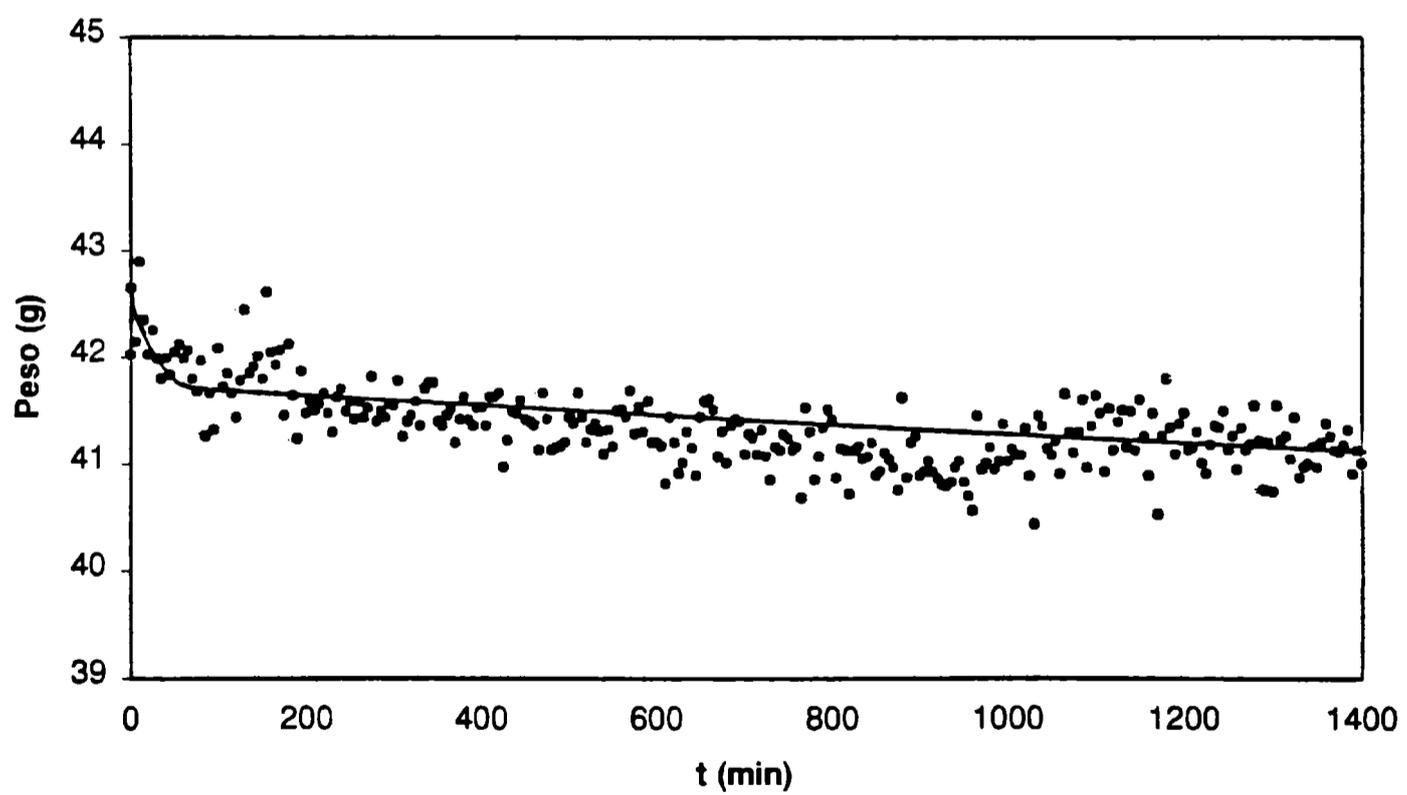


Figura 6.30: Pérdida de peso de cilindros de peceto en la condición PC3.

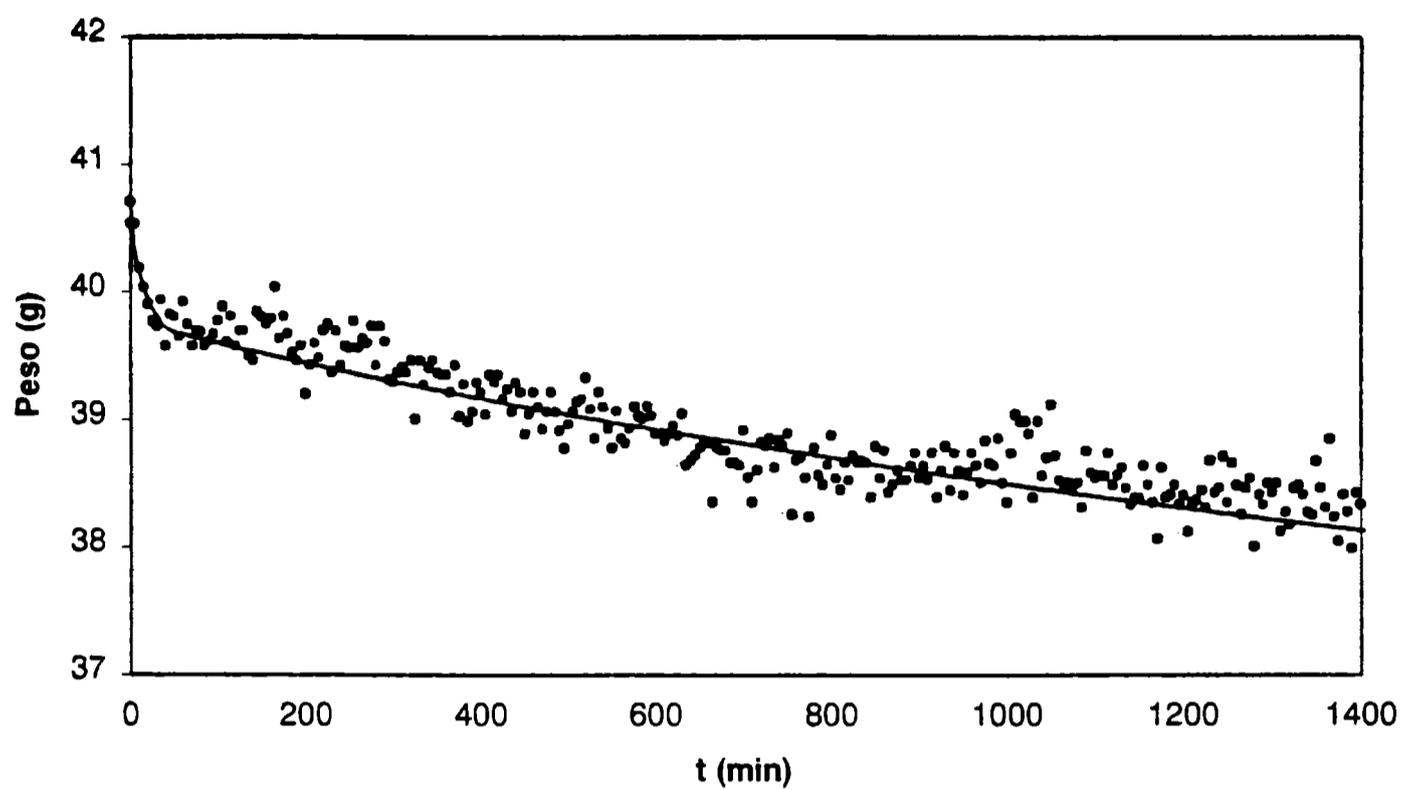


Figura 6.31: Pérdida de peso de cilindros de peceto en la condición PC4.

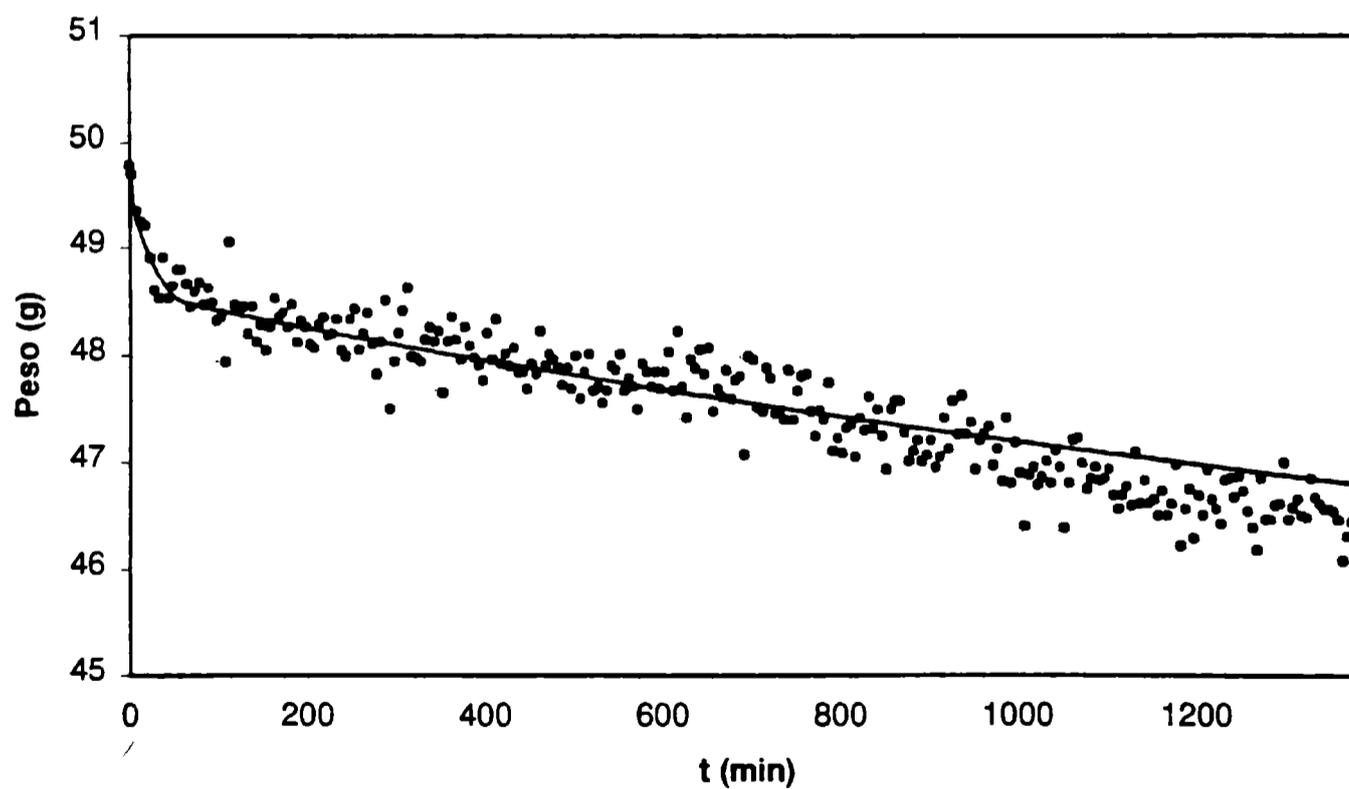


Figura 6.32: Pérdida de peso de cilindros de peceto en la condición PC5.

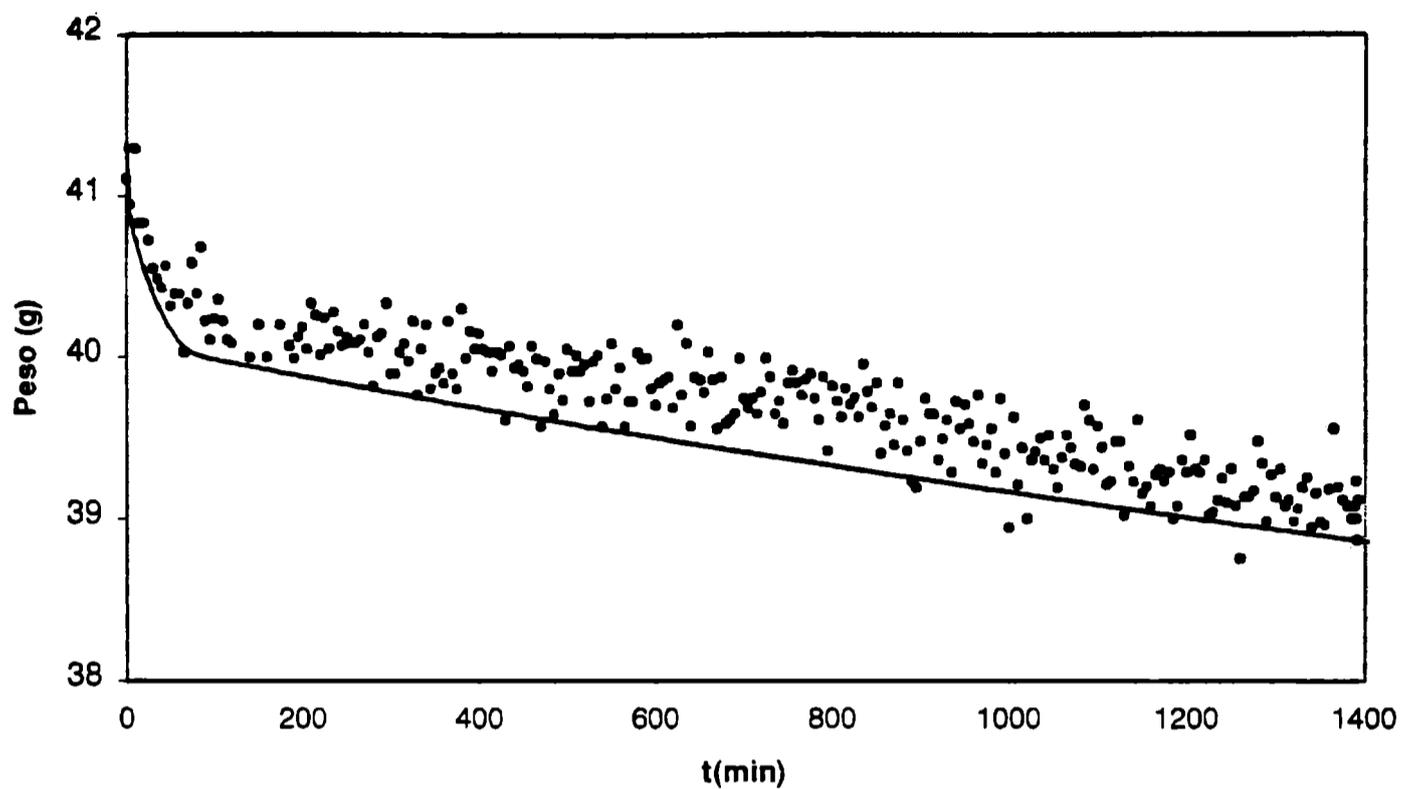


Figura 6.33: Pérdida de peso de cilindros de peceto en la condición PC6.

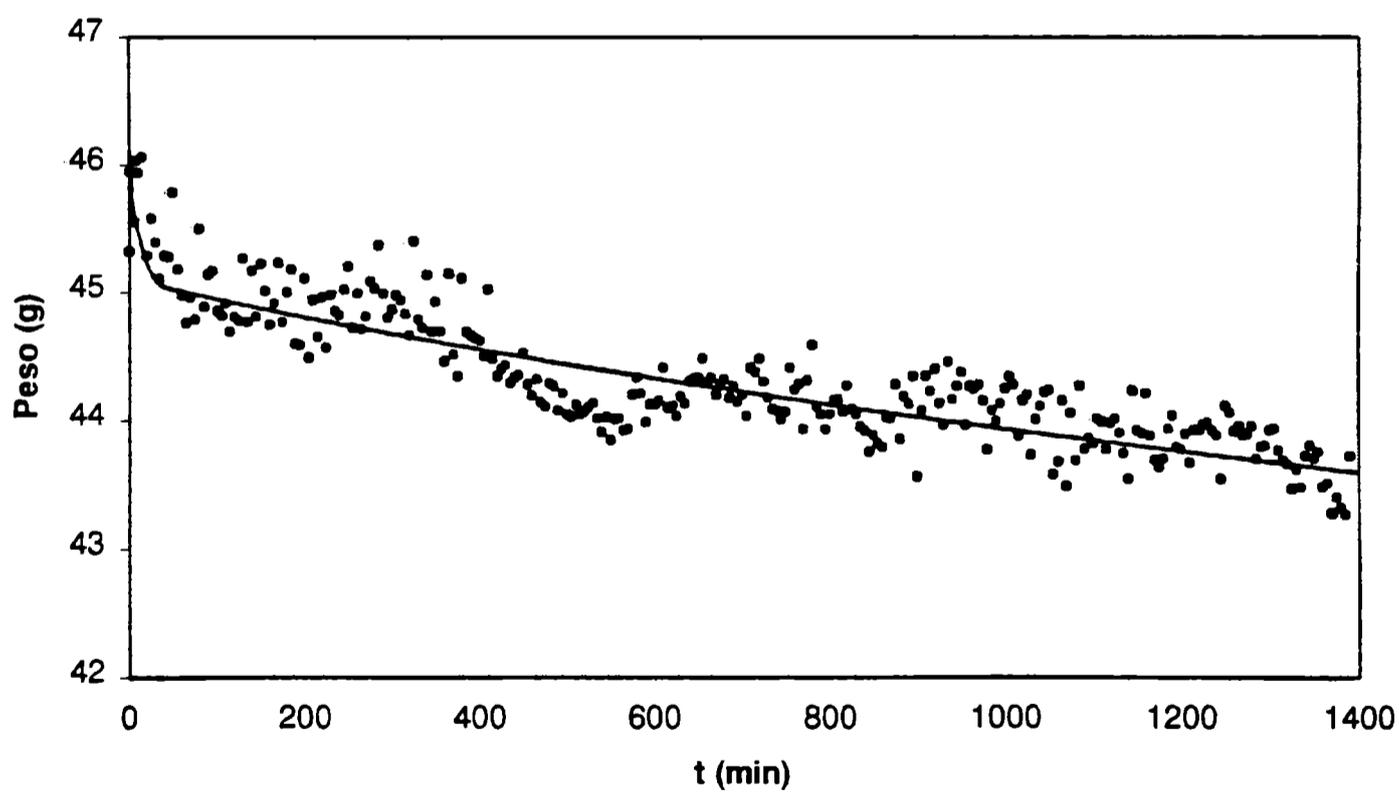


Figura 6.34: Pérdida de peso de cilindros de peceto en la condición PC7.

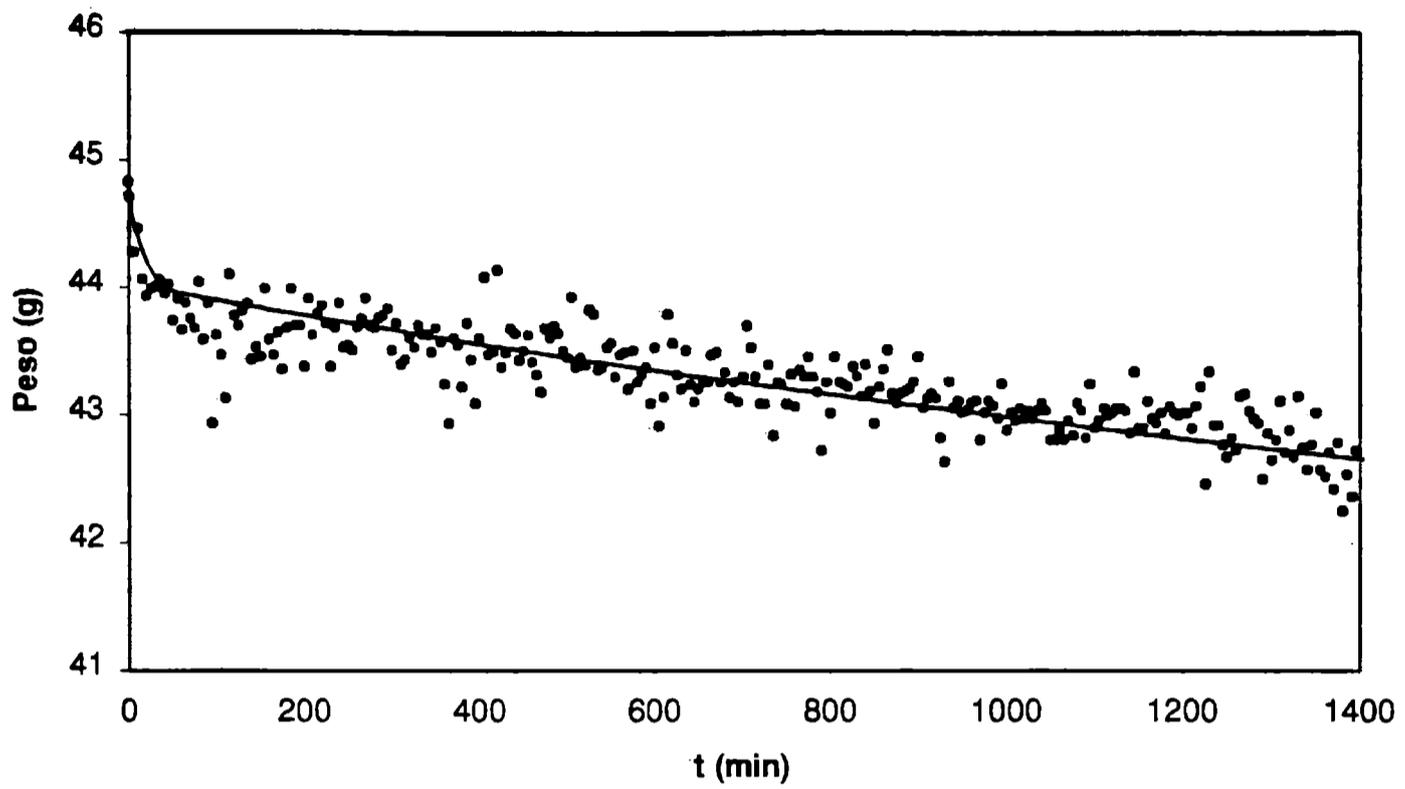


Figura 6.35: Pérdida de peso de cilindros de peceto en la condición PC8.

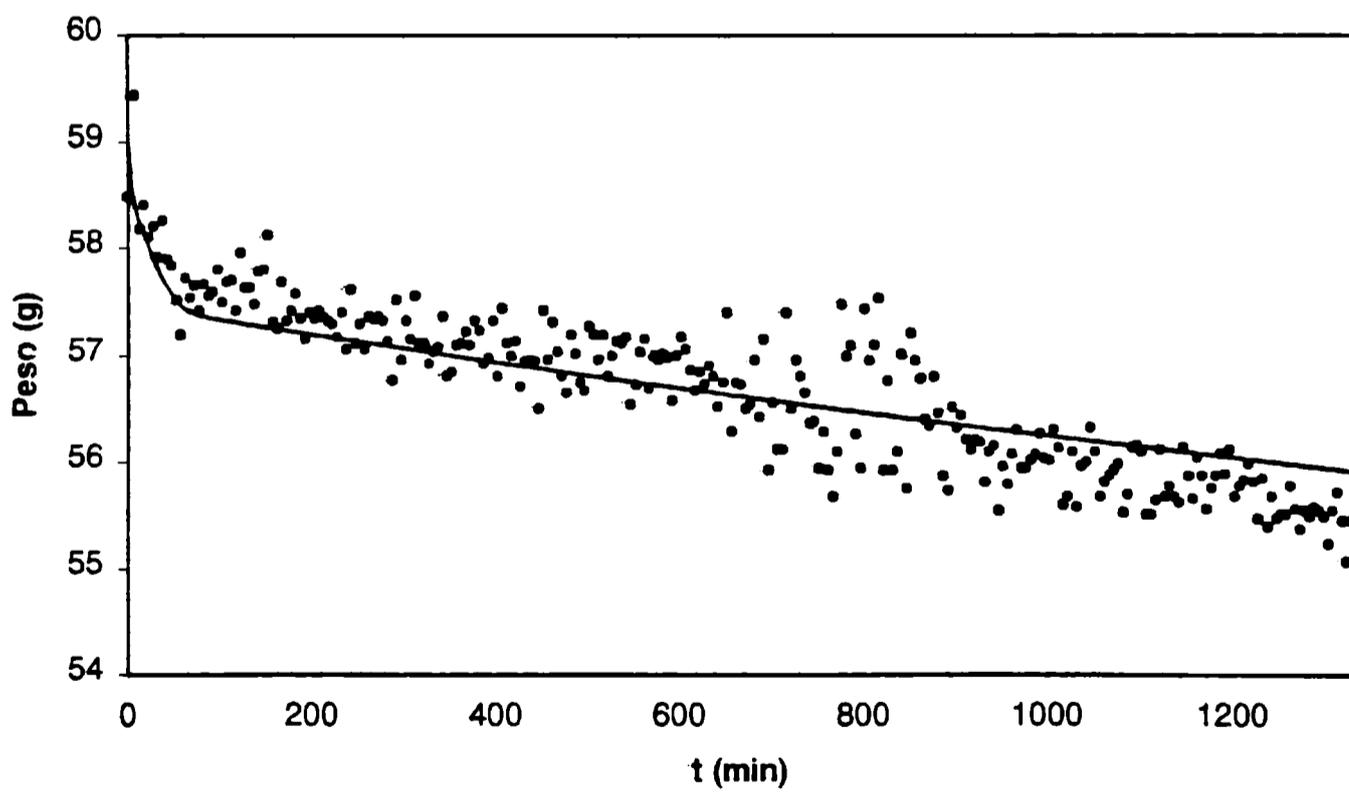


Figura 6.36: Pérdida de peso de cilindros de peceto en la condición PC9.

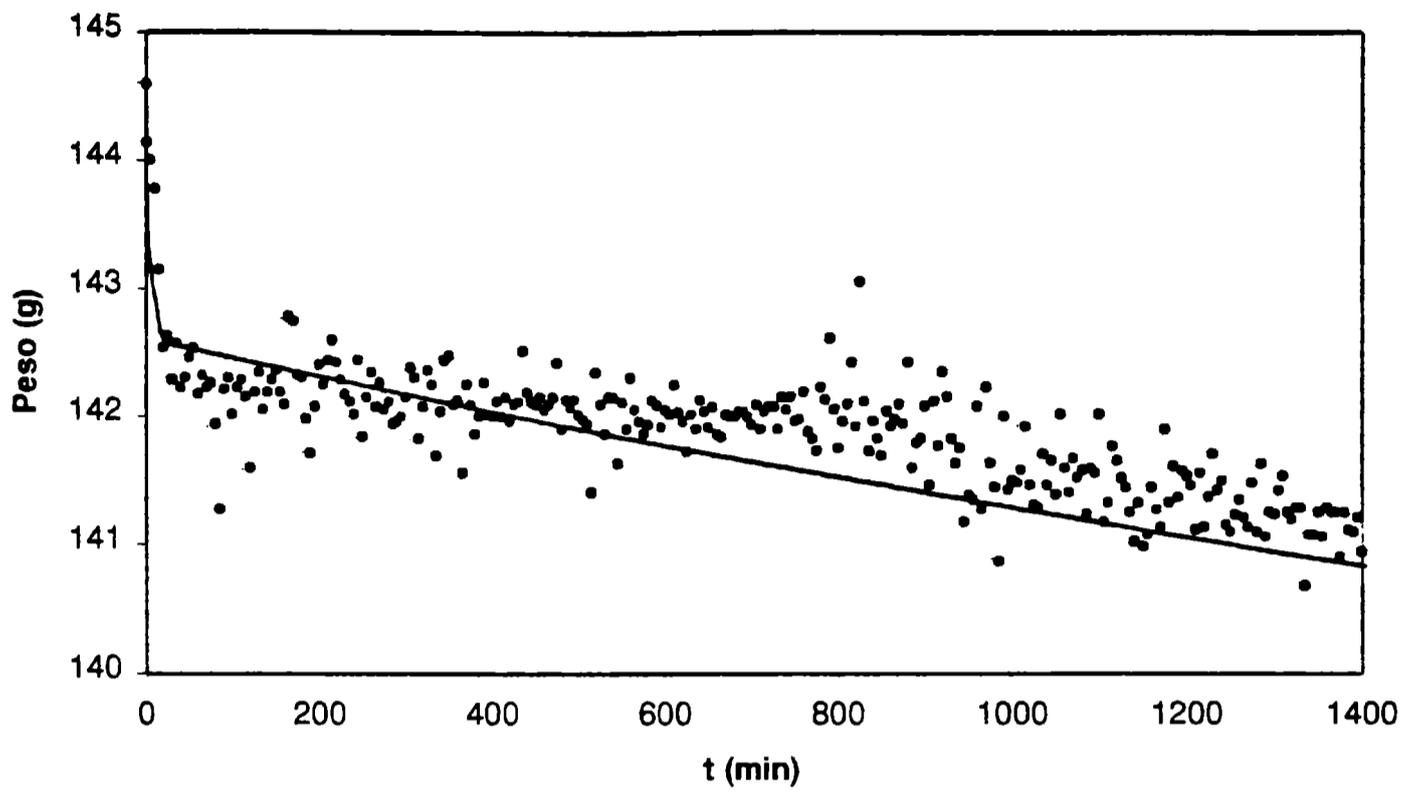


Figura 6.37: Pérdida de peso de pechugas de pollo en la condición POC1.

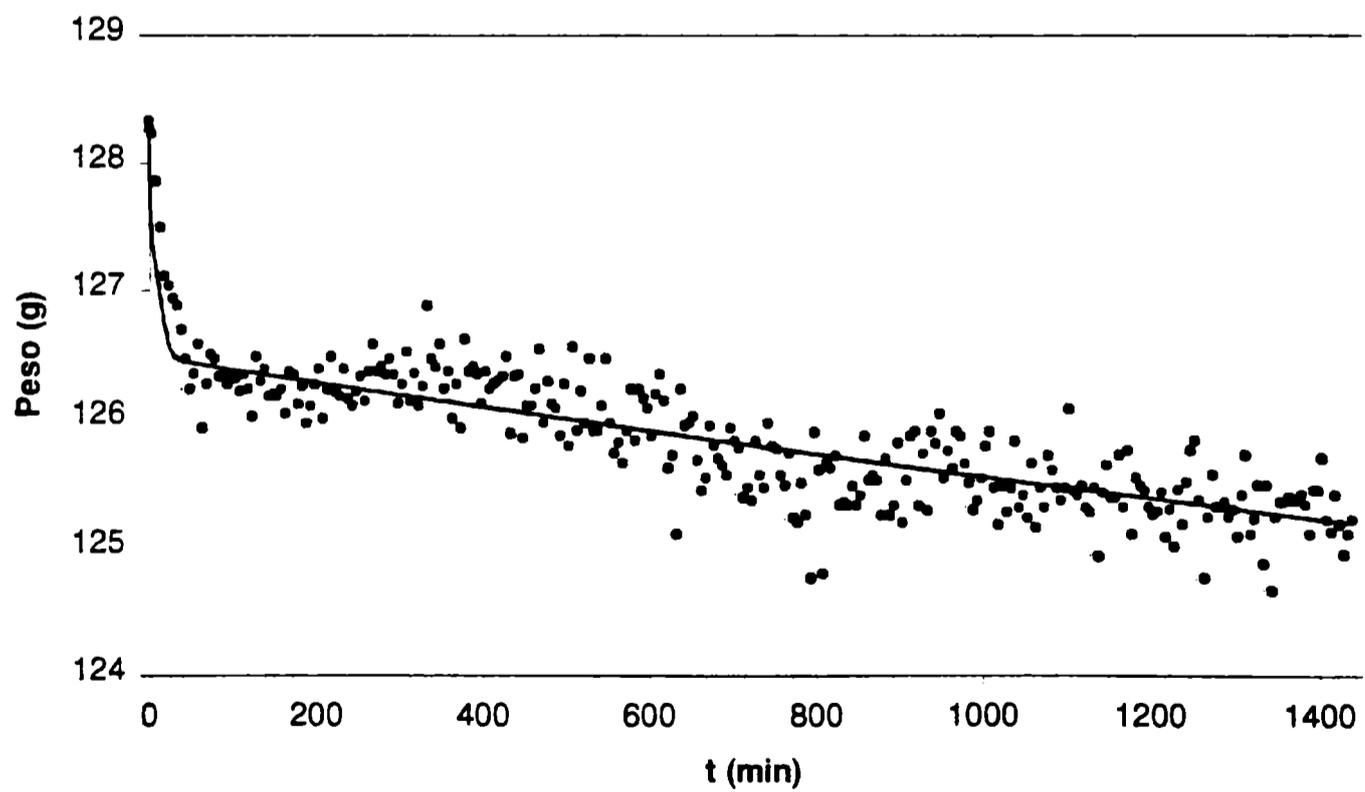


Figura 6.38: Pérdida de peso de pechugas de pollo en la condición POC2.

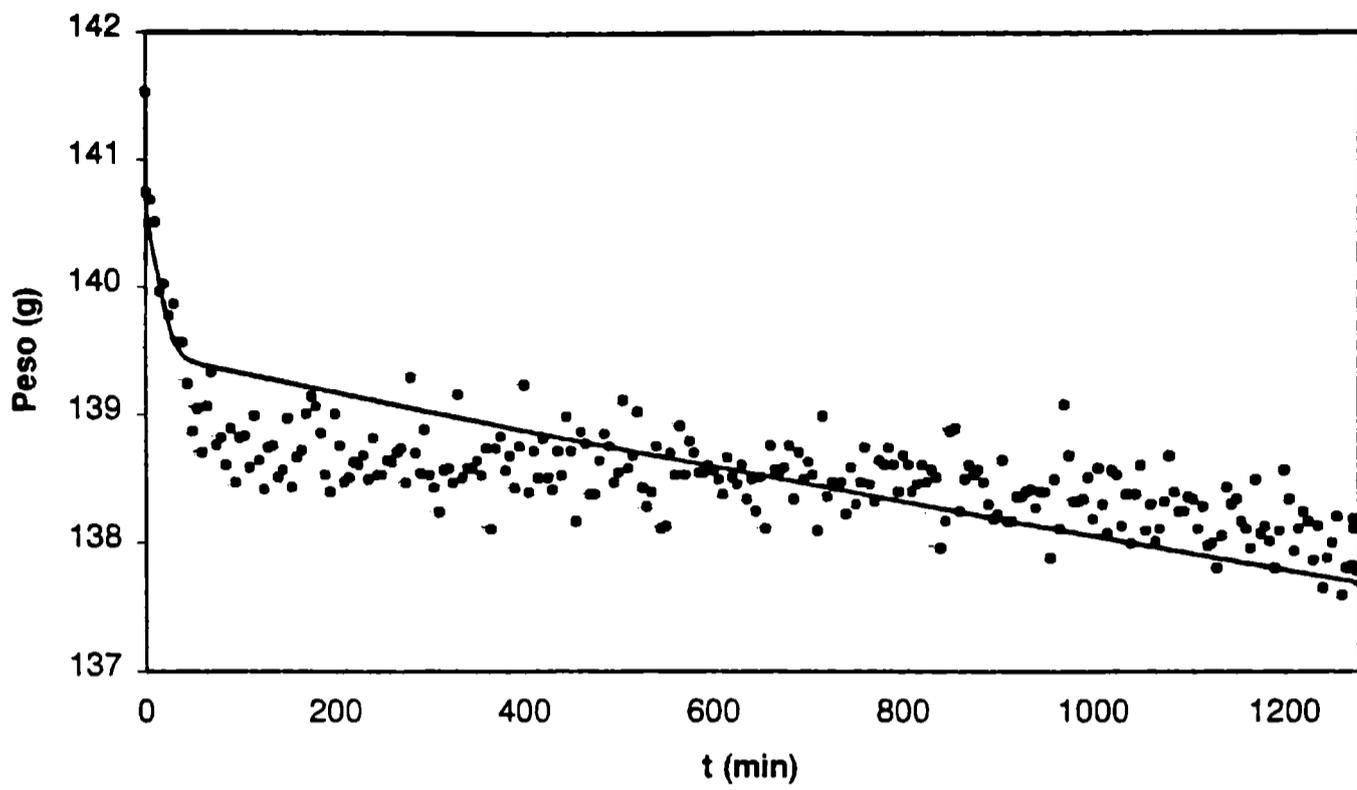


Figura 6.39: Pérdida de peso de pechugas de pollo en la condición POC3.

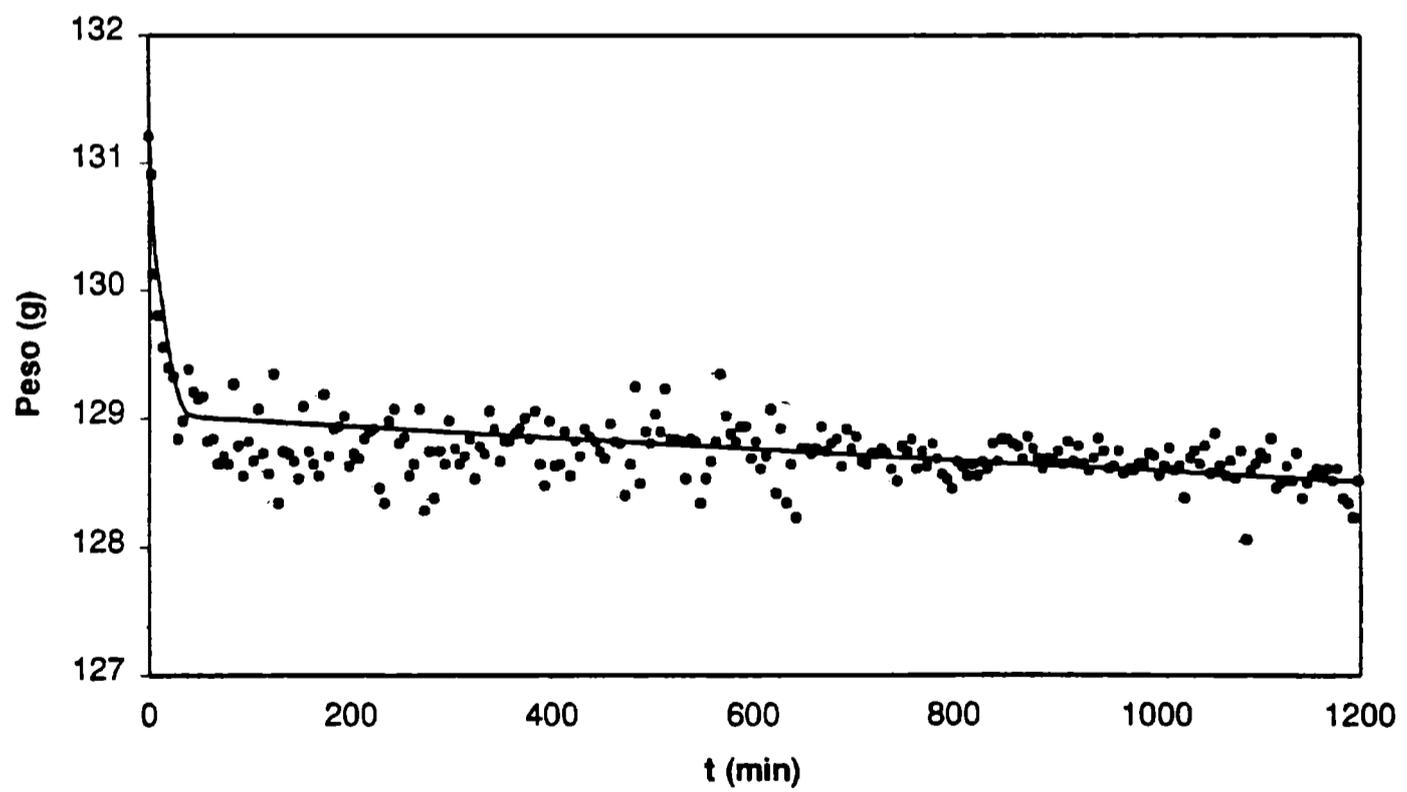


Figura 6.40: Pérdida de peso de pechugas de pollo en la condición POC4.

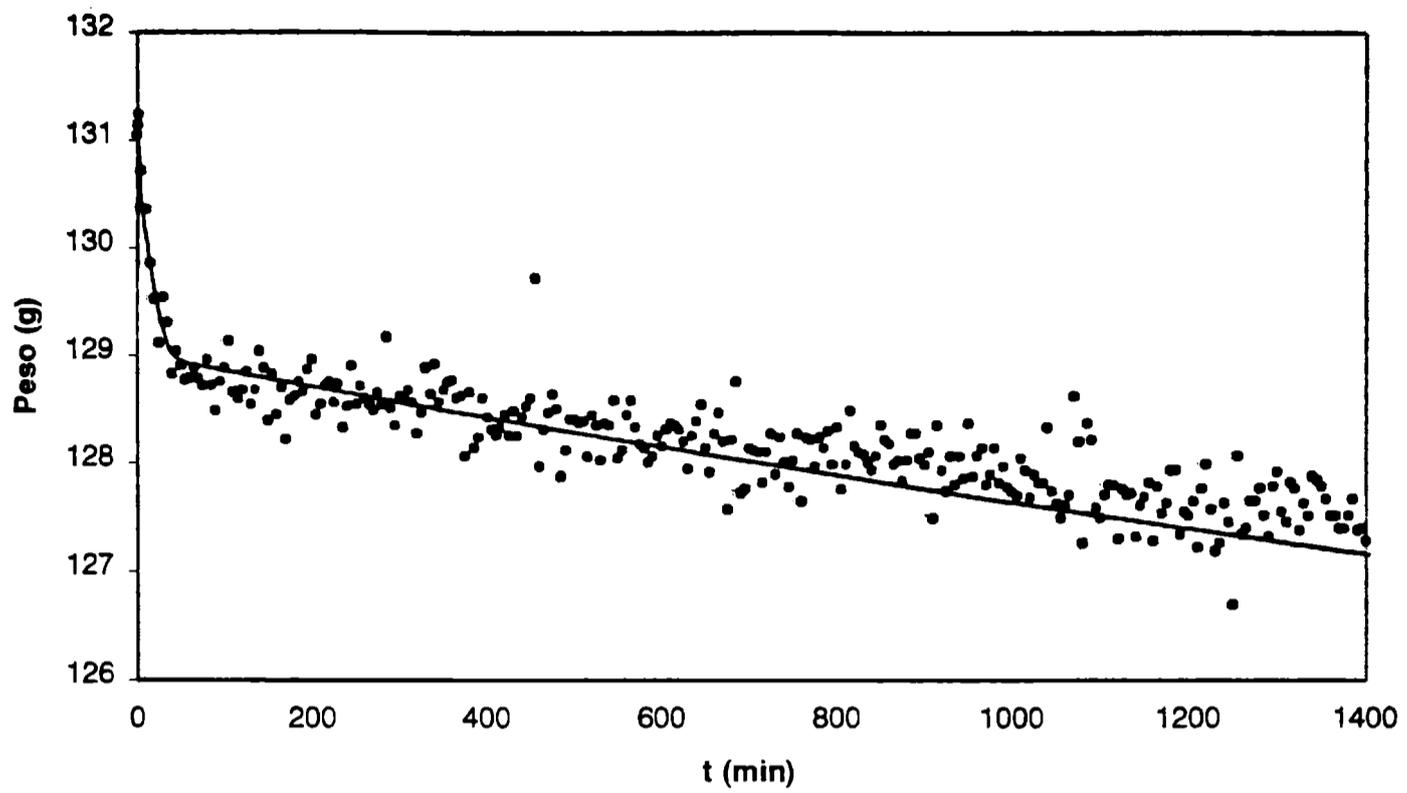


Figura 6.41: Pérdida de peso de pechugas de pollo en la condición POC5.

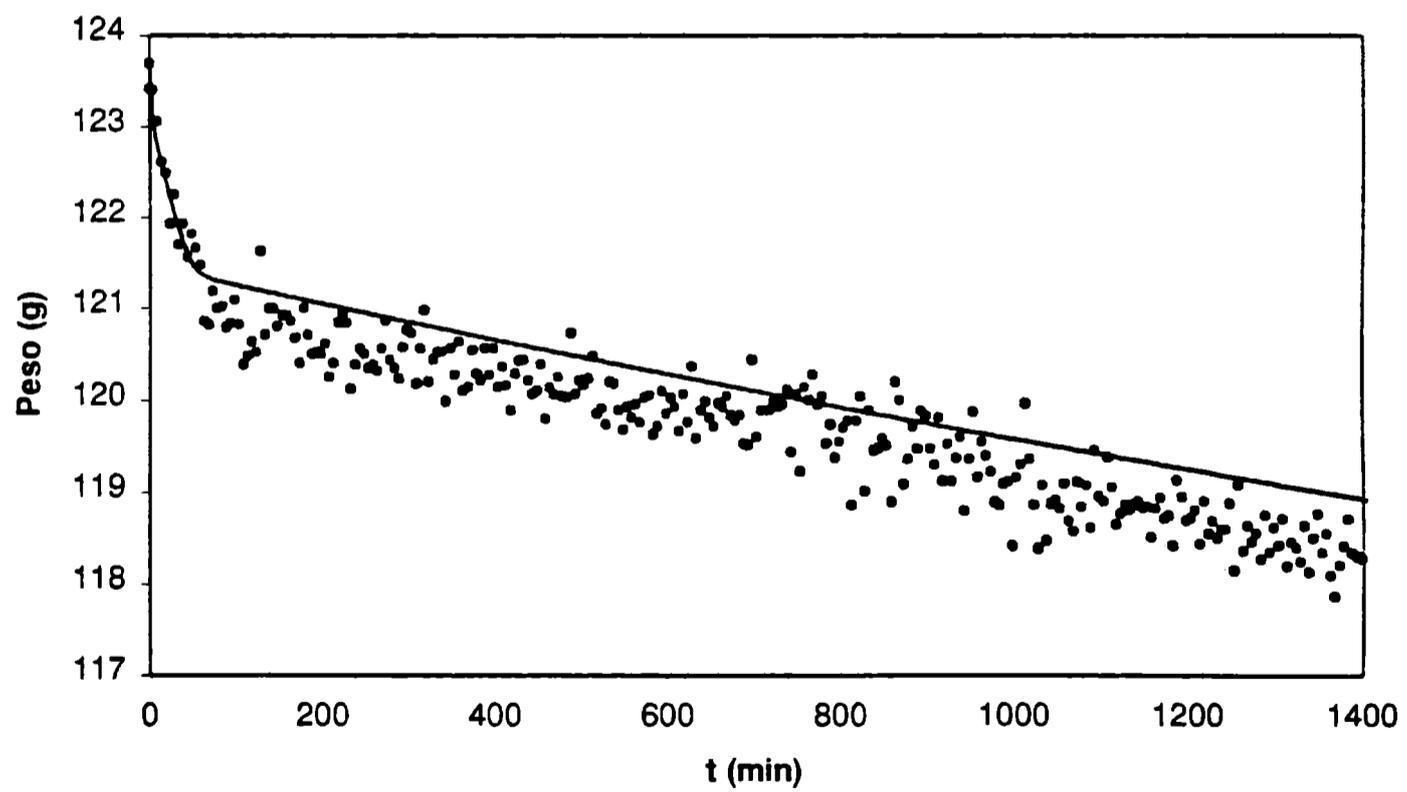


Figura 6.42: Pérdida de peso de pechugas de pollo en la condición POC6.

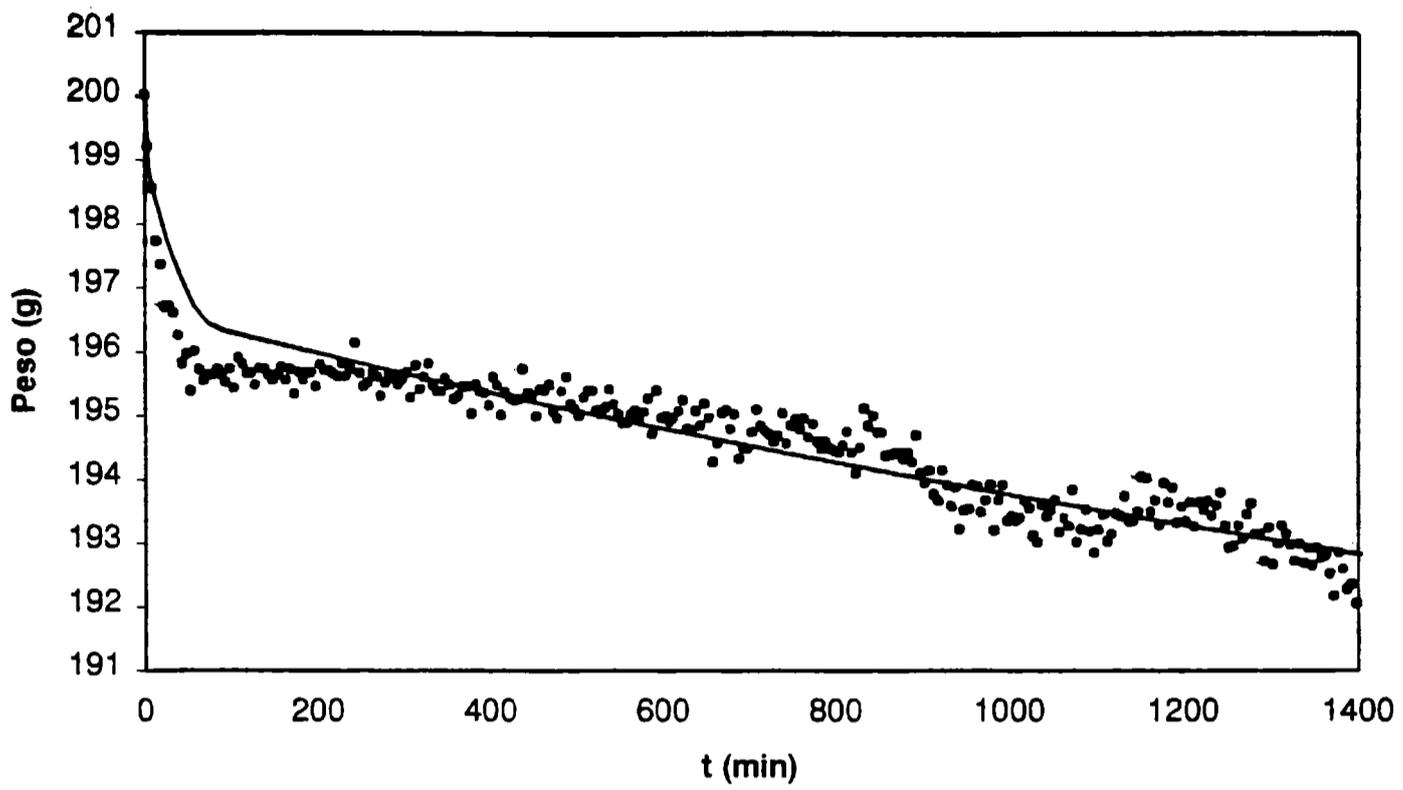


Figura 6.43: Pérdida de peso de pechugas de pollo en la condición POC7.

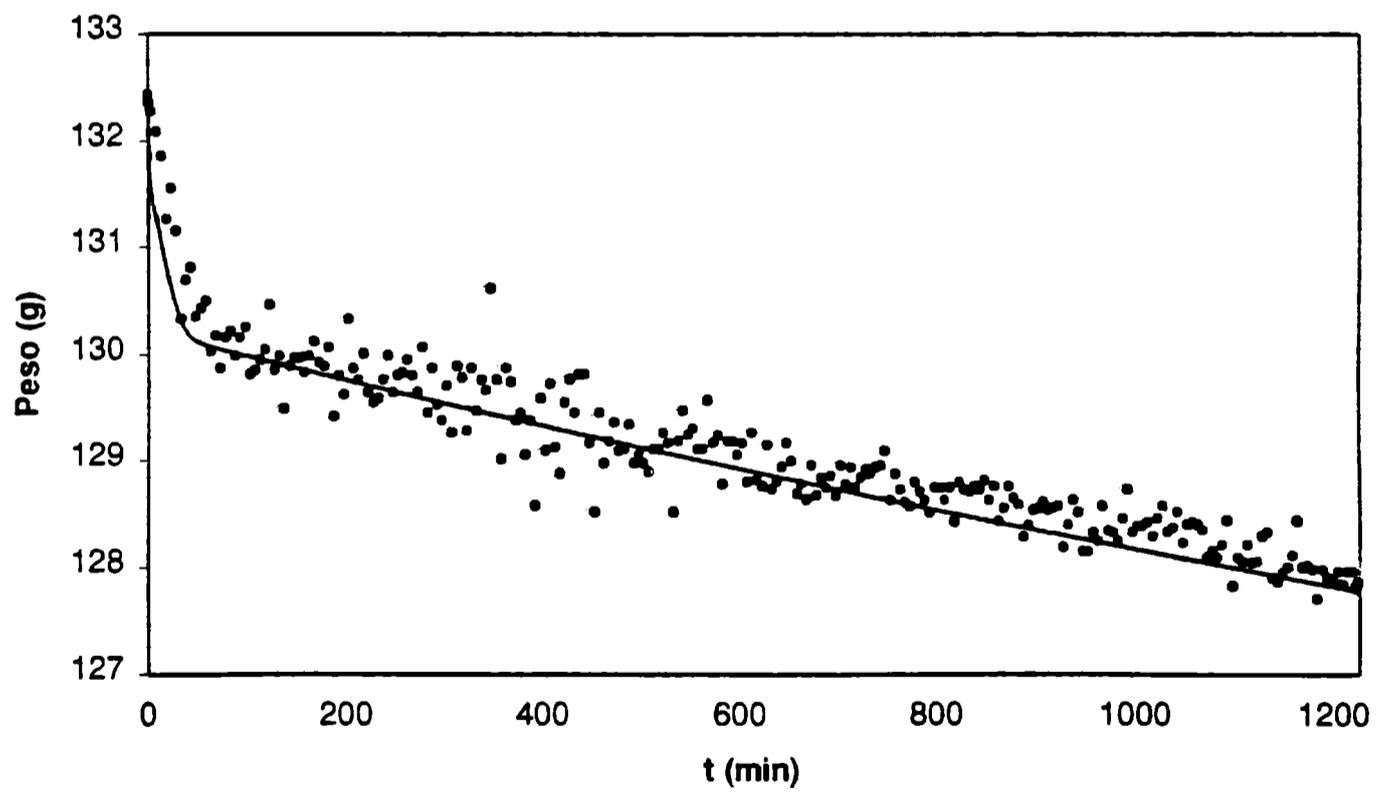


Figura 6.44: Pérdida de peso de pechugas de pollo en la condición POC8.

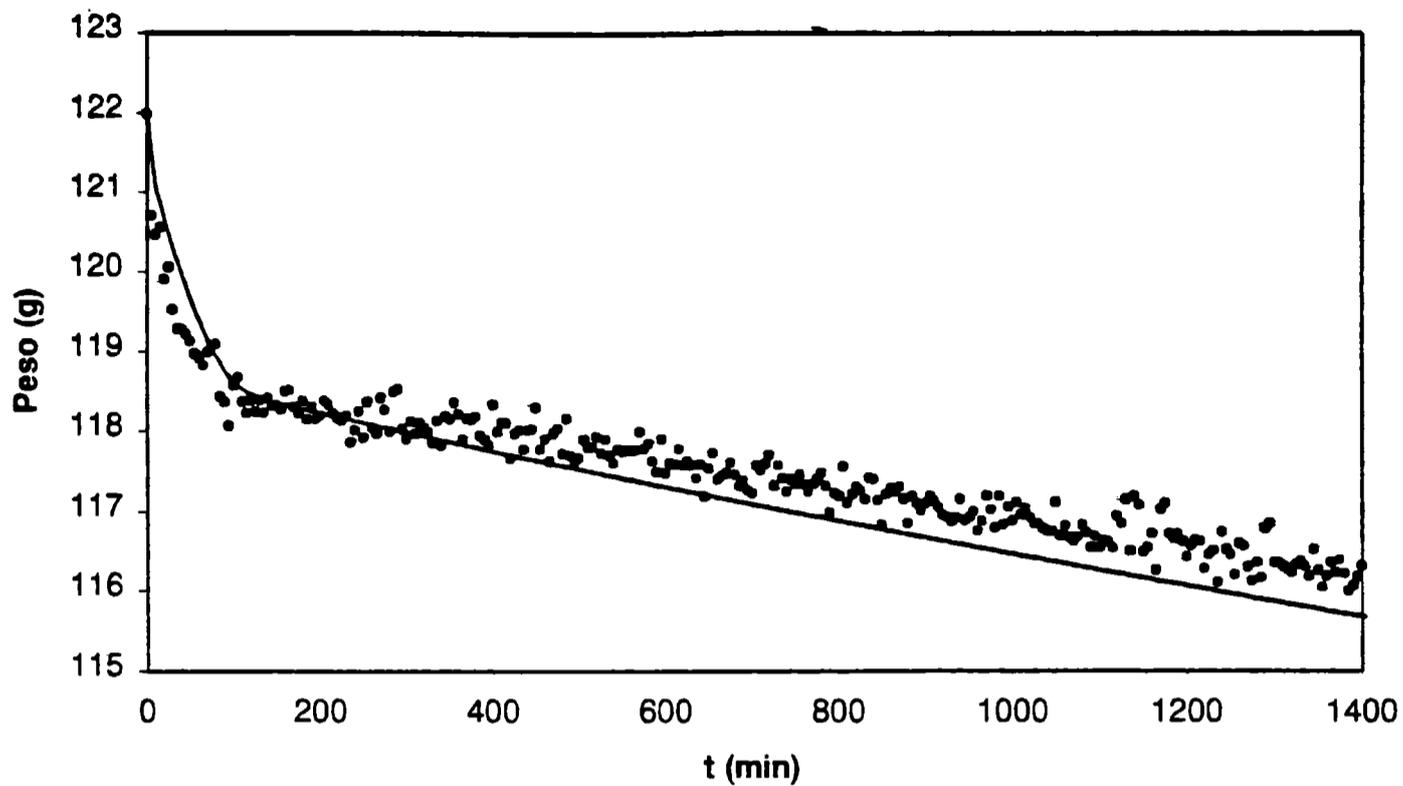


Figura 6.45: Pérdida de peso de pechugas de pollo en la condición POC9.

6.3.2.2 CONDICIONES OPERATIVAS VARIABLES

El empleo de condiciones operativas variables permite la validación del modelo matemático con condiciones de contorno que cambian con el tiempo. La implementación de fluctuaciones en el software desarrollado no es complicada e implica la resolución de los balances microscópicos de energía y materia con valores de temperatura o velocidad del aire alternantes y el cálculo de propiedades y de los coeficientes de transferencia de energía y de materia cuyos valores dependen de dichas condiciones operativas.

Como se explicó en el Capítulo 5, experimentalmente se consideraron dos situaciones típicas: variación de la temperatura ambiental y variación de la velocidad del aire ambiente. En ambos casos las condiciones alternan entre dos valores cada una hora (Figuras 5.45 y 5.46). Estas dos situaciones fueron simuladas por el modelo matemático. En las Figuras 6.46 y 6.47 se muestran los resultados obtenidos. Los datos experimentales se presentan con símbolos mientras que los predichos por la simulación numérica con línea continua.

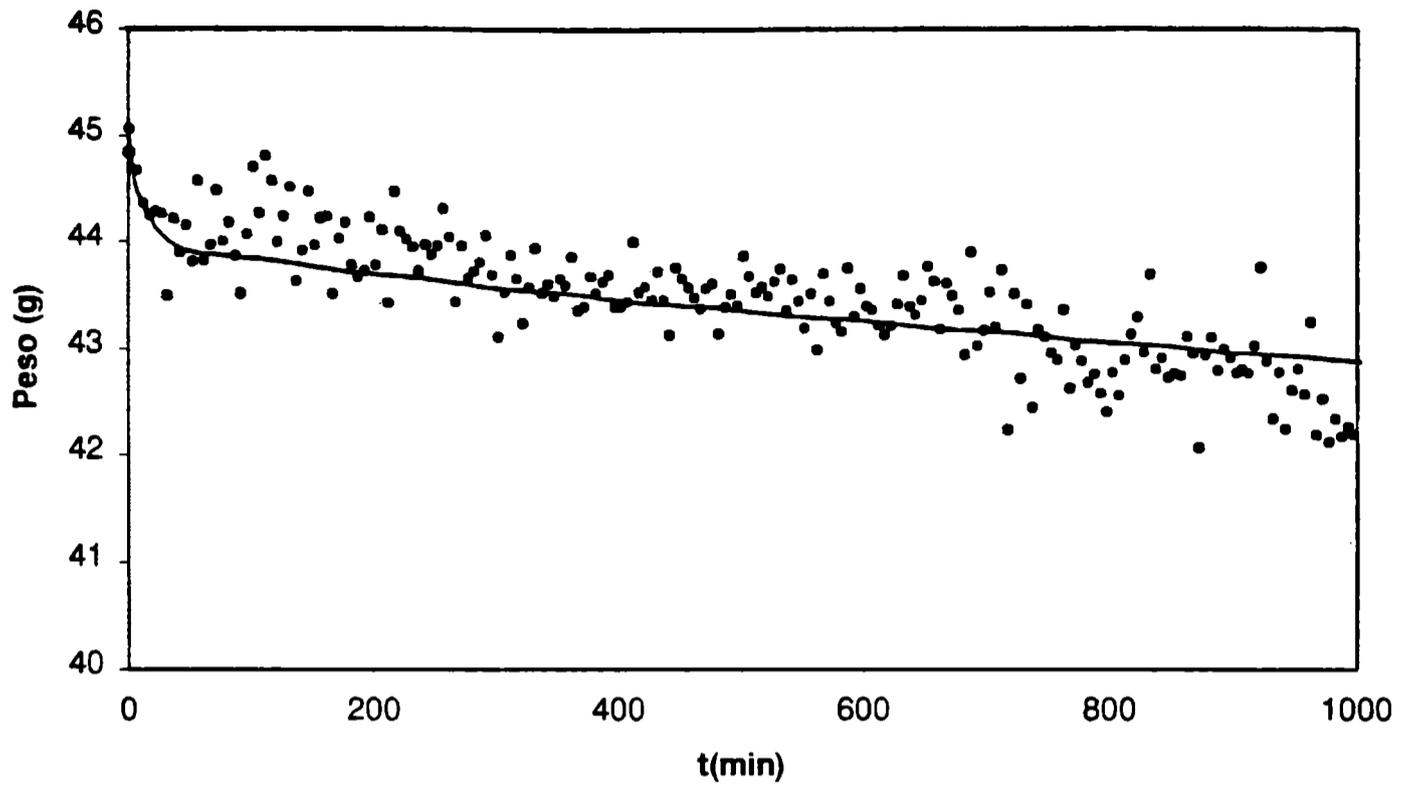


Figura 6.46: Pérdida de peso de peceto en la experiencia realizada con fluctuaciones de temperatura del aire.

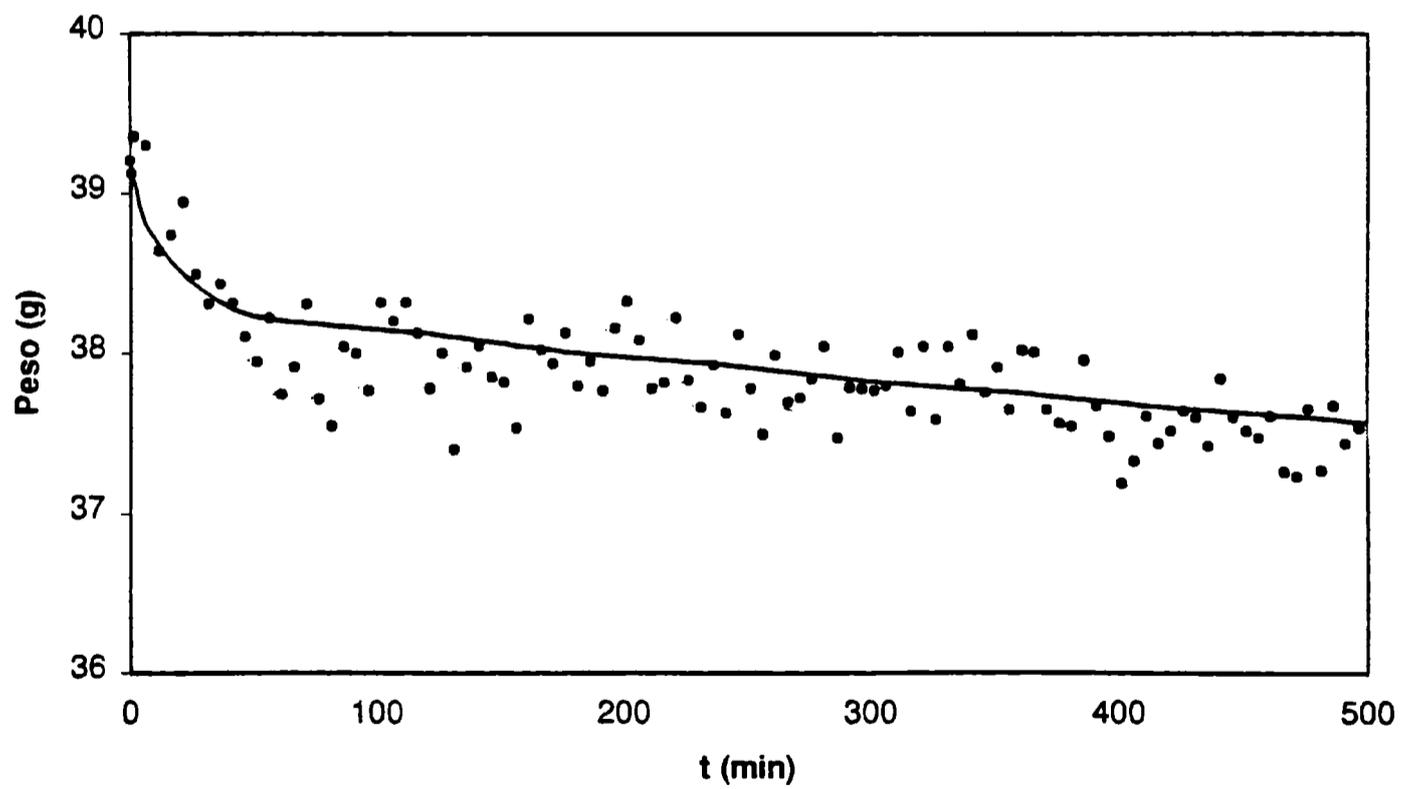


Figura 6.47: Pérdida de peso de peceto en la experiencia realizada con fluctuaciones de velocidad del aire.

En ambos casos se puede observar que tanto los datos experimentales como los predichos no fluctúan significativamente frente a los cambios que suceden en el medio ambiente. También se advierte que las predicciones del modelo se ajustan de forma correcta a los resultados obtenidos experimentalmente. En ambos casos, el modelo predice satisfactoriamente el descenso del peso de las muestras durante la refrigeración, la congelación y el almacenamiento congelado, confirmando la capacidad del software matemático de predecir distintas situaciones que usualmente ocurren en la práctica.

6.3.3 CAPA DESHIDRATADA SUPERFICIAL

Las experiencias de congelación y almacenamiento congelado detalladas en el Capítulo anterior, se emplearon para cuantificar la pérdida de materia frente a distintas condiciones de operación. De acuerdo a la explicación realizada de los fenómenos puestos en juego durante estas operaciones (Capítulo 2), la sublimación de hielo origina una capa deshidratada en la superficie del alimento.

Como se detalló en el mismo Capítulo, en la formulación del modelo matemático se realizan dos suposiciones:

- La estructura de la capa superficial es de tipo porosa,
- Esta capa se encuentra separada de la zona congelada por un frente bien definido y distinguible.

Es importante señalar, que sobre la base de estas suposiciones se realizan los cálculos de la posición del frente de sublimación y de espesor de la capa superficial en función del tiempo.

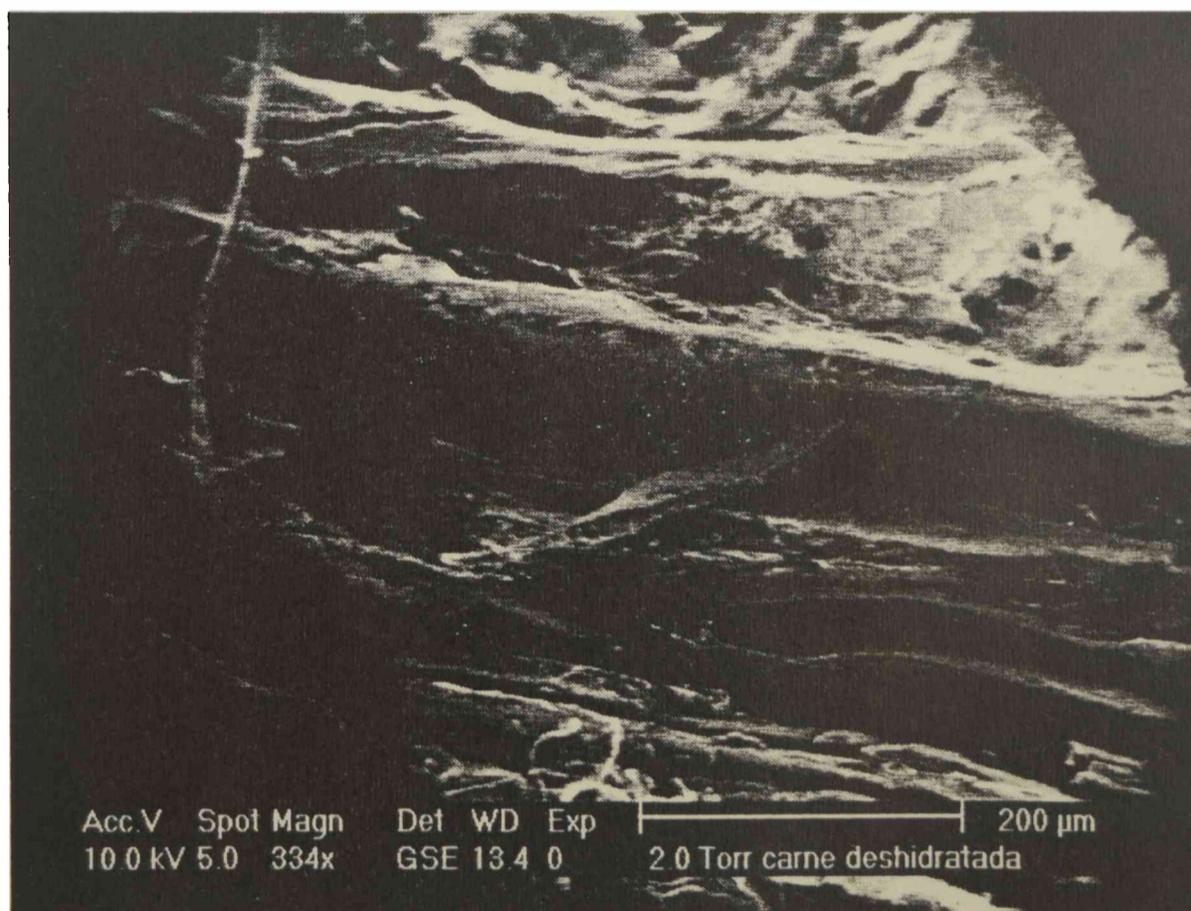
Realizando una búsqueda en literatura, los estudios estructurales en alimentos se han desarrollado para los procesos de secado (Wang y Brennan, 1995; Krokida y col., 1997) y liofilización (Krokida y col., 1998). Los trabajos de investigación en estas áreas están orientados a la caracterización del material a través de ciertos parámetros como la porosidad, distribución de poros y tortuosidad, que son muy dependientes del proceso considerado y para un mismo proceso, dependen de las condiciones de operación. No se han encontrado publicados detalles de la estructura de la superficie de los alimentos congelados.

Con el fin de verificar las suposiciones realizadas, distintas muestras correspondientes a una misma corrida experimental fueron observadas en un microscopio electrónico ambiental (Philips XL 30 Esem). Los resultados que se presentan corresponden a la experiencia de

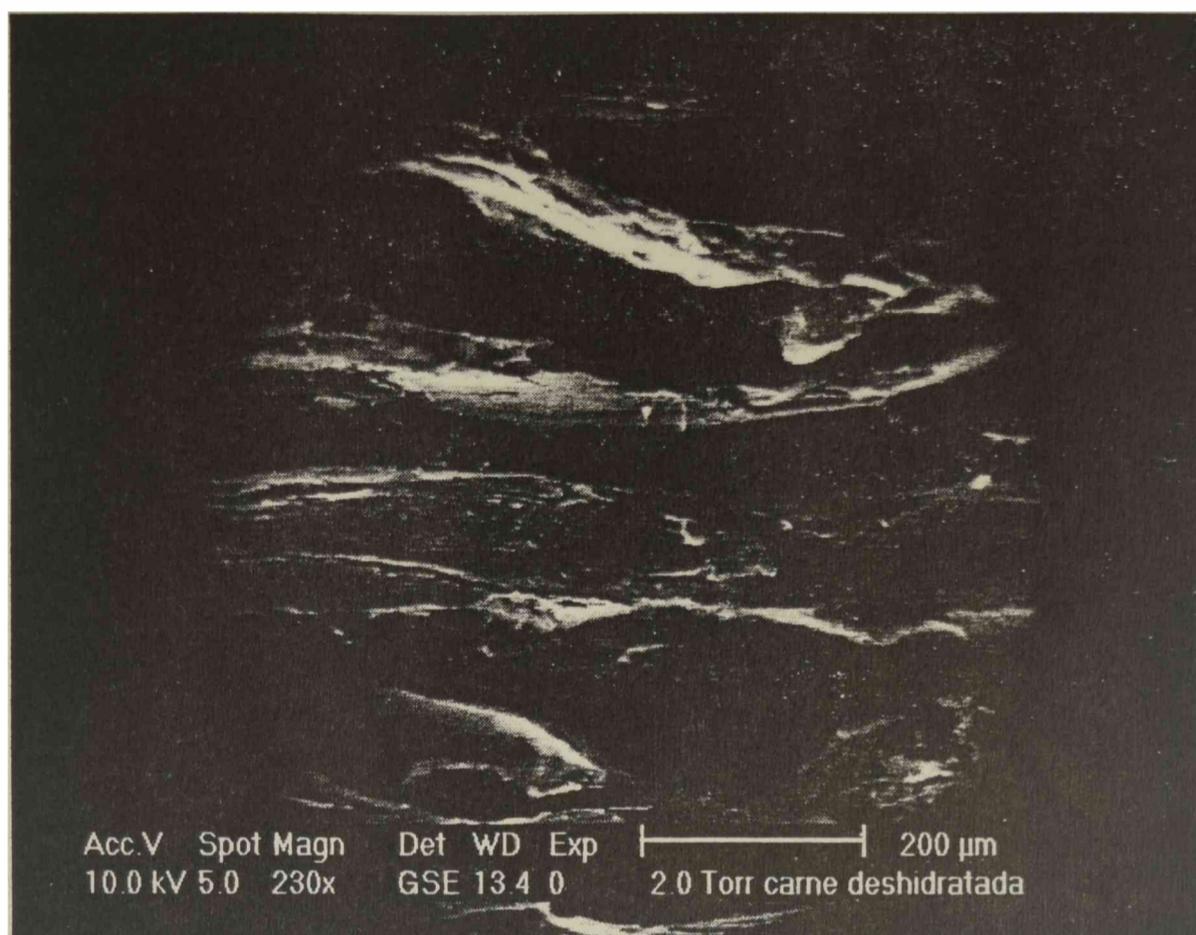
congelación y almacenamiento congelado realizada con cilindros de peceto en la condición de operación PC5 descrita en la Tabla 5.3 (Capítulo 5).

En primer lugar, se presenta el detalle obtenido de la estructura de la capa superficial. En las Fotografías 6.1 y 6.2 se muestra la estructura de distintos sectores observados, realizando un corte paralelo al eje del cilindro.

En las mismas se observan las fibras deshidratadas de la carne y sectores oscuros que corresponden a los huecos generados por la sublimación del hielo. En la primera fotografía el espesor de la fibra que se encuentra en el centro mide $144\ \mu\text{m}$ y el hueco superior $29\ \mu\text{m}$ aproximadamente. En la segunda, la fibra central mide $162\ \mu\text{m}$, mientras que el hueco superior mide $55\ \mu\text{m}$ y el inferior $92\ \mu\text{m}$. Esto sugiere que existe un rango en el tamaño de los poros, lo que origina un rango de valores de porosidad. En ambos casos, lo observado revela la existencia de una estructura porosa, confirmando la primera suposición realizada en la formulación del modelo matemático.

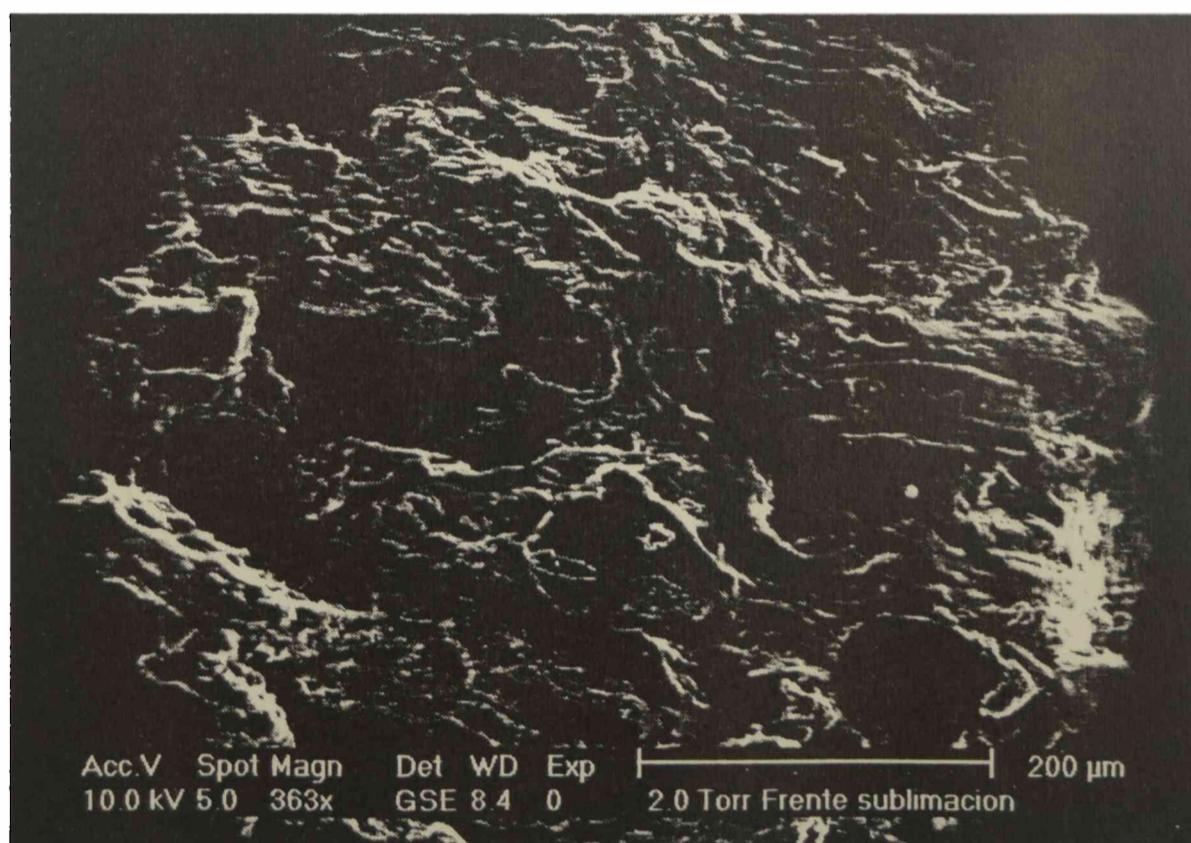


Fotografía 6.1: Capa deshidratada superficial en carne vacuna.



Fotografía 6.2: Capa deshidratada superficial en carne vacuna.

Para verificar la forma del frente de sublimación se realizó un corte perpendicular a las fibras en uno de los cilindros de peceto y se observó en el microscopio electrónico.



Fotografía 6.3: Frente de sublimación.

La Fotografía 6.3 muestra la zona congelada como un sector continuo claro y la capa deshidratada superficial con sectores oscuros correspondientes a los huecos generados por el hielo al sublimar. La separación entre ambas zonas es clara y definida, con lo cual se verifica suposición realizada de la forma del frente de sublimación.

Por último, se midió al microscopio el tamaño de la capa deshidratada de esta muestra, obteniendo un valor medio de $550\ \mu\text{m}$.

Mediante el modelo matemático se simuló esta experiencia a fin de estimar el tamaño de la capa superficial resultante. En la Figura 6.48 se muestra la evolución del espesor en función del tiempo. Se puede observar que el tamaño tiene un valor final de aproximadamente $700\ \mu\text{m}$.

Para explicar la diferencia entre el valor experimental observado y el predicho por el modelo matemático se debe tener cuenta que el tamaño es dependiente de la zona de análisis. En el modelado hemos supuesto un flujo de materia uniforme alrededor de un objeto que se enfría y congela en la corriente de aire. En la práctica el coeficiente de transferencia de materia tiene un valor local, lo que genera valores locales de flujo y como consecuencia, de espesores. Aún así, se puede caracterizar a la capa deshidratada superficial a través de un único valor, concepto que emplea el modelo matemático. En este caso el espesor predicho por el mismo no coincide, pero es del mismo orden de magnitud que el valor experimental.

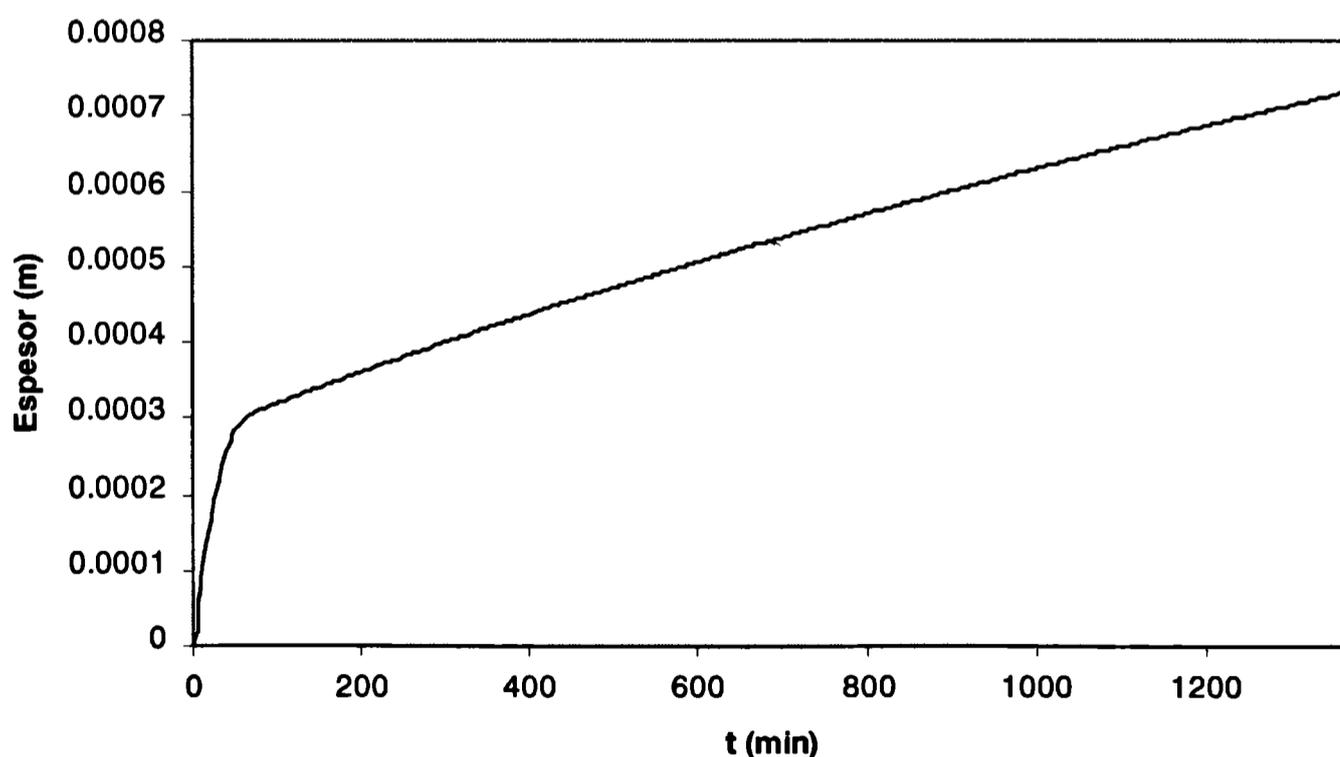


Figura 6.48: Crecimiento de la capa deshidratada con el tiempo.

CAPÍTULO 7: PREDICCIONES TEÓRICAS

7.1 PREDICCIONES DEL MODELO MATEMÁTICO

El modelo matemático validado contra datos de literatura y datos propios describe la transferencia de energía y materia durante el enfriamiento, la congelación y el almacenamiento congelado de productos. En este Capítulo, se presentan los resultados que se pueden obtener con el empleo del software numérico y su capacidad para predecir la respuesta de los alimentos frente a distintas condiciones de operación.

7.1.1 PERFILES DE TEMPERATURA

En la formulación del modelo matemático, se realizó una descripción exhaustiva de los balances microscópicos de energía que se deben considerar para describir los procesos de refrigeración, congelación y almacenamiento congelado. A partir de la resolución de los mismos, se obtiene la temperatura en todo el producto en función del tiempo.

Para ejemplificar, se puede considerar que se congela y almacena carne vacuna durante un día, con forma de placas de 3 cm de espesor, con una temperatura inicial de 0°C y el medio externo consiste en una corriente de aire con una temperatura de -30°C, 3.5 m/s de velocidad y 75 % de humedad relativa.

En la Figura 7.1, se muestra la aptitud del software numérico para predecir perfiles de temperatura. Los resultados obtenidos se presentan en una superficie de respuesta. En el plano $x=0.0$ se observa la curva calculada para el centro del producto y en el plano $x=0.015$ la curva predicha para el borde. Como ocurre en la práctica, el borde se enfría más rápidamente que el centro. El cambio de curvatura de la superficie de respuesta corresponde al cambio de estado (congelación). La temperatura final promedio en todo el producto coincide con la temperatura del medio externo.

Es importante destacar que el modelo matemático permite realizar este análisis para cualquier geometría regular simple.

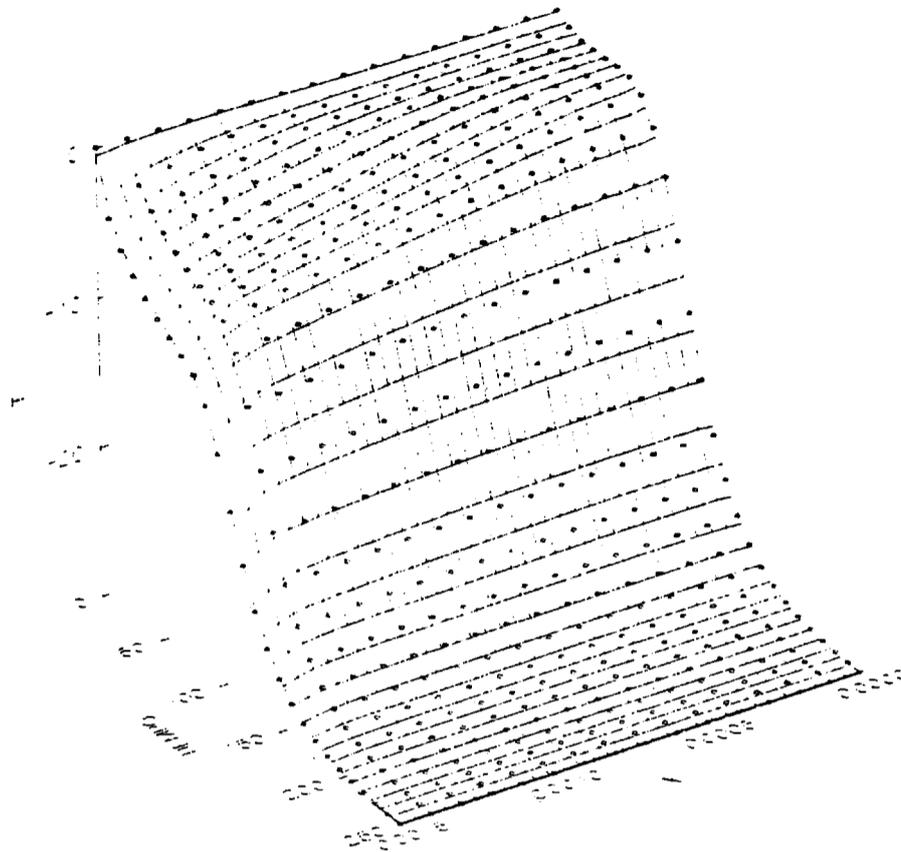


Figura 7.1: Perfil de temperaturas obtenido con el empleo del modelo matemático.

7.1.2 PÉRDIDA DE PESO

Una de las aplicaciones más importantes del modelo, es el cálculo de la pérdida de peso de los alimentos durante la refrigeración, congelación y el almacenamiento congelado.

Volviendo al ejemplo seleccionado, el software tiene la facultad de predecir la pérdida de materia en función del tiempo para la muestra de carne vacuna en las condiciones de operación seleccionadas. En la Figura 7.2 se presenta la curva de pérdida de peso obtenida por simulación (símbolos) y la historia térmica de la superficie del producto (línea continua). Como puede observarse, al comienzo del proceso la disminución del peso es rápida, luego se produce un cambio de pendiente ($t=160$ min) y la pérdida se hace más lenta. Como se ha explicado en el Capítulo 6 esto se debe a que la temperatura del alimento alcanza la temperatura del aire y desaparece la contribución de la diferencia de temperaturas entre el alimento y el medio a la fuerza impulsora para la pérdida de peso. Este comportamiento

corresponde al observado en las experiencias realizadas en el túnel de congelación (Capítulo 5).

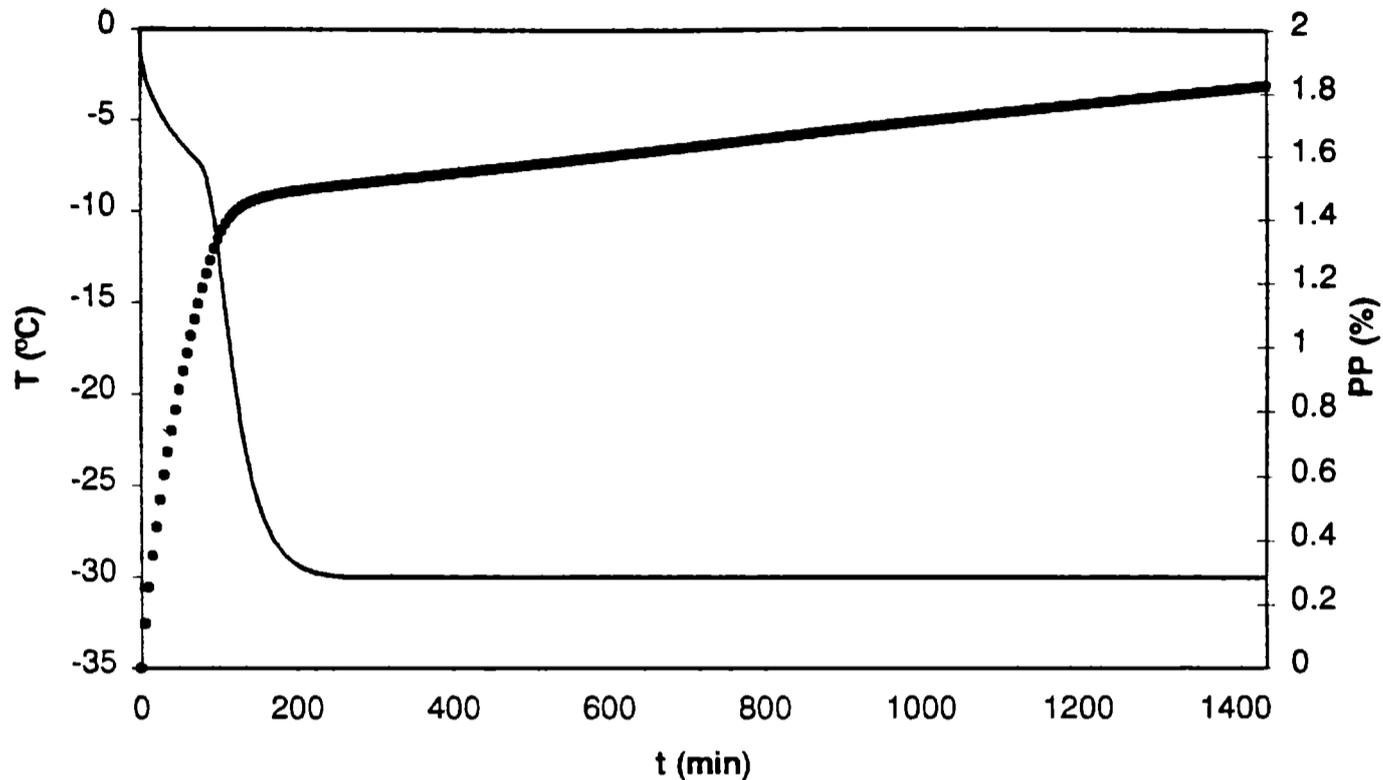


Figura 7.2: Pérdida de peso (■) y temperatura de la superficie del producto (—) en función del tiempo.

7.1.3 ESPESOR DE LA CAPA DESHIDRATADA SUPERFICIAL

Para los cálculos de los perfiles de temperatura y la pérdida de materia, el modelo matemático emplea diferentes incrementos espaciales teniendo en cuenta las distintas zonas en el interior del producto (no congelada, congelada o deshidratada). De esta forma se considera al alimento discretizado de acuerdo a una grilla variable, en la cual se implementan un incremento Δx constante y dos incrementos variables, Δx_2 que disminuye mientras que el incremento en la zona deshidratada Δx_4 crece en el tiempo.

En la situación seleccionada para ejemplificar, se puede distinguir como cambian los incrementos espaciales en función del tiempo de proceso (Figura 7.3).

Con el empleo del incremento Δx_4 , se calcula el espesor de la capa deshidratada, que constituye un indicador de la calidad del producto al finalizar la congelación y el almacenamiento congelado.

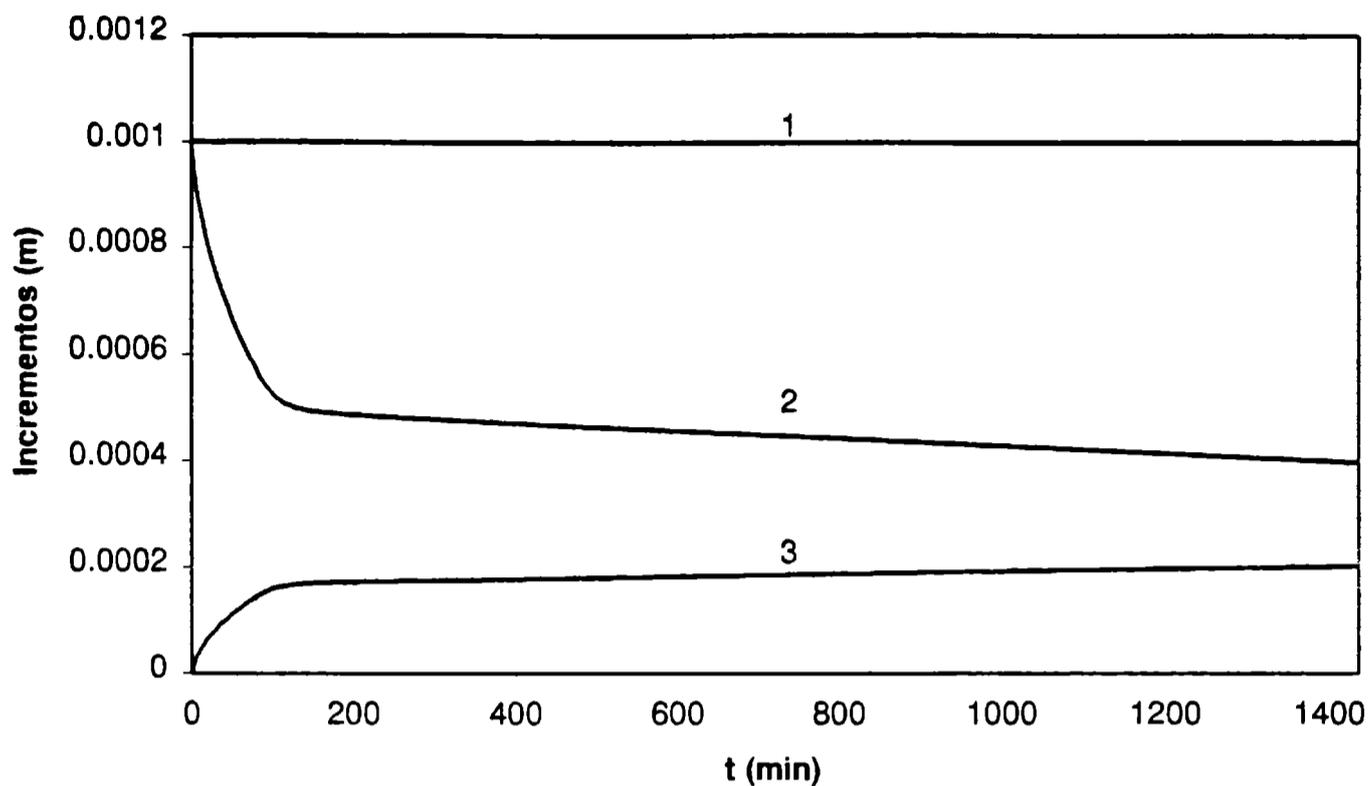


Figura 7.3: Incrementos espaciales en función del tiempo: (1) Δx , (2) Δx_2 y (3) Δx_4 .

En la siguiente figura se observa como cambia el espesor y el flujo de materia predichos por el modelo matemático en función del tiempo.

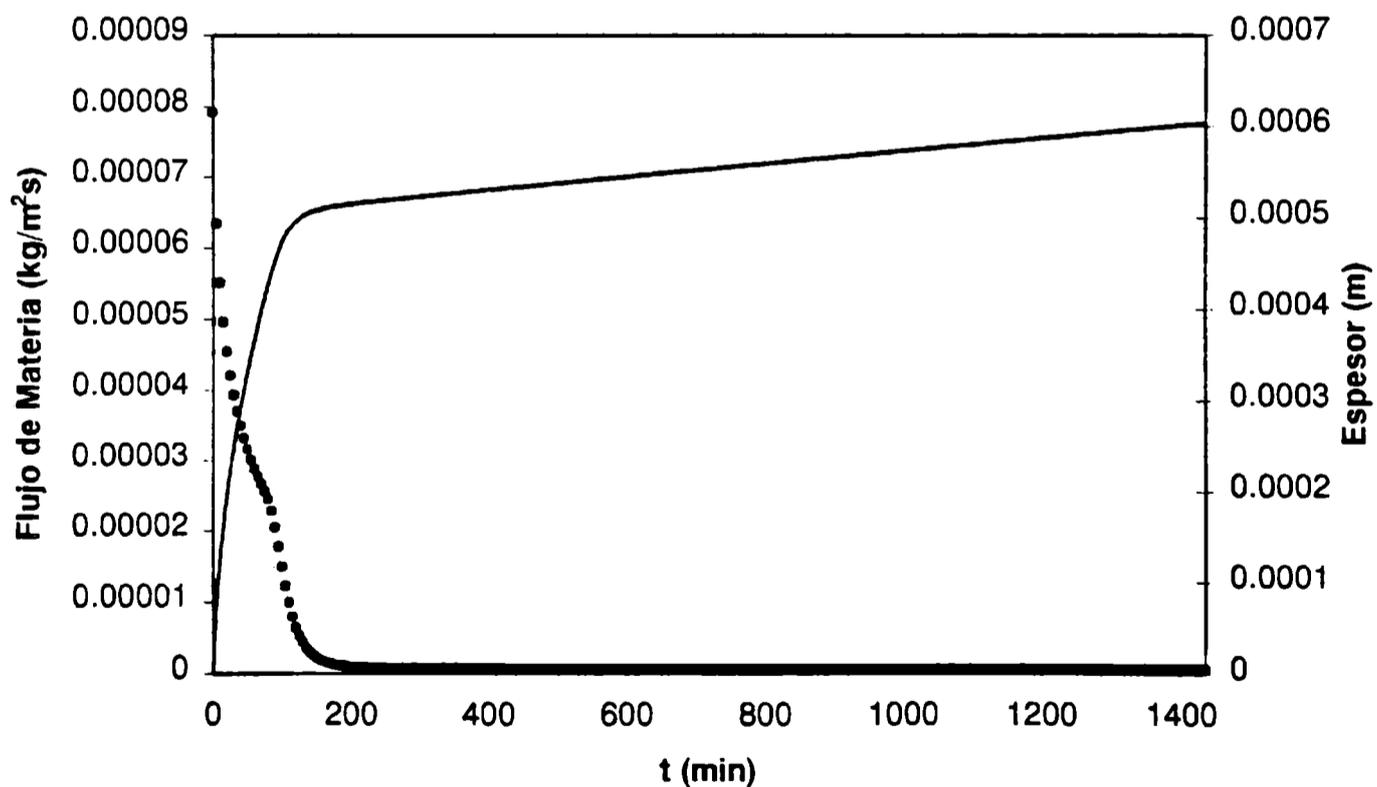


Figura 7.4: Flujo de materia (■) y espesor de la capa deshidratada (—) con el tiempo.

El cambio de pendiente en la curva de crecimiento de capa porosa corresponde al tiempo que el producto alcanza la temperatura del medio.

El espesor final de la capa superficial de esta muestra de carne es de aproximadamente 600 μm luego de someterlo a la congelación y al almacenamiento congelado durante 24 horas. El valor predicho por el modelo matemático es del mismo orden que el espesor que se observa experimentalmente (Capítulo 6).

7.2 ANALISIS PARAMETRICO

Como se ha demostrado, el modelo constituye una herramienta eficaz para determinar la pérdida de peso, por lo tanto, se emplea para predecir el comportamiento de los productos frente a diversas condiciones de operación.

El análisis del efecto de la variación de las condiciones operativas durante la congelación se realiza para una geometría en particular, pero se puede repetir para cualquier geometría deseada. Se seleccionó como muestra carne vacuna, con geometría placa plana de 3 cm de espesor. En el estudio se tienen en cuenta cuatro variables operativas: la temperatura, la velocidad y la humedad relativa del aire y la temperatura inicial del producto. Por simplicidad, cuando se estudia el efecto de una variable en particular, se emplea otra como parámetro y las otras dos restantes adoptan un valor estándar. Los valores estándares seleccionados son: para la temperatura del aire -30°C , para la humedad relativa 75%, para la velocidad del aire 3.5 m/s y para la temperatura inicial del producto 0°C .

Para el análisis durante el almacenamiento congelado se seleccionó como muestra carne vacuna, con geometría placa plana de 3 cm de espesor. Además, se considera que todas las muestras de carne se congelaron previamente bajo las mismas condiciones de operación. Se supone que las muestras poseen una temperatura inicial de 0°C y que se congelan en una corriente de aire de -30°C de temperatura, 3.5 m/s de velocidad y 75 % de humedad relativa (condiciones estándares de congelación seleccionadas). Estas condiciones provocan en las muestras una pérdida de peso de 1.42 % desde el ingreso al túnel hasta completar la congelación. Estas muestras que tienen este nivel de deshidratación, luego son ingresadas a una cámara frigorífica que opera en las condiciones operativas que se describen en cada caso y los resultados que se presentan son los obtenidos durante la congelación y el almacenamiento congelado dentro de la cámara durante un mes.

Las variables operativas estudiadas durante el almacenamiento congelado son: la velocidad, la temperatura y la humedad relativa del aire. Cuando se analiza una variable en particular, se emplea otra como parámetro y la restante permanece con un valor fijo. Los valores estándares seleccionados para el almacenamiento congelado seleccionados son: para la temperatura del aire -25°C , para la velocidad 1 m/s y para la humedad relativa 75% .

7.2.1 TEMPERATURA DEL AIRE

Una variable importante para la congelación y el almacenamiento congelado es la temperatura del aire.

En el caso de congelación, cuando disminuye la temperatura del aire, se acelera el proceso, pues aumenta la fuerza impulsora para la transferencia de energía. Al disminuir el tiempo de congelación, también lo hace la pérdida de peso, porque es menor el tiempo que el producto está expuesto a la deshidratación. Las Figuras 7.5, 7.6 y 7.7 muestran los resultados predichos por el software numérico.

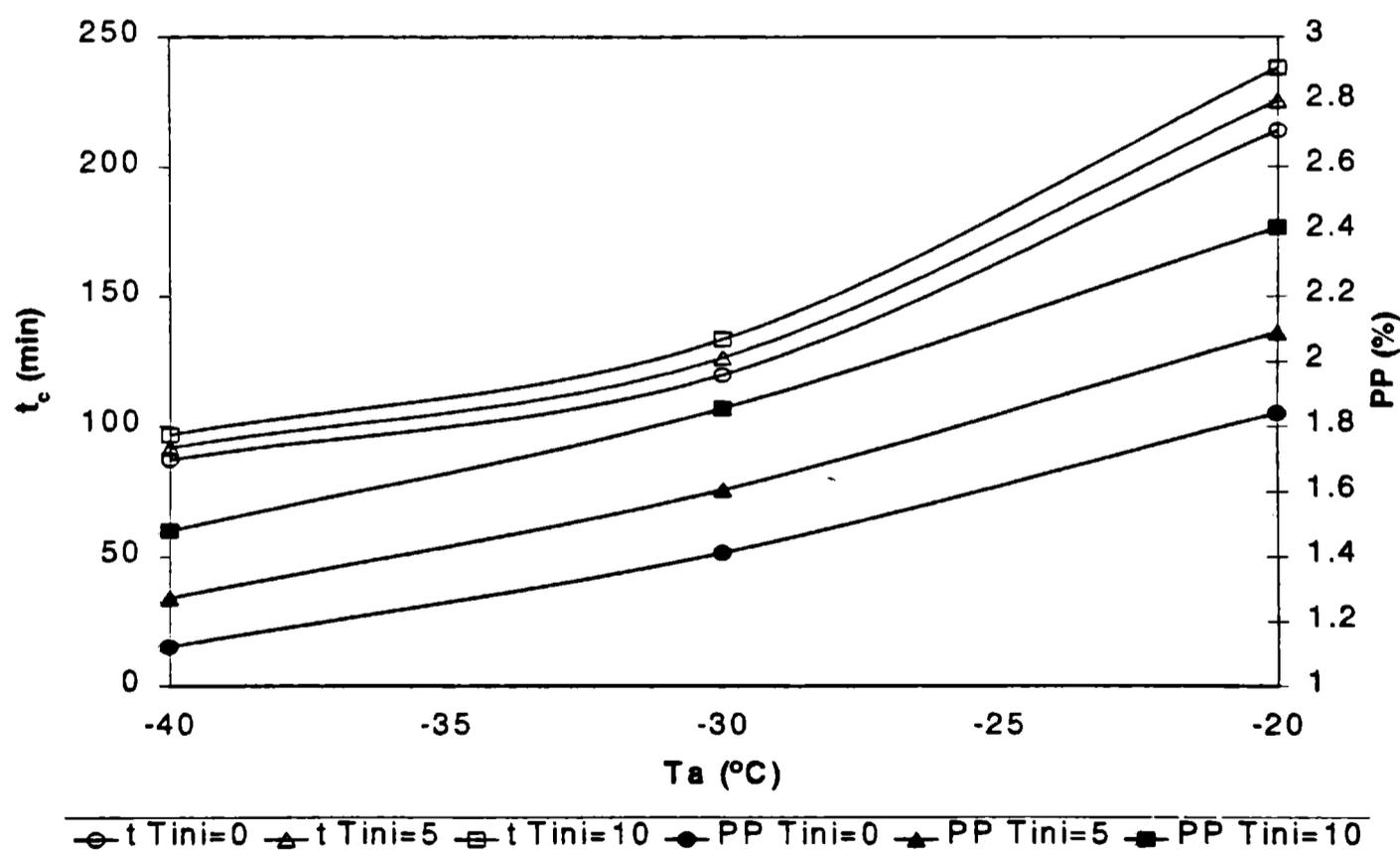


Figura 7.5: Efecto de la temperatura del aire para distintas temperaturas iniciales de producto durante la congelación ($v=3.5\text{ m/s}$, $HR=75\%$).

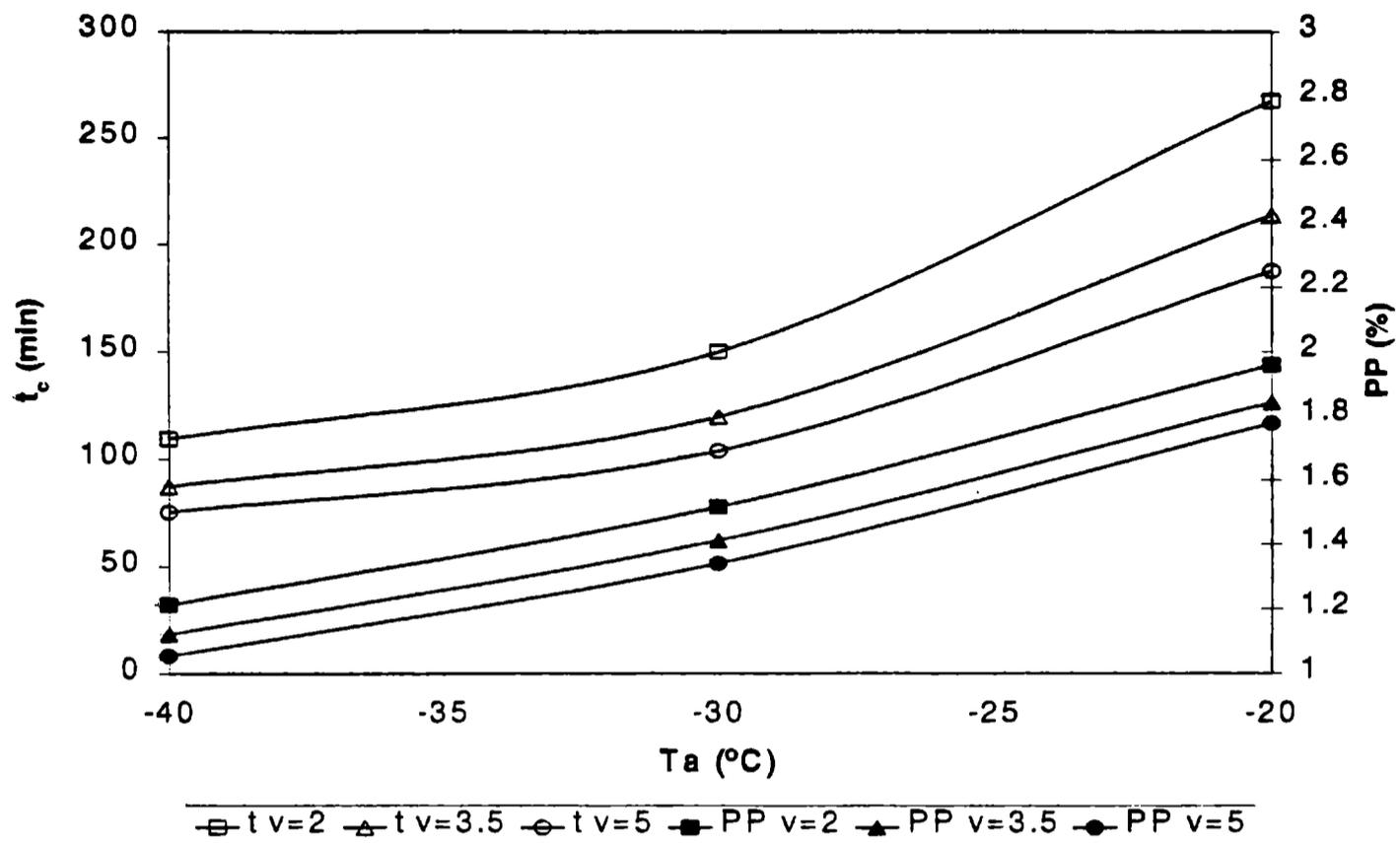


Figura 7.6: Efecto de la temperatura del aire para distintas velocidades de aire durante la congelación ($T_{ini}=0^{\circ}\text{C}$, $\text{HR}=75\%$).

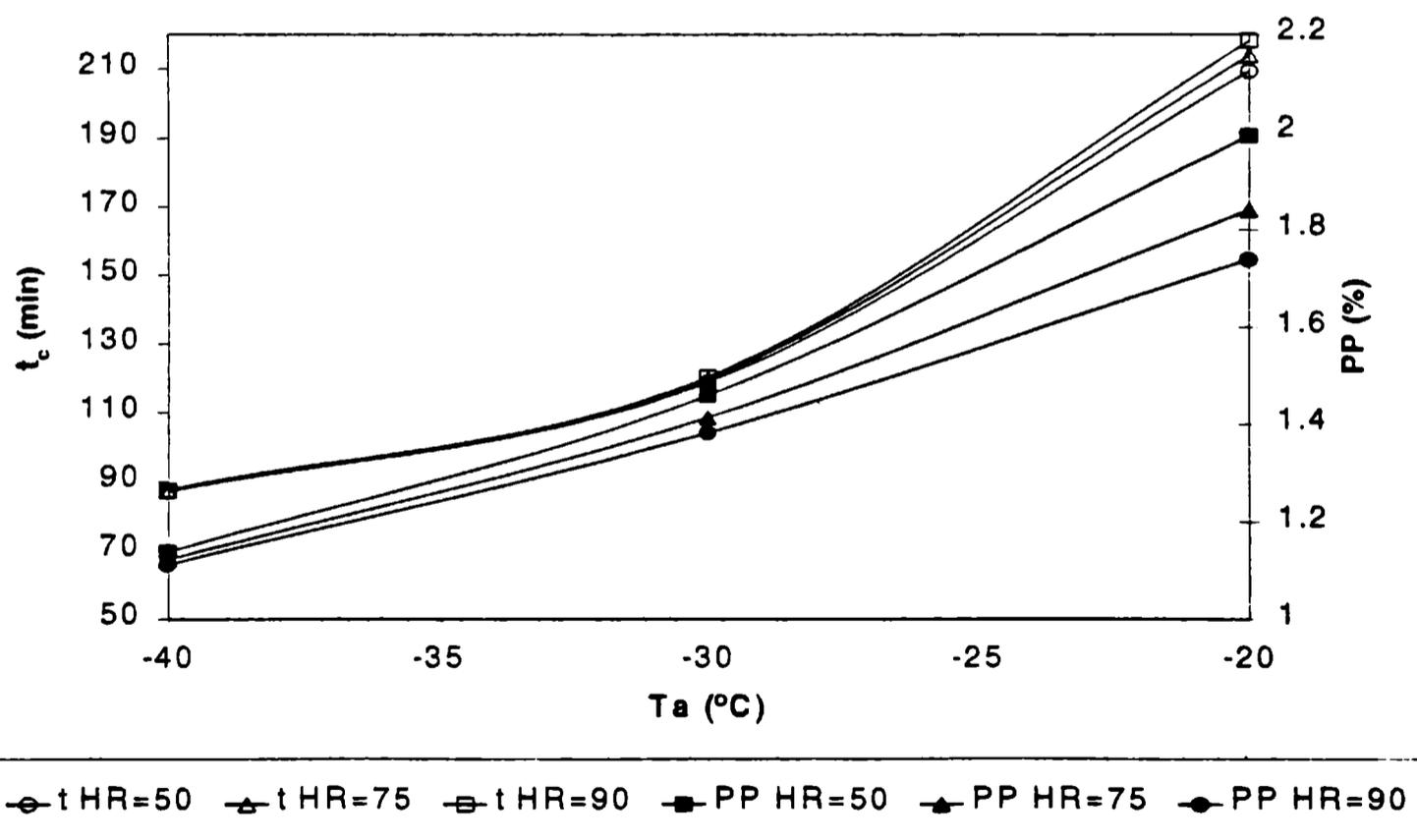


Figura 7.7: Efecto de la temperatura del aire para distintas humedades relativas durante la congelación ($T_{ini}=0^{\circ}\text{C}$, $v=3.5 \text{ m/s}$).

En el caso de almacenamiento congelado, al disminuir la temperatura del aire, disminuye la fuerza impulsora para la pérdida de materia, entonces disminuye la pérdida de peso, como se observa en las Figuras 7.8 y 7.9. El tamaño de la capa deshidratada se presenta en los mismos gráficos. Se puede ver que el comportamiento del espesor de la capa deshidratada sigue la misma dependencia que la pérdida de peso con respecto a la variable considerada.

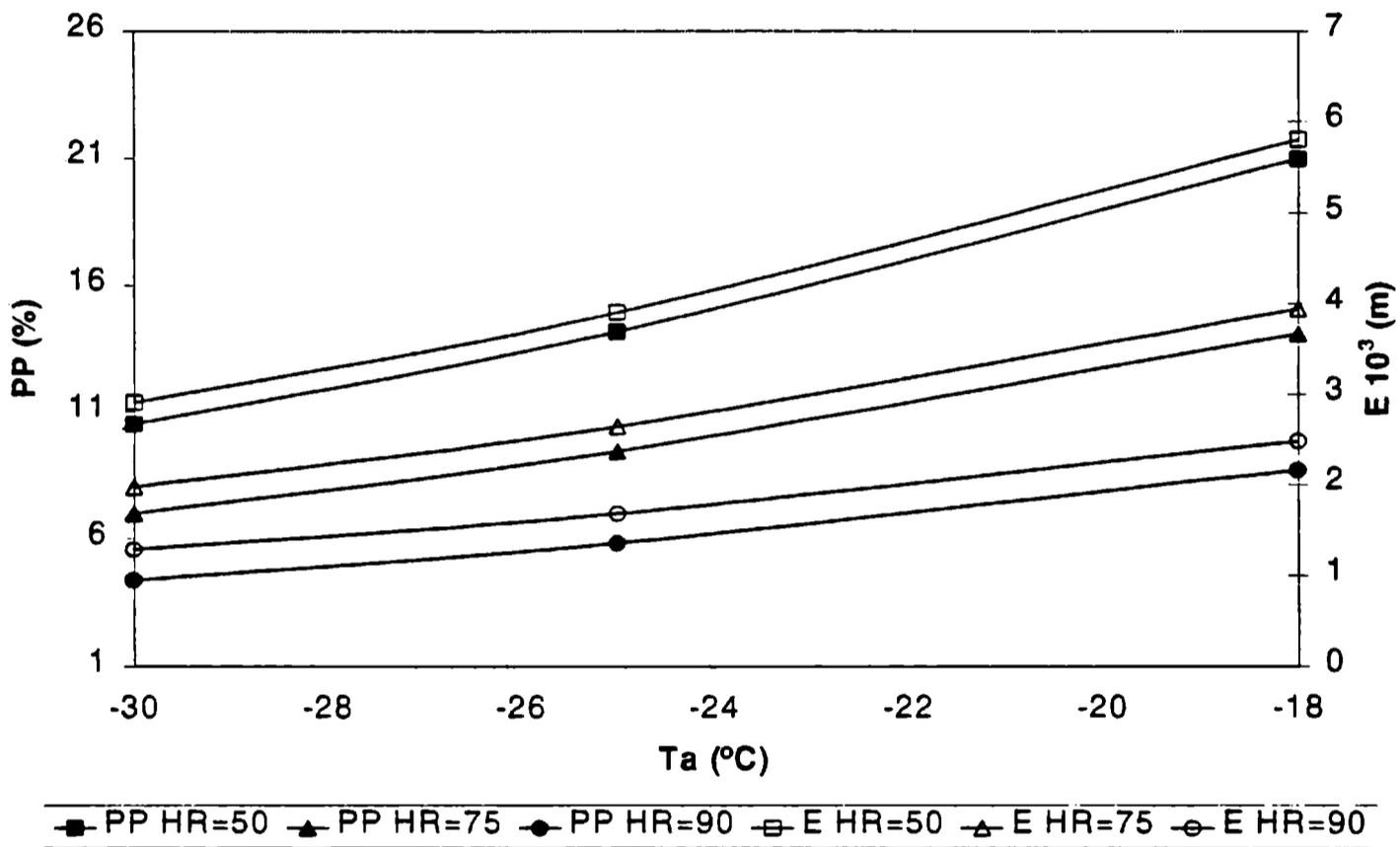


Figura 7.8: Efecto de la temperatura del aire para distintas humedades relativas durante la congelación y el almacenamiento congelado ($v=1$ m/s).

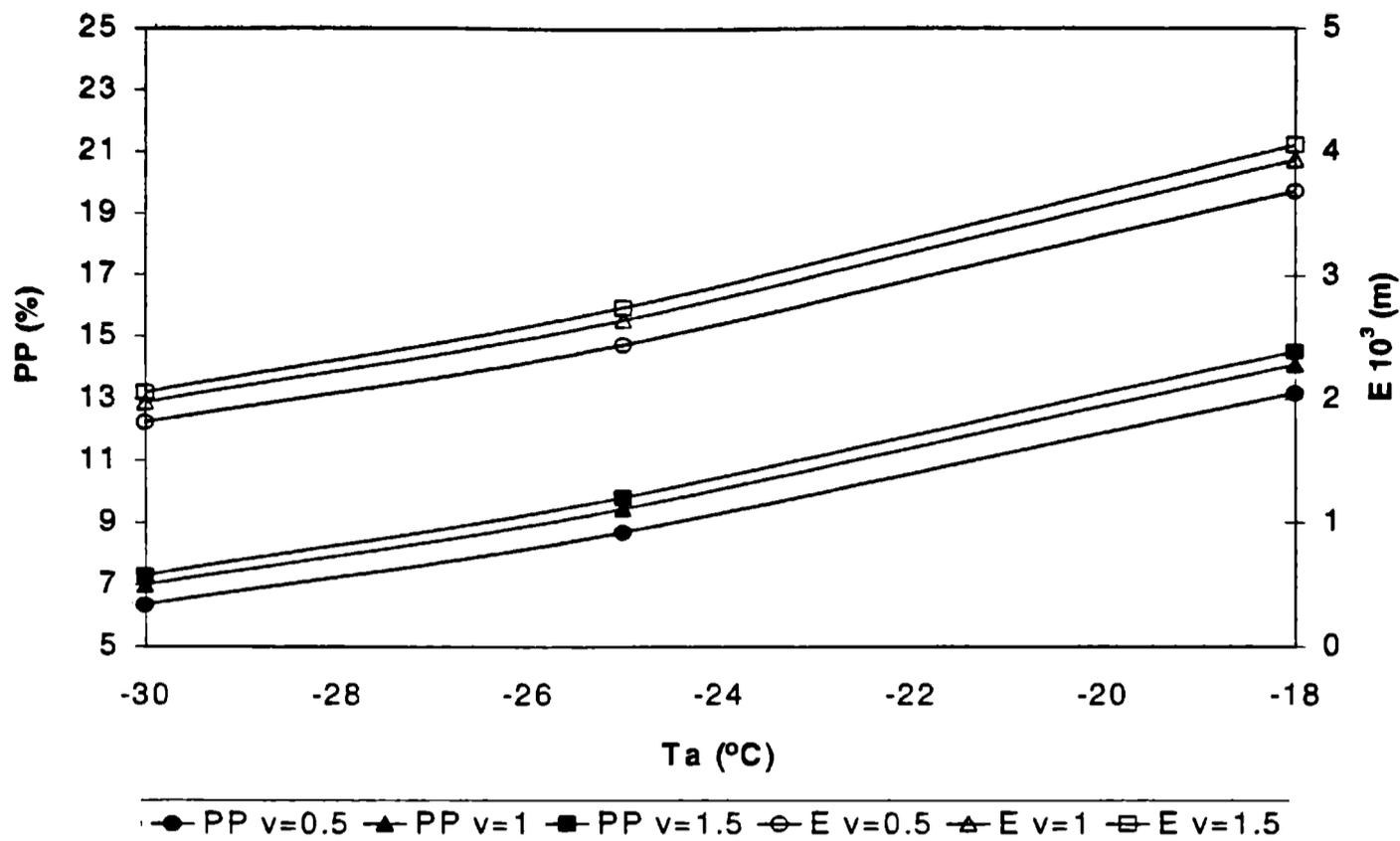


Figura 7.9: Efecto de la temperatura del aire para distintas velocidades de aire durante la congelación y el almacenamiento congelado (HR=75%).

7.2.2 VELOCIDAD DEL AIRE

La velocidad de aire juega un rol esencial en la evaluación de la pérdida de peso.

Durante la congelación, al aumentar la velocidad aumenta el coeficiente de transferencia de energía provocando una disminución del tiempo de congelación. A su vez, también crece el coeficiente de materia lo que tendría que provocar un aumento en la pérdida de peso, pero este efecto se ve, en parte, neutralizado por la resistencia a la difusión de la capa deshidratada. Como resultado final de la influencia de todas las variables que entran en juego, se observa una leve disminución de la pérdida de peso con el aumento de la velocidad. Este comportamiento se muestra en las Figuras 7.10, 7.11 y 7.12.

Un comportamiento opuesto se obtiene durante el almacenamiento congelado. Al aumentar la velocidad del aire, también lo hace la pérdida de peso. Esto se debe a que durante el almacenamiento congelado domina la transferencia de materia y un aumento de la velocidad implica un aumento del coeficiente de transferencia de materia y esto favorece a la pérdida de humedad (Figuras 7.13 y 7.14).

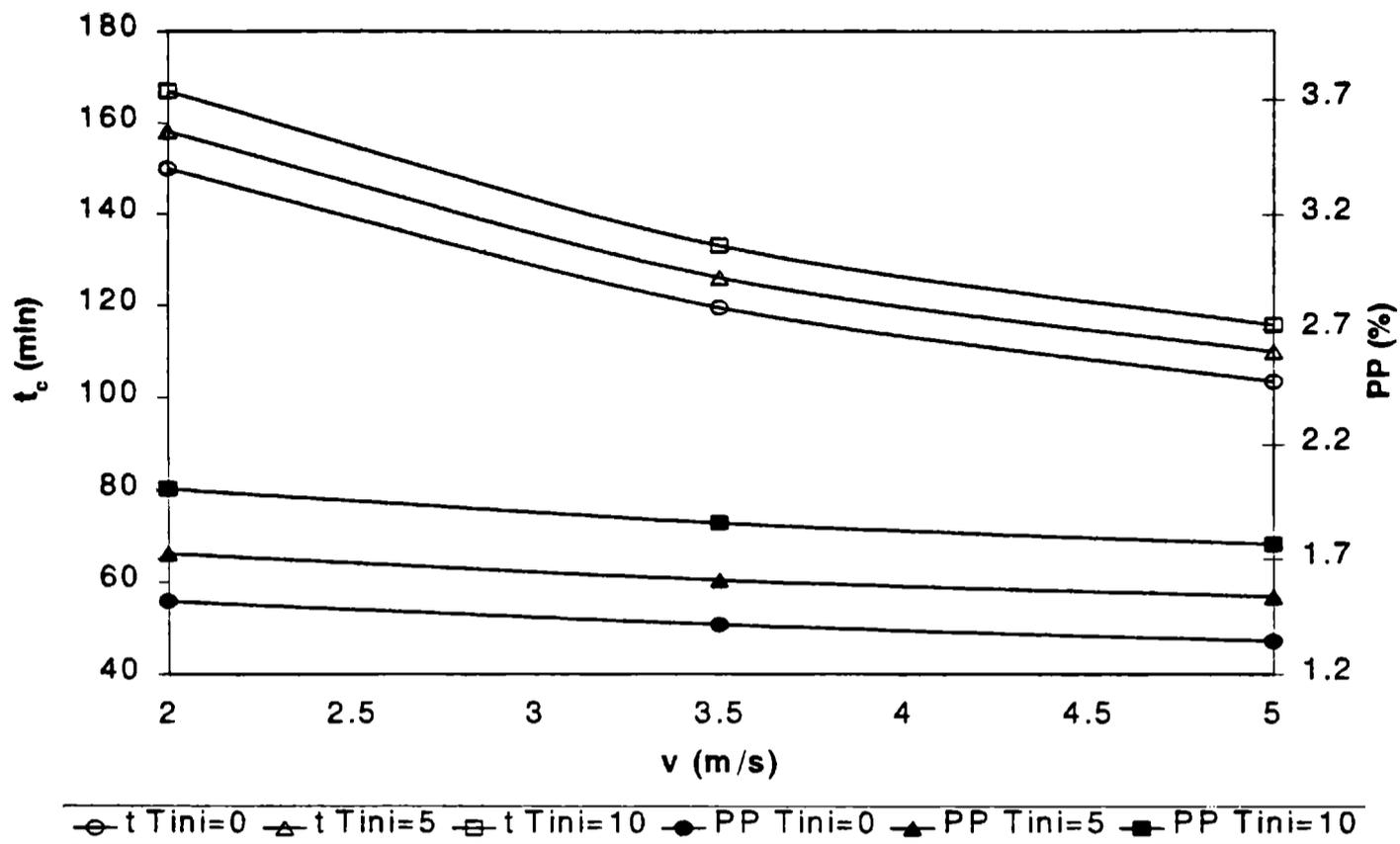


Figura 7.10: Efecto de la velocidad de aire para distintas temperaturas iniciales durante la congelación ($T_a = -30^\circ\text{C}$, $\text{HR} = 75\%$).

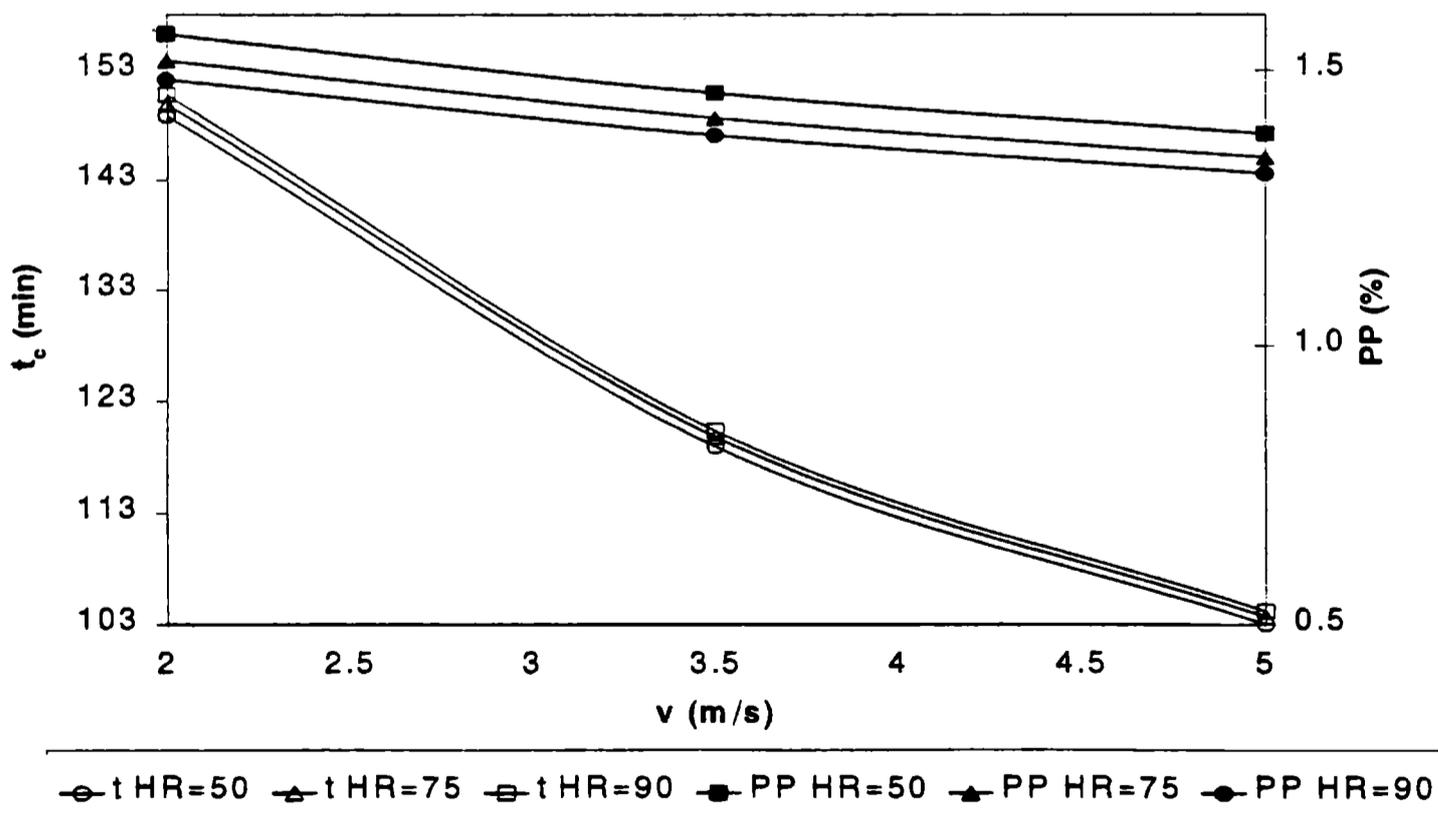


Figura 7.11: Efecto de la velocidad del aire para distintas humedades relativas durante la congelación ($T_{ini} = 0^\circ\text{C}$, $T_a = -30^\circ\text{C}$).

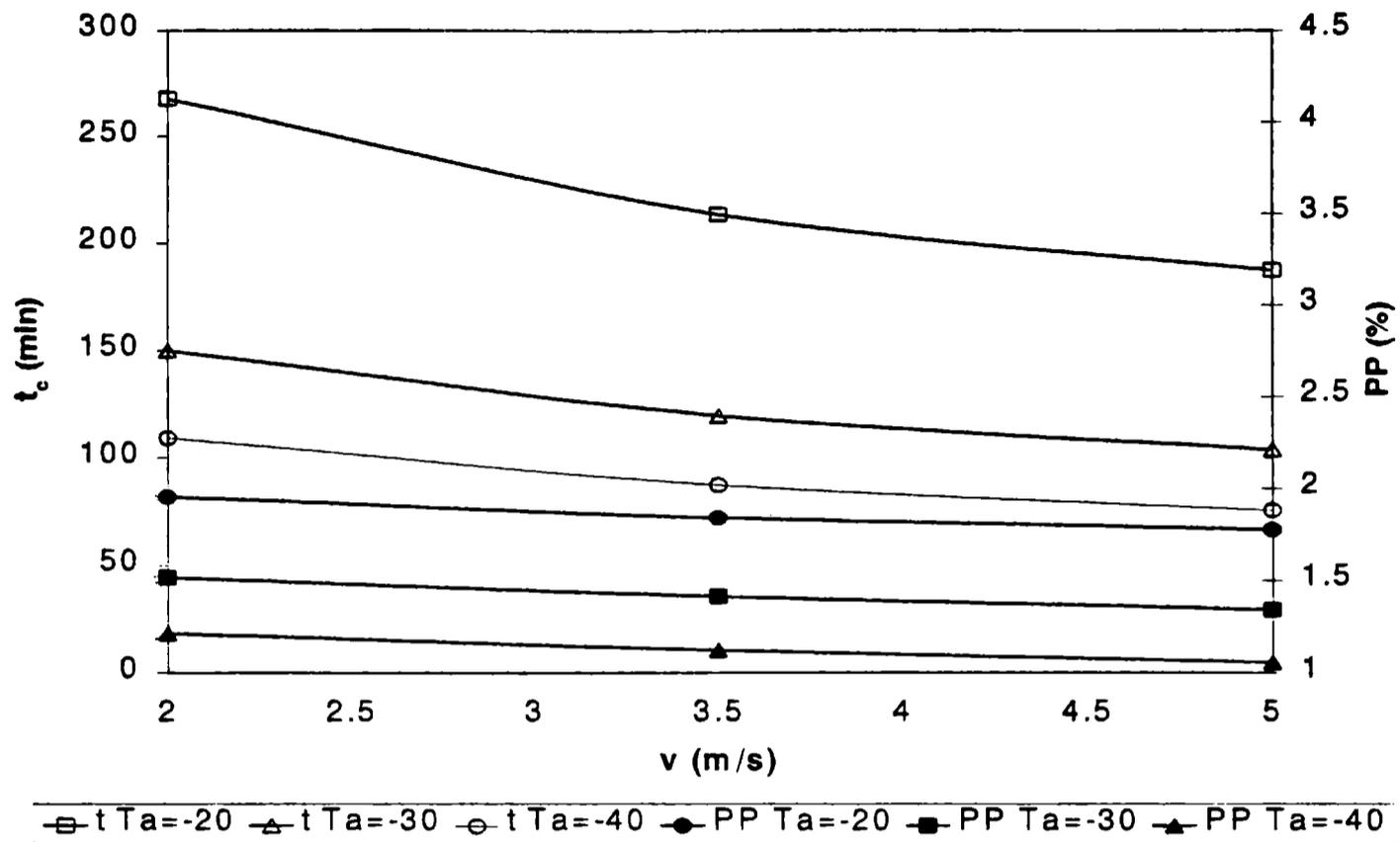


Figura 7.12: Efecto de la velocidad del aire para distintas temperaturas de aire durante la congelación ($T_{ini}=0^\circ\text{C}$, $HR=75\%$).

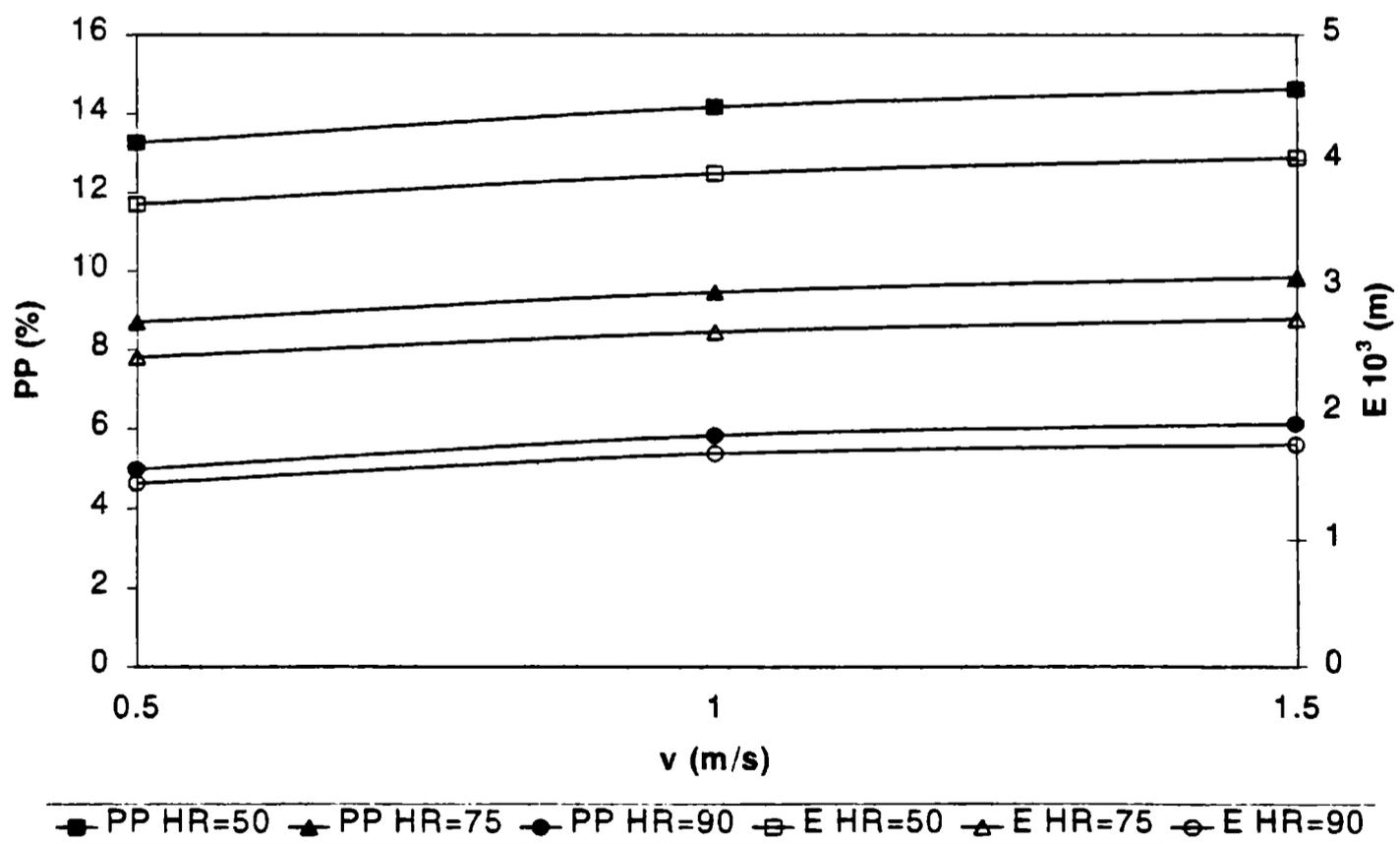


Figura 7.13: Efecto de la velocidad del aire para distintas humedades relativas durante la congelación y el almacenamiento congelado ($T_a=-25^\circ\text{C}$).

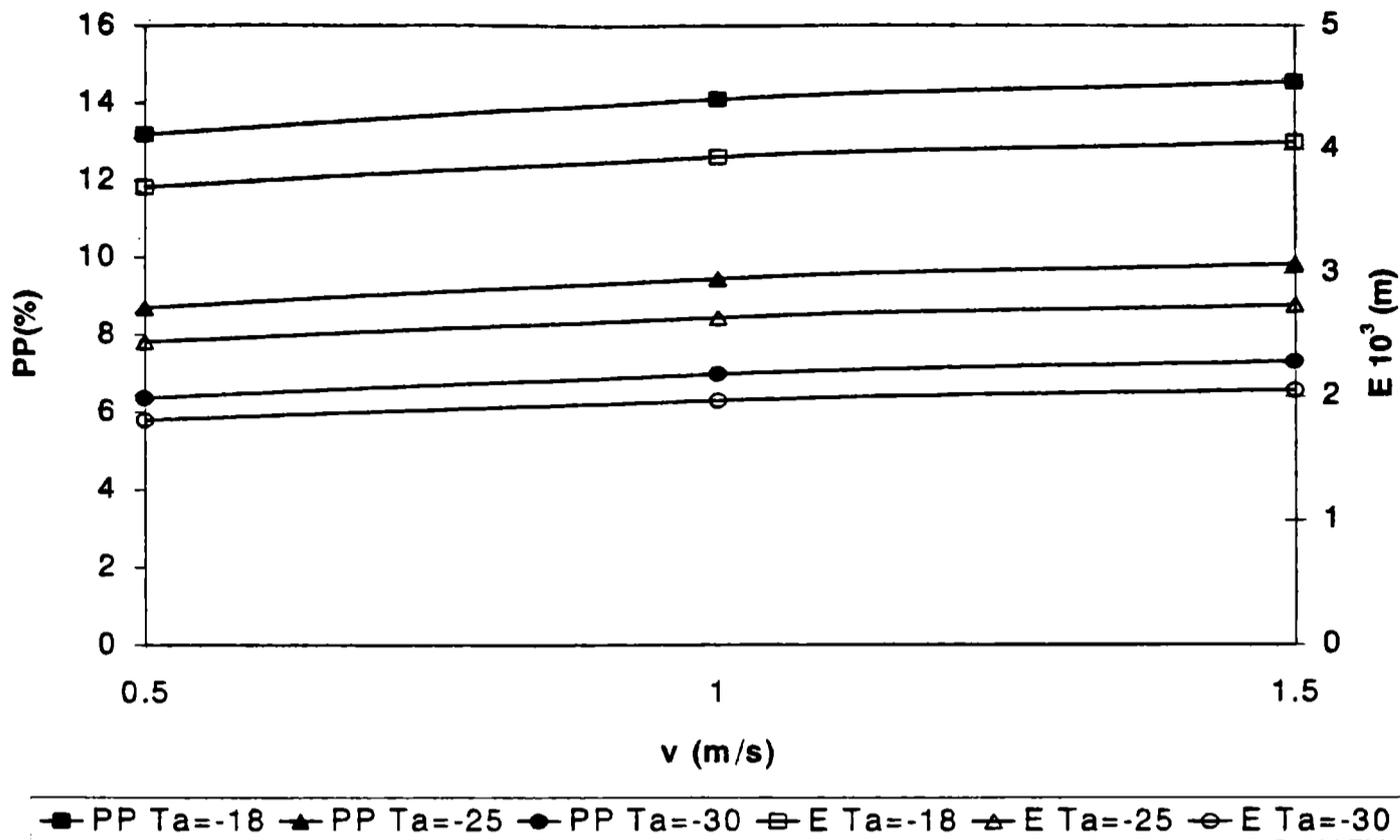


Figura 7.14: Efecto de la velocidad para distintas temperaturas de aire durante la congelación y el almacenamiento congelado (HR=75%).

7.2.3 HUMEDAD RELATIVA AMBIENTE

En la práctica, este parámetro no es controlado y en bibliografía generalmente se presentan valores experimentales medidos. Igualmente, el interés del empleo del modelo matemático para estudiar esta condición operativa reside en la evaluación del comportamiento de las muestras durante la congelación y el almacenamiento congelado.

Para el caso de congelación, la pérdida de peso no acompaña el comportamiento del tiempo de congelación. A menor humedad relativa, mayor es la fuerza impulsora para la pérdida de peso y este incremento en la pérdida de materia provoca una disminución del tiempo de congelación debido al efecto del enfriamiento adicional por la absorción del calor de sublimación del hielo.

Durante el almacenamiento congelado, la pérdida de peso muestra una dependencia respecto de la humedad relativa similar a la del proceso de congelación. Cuando la humedad relativa es baja, mayor es la pérdida de peso.

En las Figuras 7.15-7.19 se muestran los resultados obtenidos por simulación.

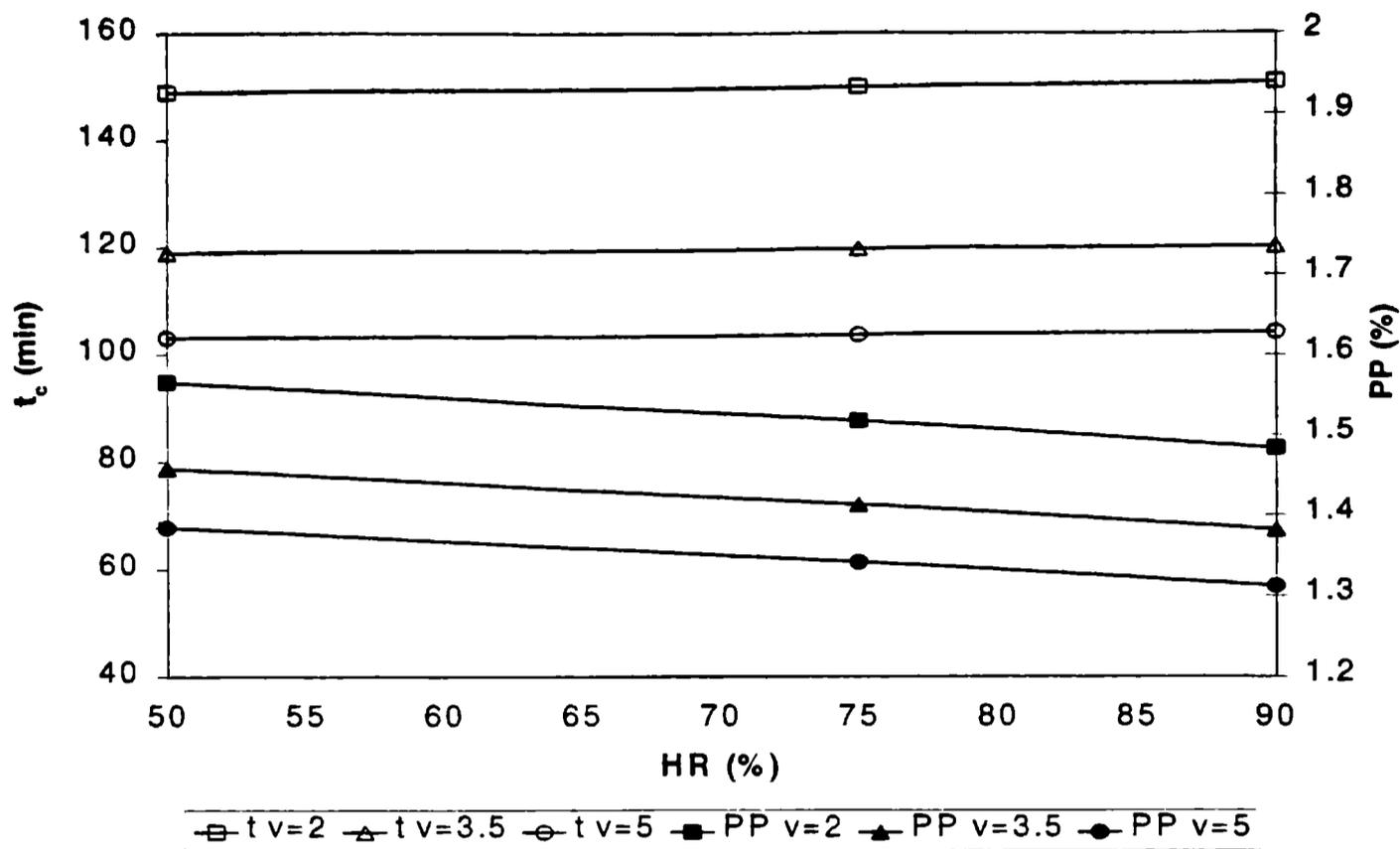


Figura 7.15: Efecto de la humedad relativa para distintas velocidades de aire durante la congelación ($T_{ini}=0^{\circ}C$, $T_a=-30^{\circ}C$).

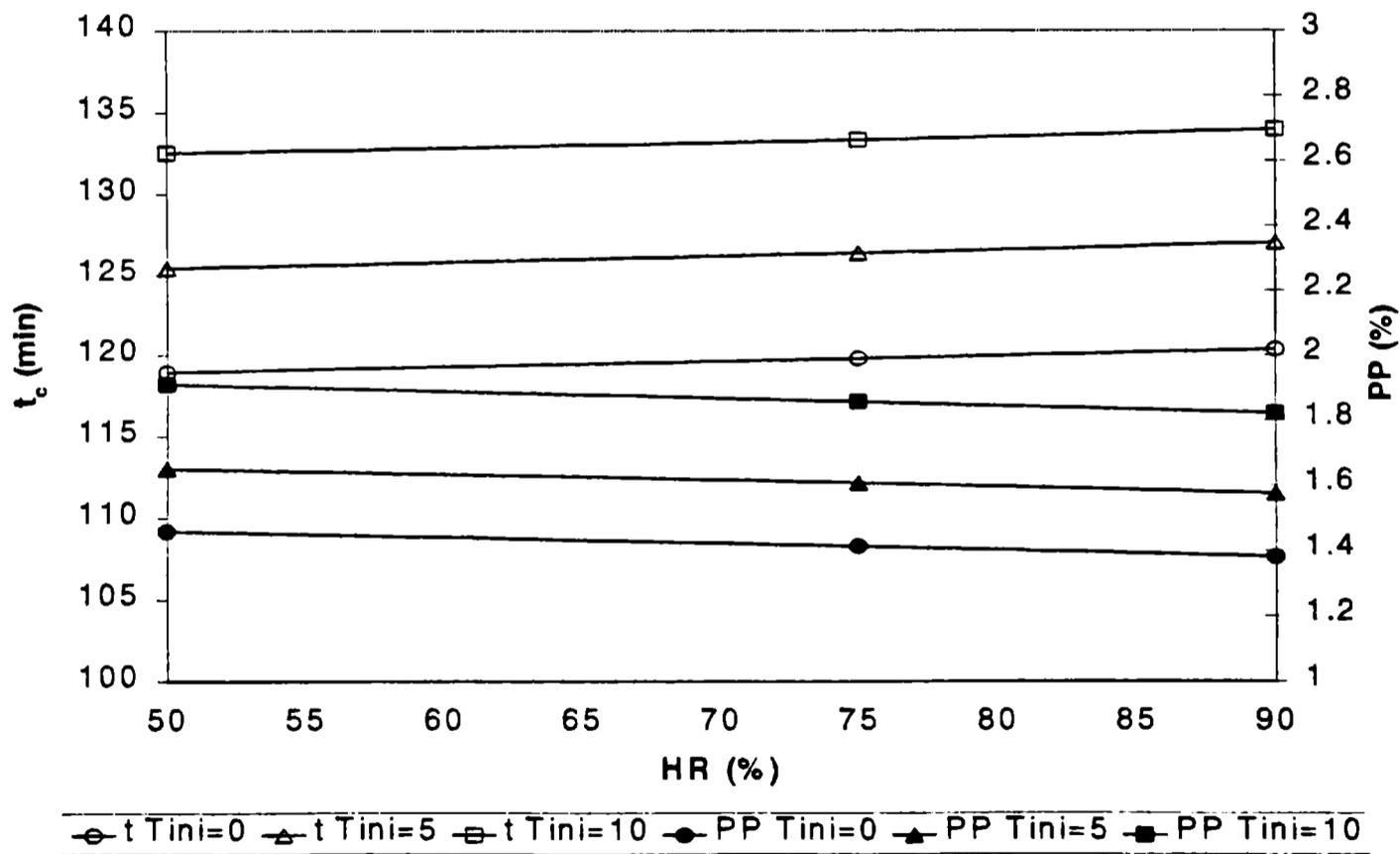


Figura 7.16: Efecto de la humedad relativa para distintas temperaturas iniciales durante la congelación ($v=3.5$ m/s, $T_a=-30^{\circ}C$).

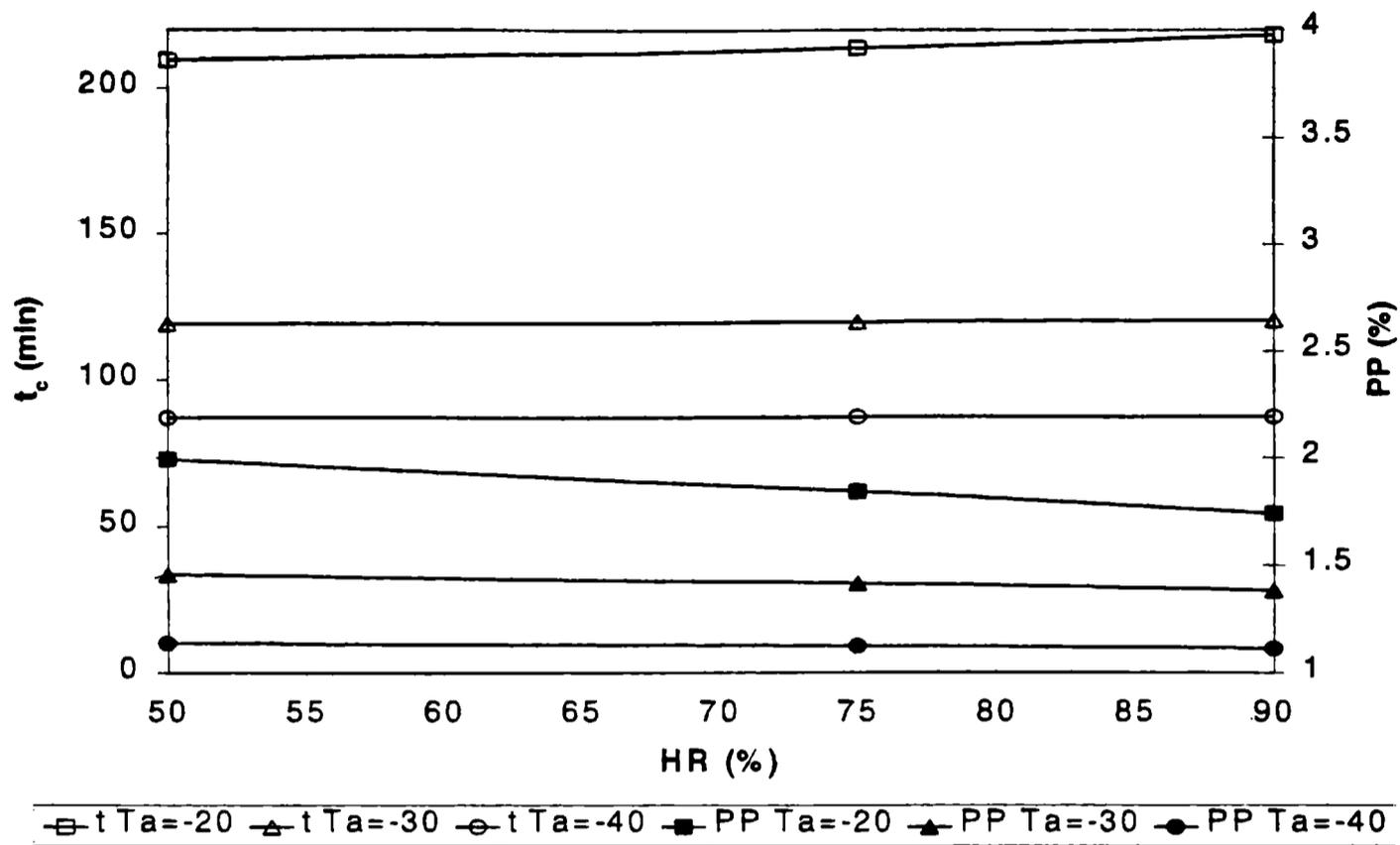


Figura 7.17: Efecto de la humedad relativa para distintas temperaturas de aire durante la congelación ($v=3.5$ m/s, $T_{ini}=0^{\circ}\text{C}$).

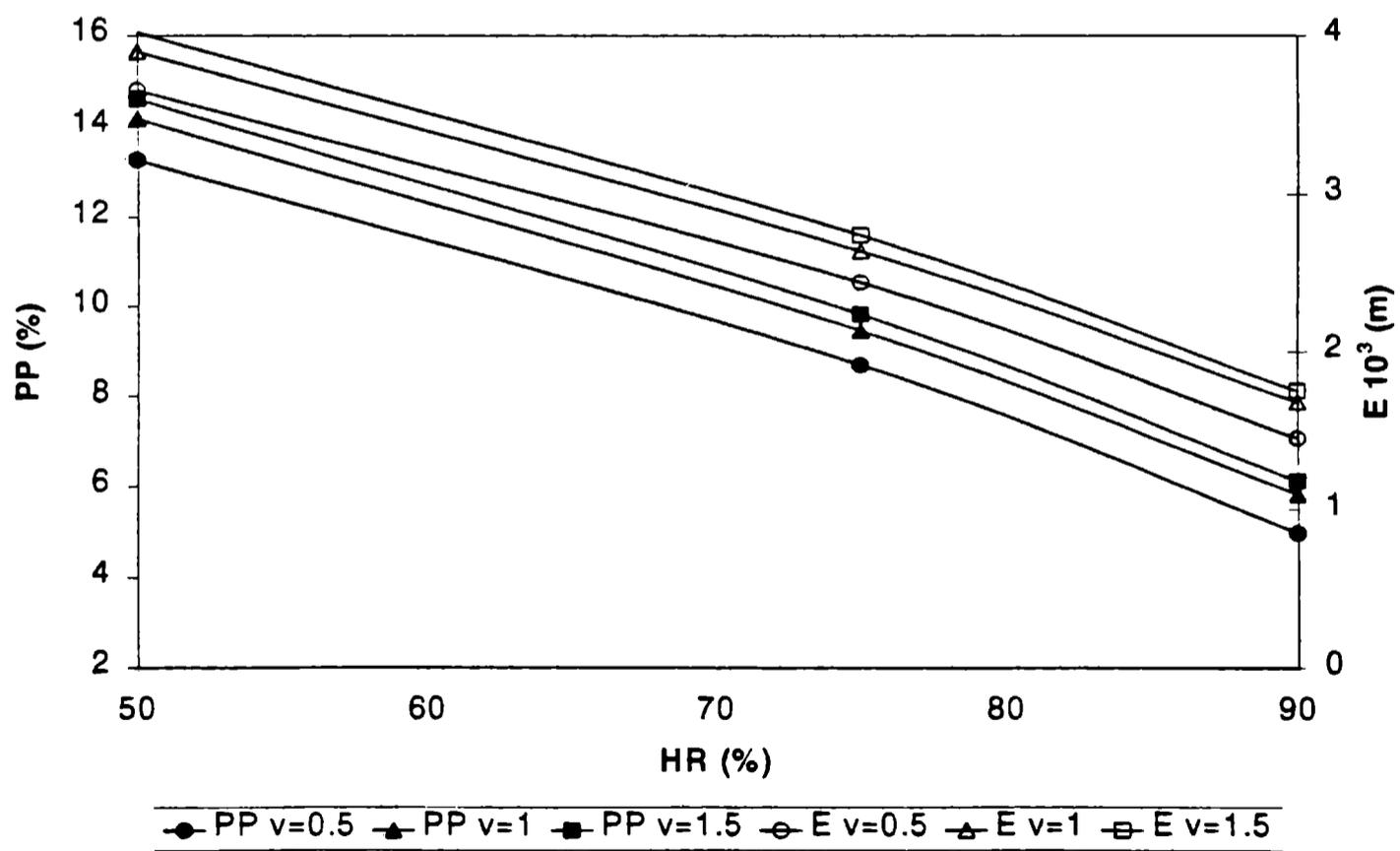


Figura 7.18: Efecto de la humedad relativa para distintas velocidades de aire durante la congelación y el almacenamiento congelado ($T_a=-25^{\circ}\text{C}$).

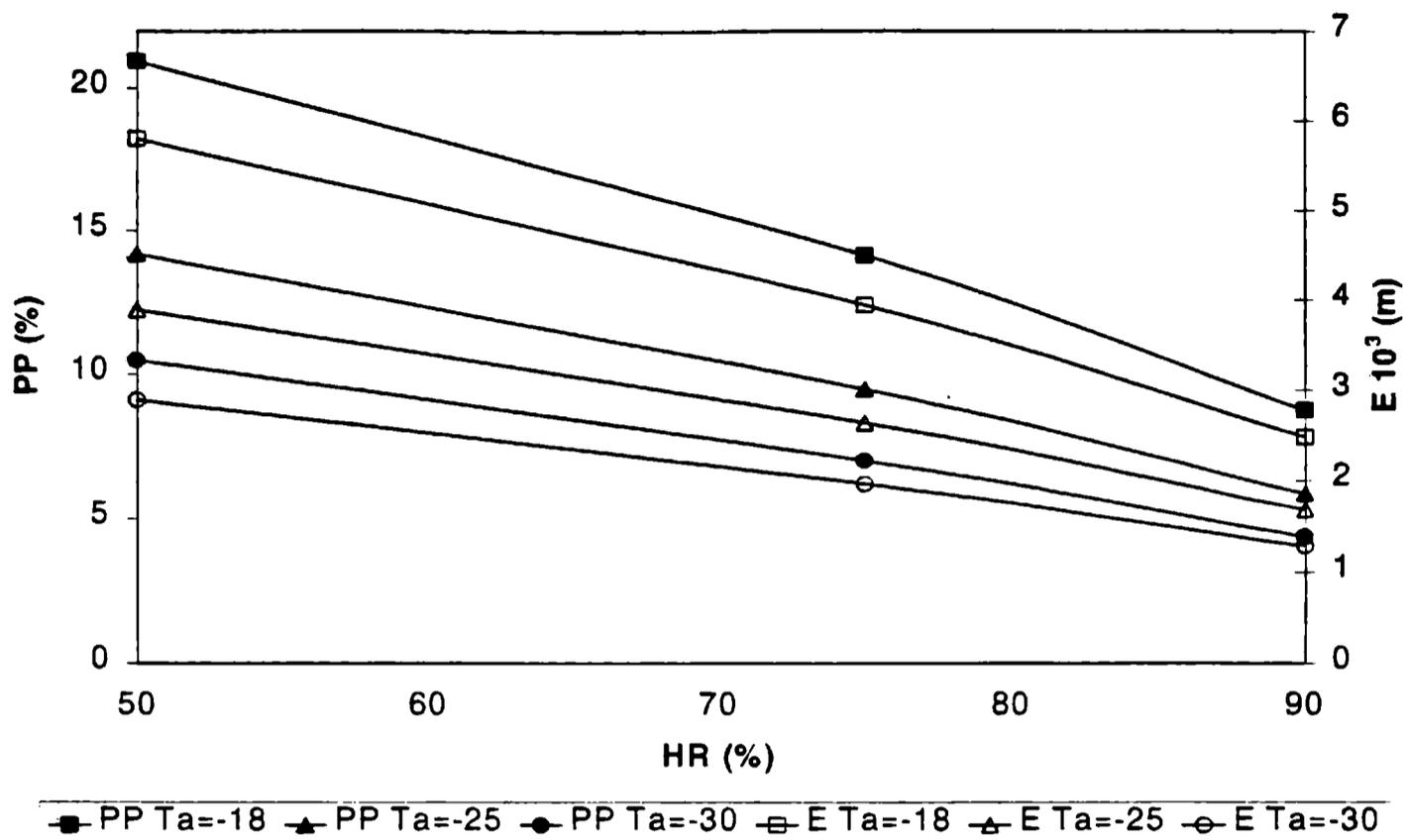


Figura 7.19: Efecto de la humedad relativa para distintas temperaturas de aire durante la congelación y el almacenamiento congelado ($v=1\text{m/s}$).

7.2.4 TEMPERATURA INICIAL DEL PRODUCTO

El efecto de esta variable se analizó en el caso de congelación, debido a que durante el almacenamiento congelado se considera que el producto ingresa a la cámara de almacenamiento a una temperatura inicial uniforme preestablecida.

En las Figuras 7.20, 7.21 y 7.22 se muestran los resultados predichos por el modelo matemático.

En general, se puede observar, que a mayor valor de la temperatura inicial mayor es el tiempo que el producto tarda en congelarse y mayor es la pérdida de peso asociada a este proceso.

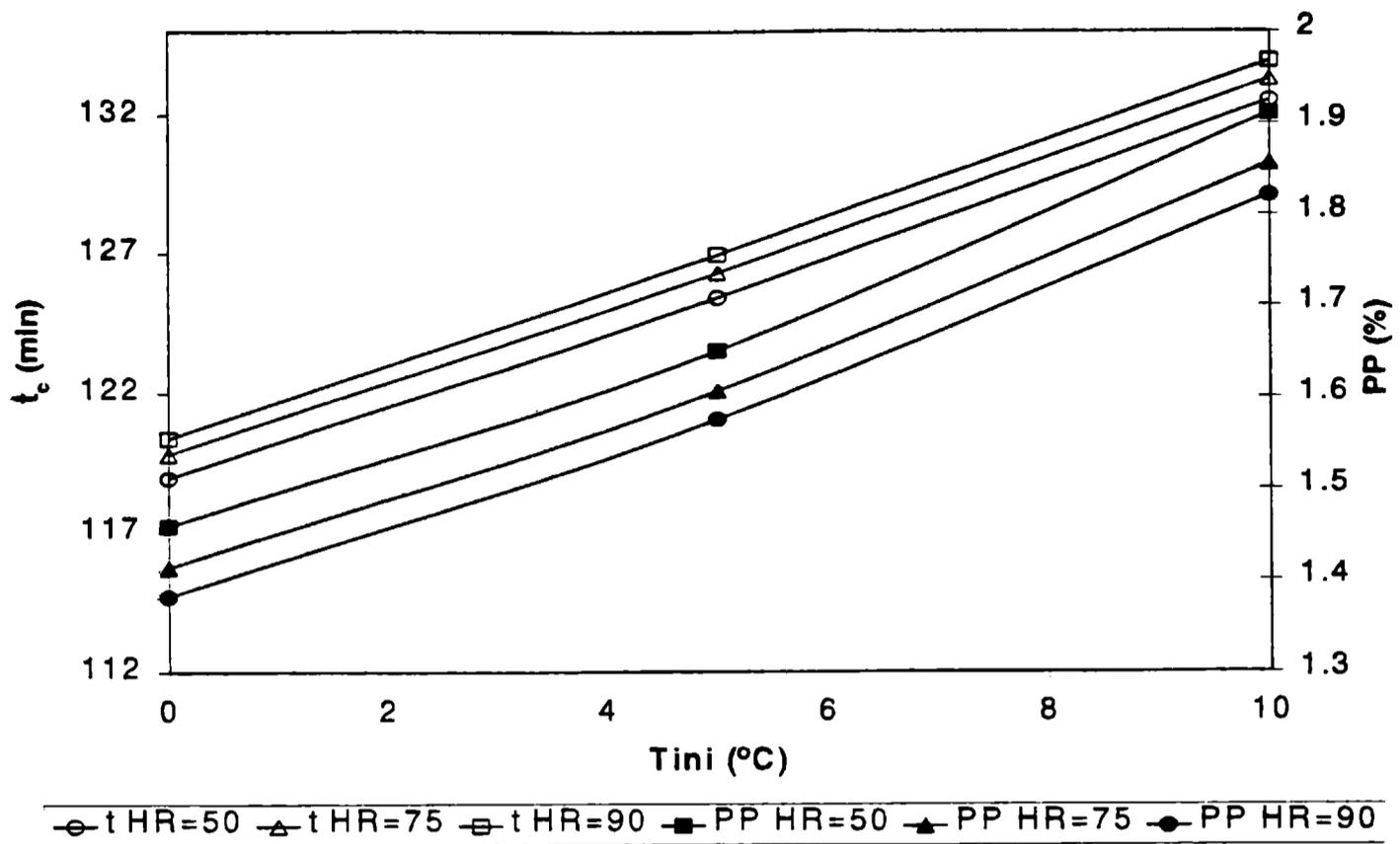


Figura 7.20: Efecto de la temperatura inicial para distintas humedades relativas durante la congelación ($T_a = -30^\circ\text{C}$, $v = 3.5$ m/s).

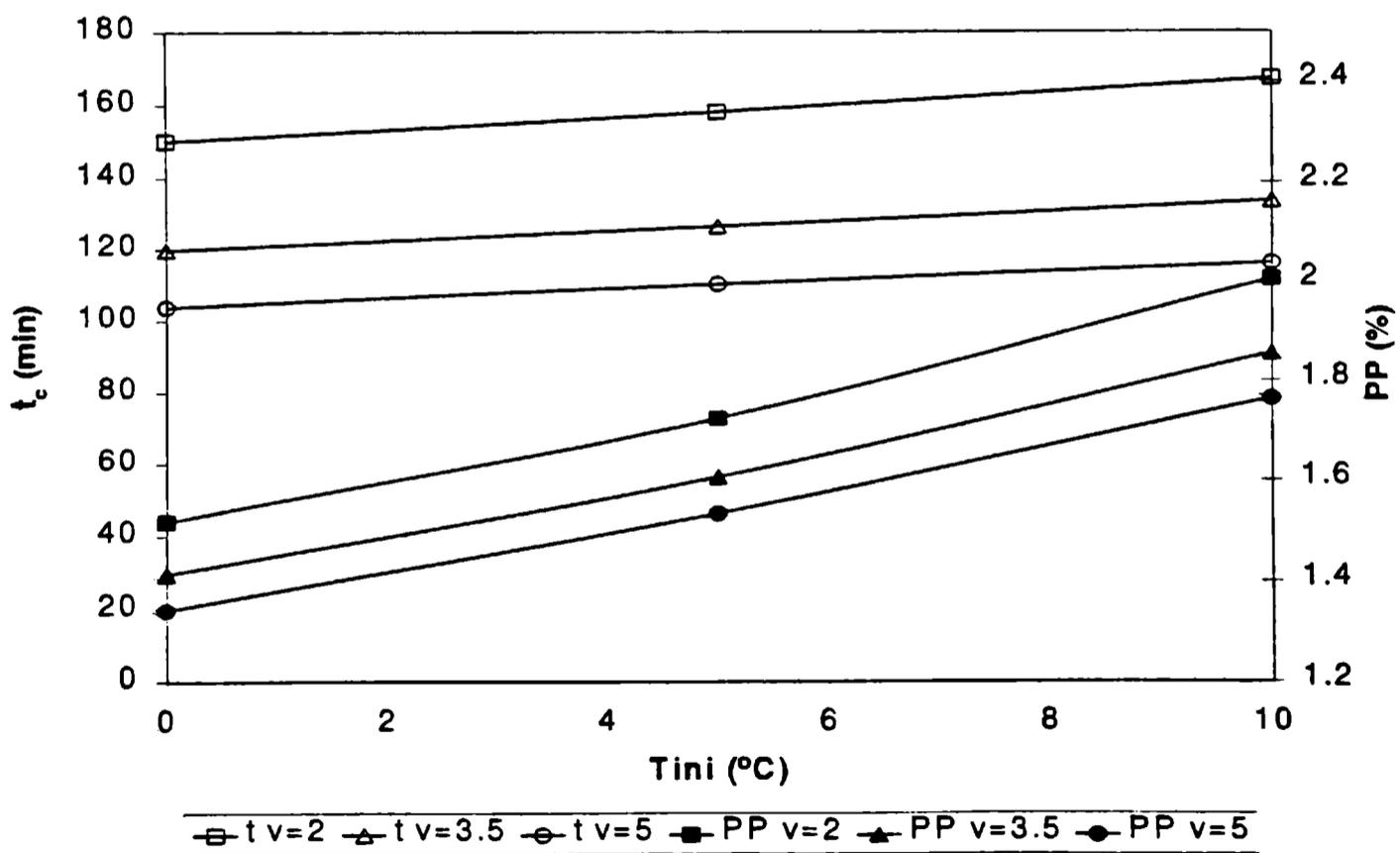


Figura 7.21: Efecto de la temperatura inicial para distintas velocidades de aire durante la congelación ($T_a = -30^\circ\text{C}$, HR=75%).

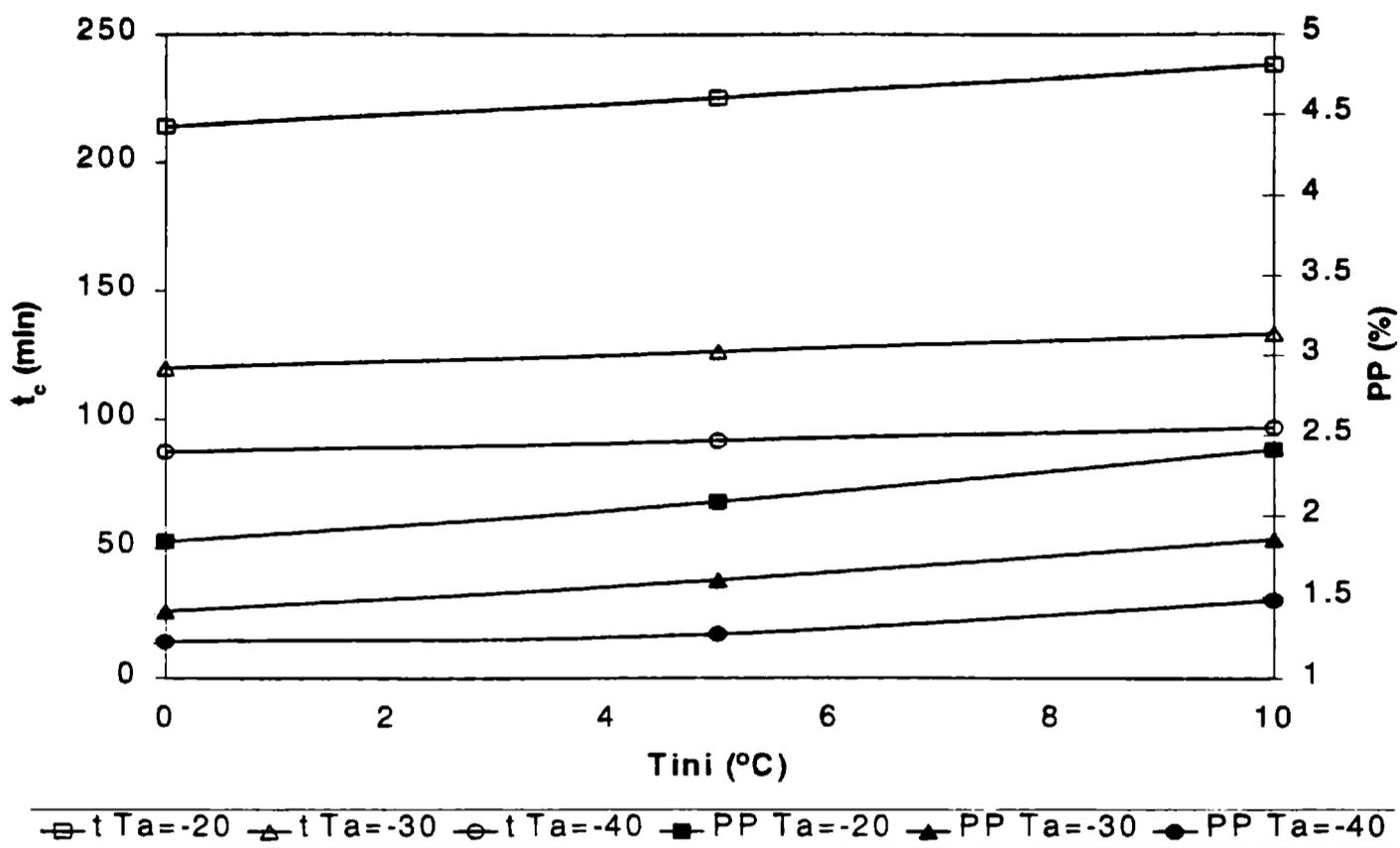


Figura 7.22: Efecto de la temperatura inicial para distintas temperaturas de aire durante la congelación (HR=75%, $v=3.5\text{m/s}$).

De esta forma, se concluye el análisis de las variables relevantes en el tiempo de congelación, la pérdida de peso y el crecimiento de la capa deshidratada superficial.

7.2.5 EFECTO DE LAS CONDICIONES DE CONGELACIÓN EN EL ALMACENAMIENTO CONGELADO

Para realizar el análisis del efecto de las variables operativas en el almacenamiento congelado presentado 7.2.1 a 7.2.4, se supuso que todas las muestras se congelaban en las mismas condiciones y tenían por lo tanto, la misma pérdida de peso inicial generada en el proceso de congelación. Esta suposición se realiza, debido a que de acuerdo a la forma que se lleva a cabo el proceso de congelación, la pérdida de materia es diferente, el espesor de la capa deshidratada también lo es y el software numérico tiene la capacidad de predecir como se comporta el producto durante el almacenamiento congelado frente a esta situación.

Para ejemplificar, se suponen dos situaciones de congelación distintas seguidas de la misma situación de almacenamiento congelado:

- Situación 1: se suponen dos muestras de carne vacuna de geometría placa plana de 3 cm de espesor, temperatura inicial 0°C, congeladas en un túnel que posee una temperatura de aire de -30°C y 75 % de humedad relativa, pero cada una de ellas expuestas a dos velocidades de aire distintas 1m/s y 5m/s. Luego ambas muestras se colocan para su almacenamiento congelado en una cámara durante una semana, que opera a una velocidad de 1 m/s, con la misma humedad y temperatura de aire con que se realizó la congelación. En la Tabla 7.1 se presentan los resultados de pérdida de peso y de espesor de capa deshidratada predichos por el modelo durante los procesos de congelación y almacenamiento congelado analizando individualmente la contribución de cada etapa:

Tabla 7.1: Efecto de la velocidad de congelación en el almacenamiento congelado.

Congelación			Almacenamiento congelado			Cong.+Almac.	
v (m/s)	E (m)	PP (%)	v (m/s)	E (m)	PP (%)	E (m)	PP (%)
1	6.41 10 ⁻⁴	1.63	1	4.16 10 ⁻⁴	1.57	10.57 10 ⁻⁴	3.2
5	4.55 10 ⁻⁴	1.34	1	4.64 10 ⁻⁴	1.75	9.19 10 ⁻⁴	3.1

- Situación 2: se suponen dos muestras de carne vacuna de geometría placa plana de 3 cm de espesor, temperatura inicial 0°C, congeladas en un túnel que posee una velocidad de aire de 3.5 m/s y 75 % de humedad relativa, pero cada una de ellas expuestas a dos temperaturas de aire distintas -20°C y -40°C. Luego ambas muestras se colocan para su almacenamiento congelado en una cámara durante una semana, que opera a una temperatura de -30°C, con 75% de humedad relativa y una velocidad de aire de 1 m/s. El modelo predice los siguientes resultados de cada etapa individual:

Tabla 7.2: Efecto de la temperatura de congelación en el almacenamiento congelado.

Congelación			Almacenamiento congelado			Cong. +Almac.	
T _a (°C)	E (m)	PP (%)	T _a (°C)	E (m)	PP (%)	E(m)	PP (%)
-20 °C	6.96 10 ⁻⁴	1.84	-30	4.03 10 ⁻⁴	1.51	10.99 10 ⁻⁴	3.35
-40 °C	3.74 10 ⁻⁴	1.12	-30	4.88 10 ⁻⁴	1.85	8.62 10 ⁻⁴	2.97

Como se puede observar, en ambas situaciones las muestras se almacenaron congeladas en las mismas condiciones, pero poseían distintas formas de congelación previas. De ambas tablas se puede observar que las muestras que se deshidrataron en mayor grado durante la congelación, tienen menor capacidad para deshidratarse durante el almacenamiento congelado, probablemente debido al efecto limitante para la difusión provocado por el mayor espesor de la capa deshidratada superficial. Se puede deducir a partir de estos resultados que las condiciones de congelación influyen en el comportamiento posterior del alimento durante el almacenamiento.

Finalmente, se puede señalar que el modelo matemático resultó una herramienta interesante, tanto para conocer el comportamiento de los productos frente a distintas condiciones operativas, como también, para analizar la influencia de las condiciones bajo las cuales se lleva a cabo la congelación previa al almacenamiento congelado.

7.3 CONCLUSIONES

De acuerdo al análisis paramétrico realizado, si se desea obtener un producto que pierda poca humedad durante el proceso de congelación y almacenamiento congelado, se deben seleccionar las condiciones de operación que aseguren una pérdida de materia moderada. De la observación de los gráficos, se puede concluir que las variables de operación afectan de diferentes formas a las etapas de congelación y de almacenamiento. En los dos casos, el empleo de humedades relativas altas y bajas temperaturas de aire reducen la capacidad de deshidratación. Luego la elección de las condiciones que se llevarán a cabo en la práctica para cada situación se decidirá en función de la situación y de la capacidad que se tenga de cambiar las condiciones de operación del equipo. De todas formas, frente a una situación en la cual se debe decidir que condiciones implementar, el software constituye una herramienta que nos permite optimizar la operación.

CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES

8. CONCLUSIONES

En este trabajo de tesis se han estudiado en forma minuciosa los aspectos relacionados con las transferencias de materia y de energía asociadas a los procesos de congelación y almacenamiento congelado de alimentos.

En primer lugar, se realizó extensa una búsqueda bibliográfica respecto a nuestro tema de interés. En literatura se encontró información acerca de la resolución de la transferencia térmica en alimentos y de la transferencia de materia en liofilización. Ambos fenómenos acoplados no habían sido estudiados en profundidad hasta el momento.

Teniendo en cuenta la poca información existente acerca del tema, para el análisis del comportamiento de los alimentos durante la congelación y el almacenamiento congelado, se planteó un modelo matemático que incluye las ecuaciones diferenciales resultantes de los balances microscópicos acoplados de energía y de materia y las condiciones iniciales y de contorno necesarias para definir el sistema. El modelo presta especial atención a la aparición y crecimiento de la capa porosa deshidratada y a las características específicas de los fenómenos de transferencia de calor y materia en la misma.

El modelo matemático se resolvió exitosamente con el empleo de un método de diferencias finitas con grilla variable para el seguimiento de fronteras móviles. Luego la resolución del modelo se programó en Fortran 90.

A continuación, se procedió a la determinación de correlaciones para la evaluar los coeficientes de transferencia de materia, datos que se requieren para la resolución del modelo, pues el mismo emplea condiciones de contorno de tipo convectivas. Las experiencias se llevaron a cabo en un túnel congelador diseñado y fabricado en el CIDCA, específicamente para esta investigación. Las ecuaciones de regresión obtenidas son válidas para geometrías regulares y en el caso de cilindros, para dos posiciones frente a la corriente del aire: paralela y perpendicular a la dirección de flujo.

Para evaluar la pérdida de materia en alimentos, se realizaron determinaciones en el túnel congelador. Los experimentos permitieron conocer la respuesta de las

muestras en función del tiempo frente a distintas condiciones de operación (temperatura, velocidad y humedad relativa del aire).

Luego se validó el modelo matemático contra datos de literatura y datos experimentales obtenidos en nuestro laboratorio, utilizando los valores de coeficientes de transferencia y de propiedades térmicas especialmente determinados o seleccionados para este sistema. Se verificó que el modelo es válido en un rango de condiciones operativas, que cubren extensamente las condiciones que se observan en las prácticas habituales de congelación y almacenamiento congelado.

De acuerdo a los resultados presentados en el Capítulo 7, se puede concluir que se ha desarrollado un modelo matemático que nos permite conocer con precisión:

- Tiempos de congelación
- Pérdida de peso durante el enfriamiento, la congelación y el almacenamiento congelado
- Crecimiento de la capa porosa superficial
- Comportamiento de los productos frente a fluctuaciones en las condiciones operativas.

Con el empleo del software numérico se pueden seleccionar las condiciones de operación adecuadas para optimizar los procesos tecnológicos de forma de obtener un producto que pierda poca humedad, que conserve sus propiedades y sea de muy alta calidad.

APÉNDICE I

APÉNDICE I

El modelo matemático presentado en el Capítulo 2 se codificó en Fortran 90 y a continuación se presenta el listado del programa, las funciones y subrutinas que emplea el mismo para la realización de los cálculos:

```

C      *****
C      ESTE PROGRAMA VALE PARA LAS TRES GEOMETRIAS (IC = 0, 1, 2)
C      ESTE PROGRAMA CALCULA PERFILES DE TEMPERATURA Y CONCENTRACION
C      DURANTE EL ENFRIAMIENTO Y CONGELACION DE CARNE VACUNA
C      LAS UNIDADES UTILIZADAS SON DEL SI
C      ESPECIFICACION DE LAS VARIABLES DE DOBLE PRECISION
C      *****

IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
IMPLICIT REAL*8(K)

C      *****
C      DIMENSIONAMIENTO Y CREACION DE ESPACIOS COMUNES
C      *****

DIMENSION T(100), TANT(100)
DIMENSION PV(100), PVANT(100)
DIMENSION CV(100), CVANT(100)
DIMENSION CANT(100), C(100), YM(100)
DIMENSION AE(100), BE(100), CE(100), DE(100)
DIMENSION AEE(100), BEE(100), CEE(100), SUMCO(100)
DIMENSION AM(100), BM(100), CM(100), DM(100)
DIMENSION W(100)
COMMON/ALGOR/U(100)
COMMON/COEFI/ACOE(100), BCOEF(100), CCOEF(100), DCOEF(100)
COMMON/V1/L1
COMMON/UNO/YO, TC
COMMON/DOS/TA
COMMON/TRES/POROSI, TORTUO
COMMON/CUATRO/DFRES
COMMON/ALGOR2/Z(100)
COMMON/V2/LL
COMMON/SEIS/WAD

C      *****
C      FUNCION FORTRAN PARA CONVERTIR BASE SECA A HUMEDA
C      *****

FACTOR(DBS) = DBS/(1 + DBS)

```

```
C *****
C ESPECIFICACION DE UNIDADES DE ENTRADA Y SALIDA
C *****
```

```
OPEN(UNIT=1, FILE='')
```

```
OPEN(UNIT=2, FILE='')
```

```
OPEN(UNIT=3, FILE='')
```

```
OPEN(UNIT=4, FILE='')
```

```
C *****
C LECTURA E IMPRESION DE DATOS PARTICULARES DE LA MUESTRA
C *****
```

```
READ(1,401) ESP,YO
401 FORMAT(1X,F8.5,1X,F6.4)
WRITE(*,501) ESP,YO
WRITE(2,501) ESP,YO
WRITE(3,501) ESP,YO
WRITE(4,501) ESP,YO
```

```
501 FORMAT(1X,'ESP=',F8.5,'YO=',F6.4)
READ(1,402) TO,TF
402 FORMAT(2(1X,F8.4))
WRITE(*,502) TO,TF
WRITE(2,502) TO,TF
WRITE(3,502) TO,TF
WRITE(4,502) TO,TF
```

```
502 FORMAT(1X,'TO=',F8.4,'TF=',F8.4)
```

```
READ(1,603) PESO
603 FORMAT(F8.4)
WRITE(*,604) PESO
WRITE(2,604) PESO
WRITE(3,604) PESO
604 FORMAT(1X,'PESO INICIAL=',F8.4)
READ(1,703) DFRES
703 FORMAT(F9.4)
WRITE(*,704) DFRES
WRITE(2,704) DFRES
WRITE(3,704) DFRES
704 FORMAT(1X,'DENS FRESCO=',F19.4)
```

```
C *****
C LECTURA DE DATOS DEL AIRE DE ENFRIAMIENTO
C *****
```

```
READ(1,403) TA,VA,HR
403 FORMAT(3(1X,F8.4))
WRITE(*,503) TA,VA,HR
WRITE(2,503) TA,VA,HR
WRITE(3,503) TA,VA,HR
WRITE(4,503) TA,VA,HR
503 FORMAT(1X,'TA=',F8.4,'VA=',F8.4,'HR=',F8.4)
```

```
READ(1,608) FINL
608 FORMAT(F19.9)
```

```
C *****
C PROPIEDADES DEL AIRE DE ENFRIAMIENTO
C *****
C EN ESTA SECCION EL PM ESTA EN GR/MOL, RG EN (LT ATM/K MOL)
C P EN ATM
```

```
PMA=28.84/1000.
RG=8.314
PRESIA=1.01E5
TAK=TA+273.16
```

```
C *****
C PROPIEDADES DEL AIRE
C *****
```

```
DENSIA=(PRESIA*PMA)/(RG*TAK)
CPA=1025.75+0.07724*TAK+0.00001488*TAK**2-5713500/(TAK**2)
CONDA=(0.002646*TAK**1.5)/(TAK+245.4*10**(-12/TAK))
VISCA=(1.458E-6*TAK**1.5)/(TAK+110.4)
```

```
C *****
C PROPIEDADES ESTRUCTURALES DE LA CARNE SECA
C *****
```

```
POROSI=YO
TORTUO=1.5
```

```
C *****
C TEMPERATURA DE CONGELACION FRACCION DE AGUA CONGELABLE
C *****
```

```
TC = (1.-YO)/(0.06908-0.4393*YO)
```

```
WRITE(*,908) TC
908 FORMAT(1X,'TC=',F19.9)
```

```
FRACCI=0.18662*(1.-YO)
FRACON=1.-FRACCI
```

```
C *****
C CALOR DE SUBLIMACION Y DE VAPORIZACION
C *****
```

```
CSUB=2833.8E3
DELTHV=2.4E6
```

```
C *****
C LAS PROPIEDADES VARIABLES DE LA CARNE FRESCA, LA CARNE CONGELADA
C LA CARNE SECA( MATRIZ + VAPOR ) SE ENCUENTRAN EN SUBROUTINAS
C *****
```

```
C CALCULO DE LA PERDIDA DE PESO
C PP1 ES LA PERDIDA DE AGUA REFRIGERACION
C PP2 ES LA PERDIDA DE AGUA CONGELACION
C PPT ES LA PERDIDA DE PESOTOTAL
```

```

PP1=0.
PP2=0.
PPT=0.

SUIM=0.0
SUPA=0.0
EVAP=0.0
CLAVE=1

DENSO=DENSCF(TO)
WCERO = YO/(1. - YO)

PVAS=PSAT(TA)
PVA=PVAS*HR
PM=18./1000.
CVA=PVA*PM/(RG*TAK)

WRITE(*,504) CVA
504  FORMAT(1X,'CVA=',F19.9)
WRITE(*,505) PVA
505  FORMAT(1X,'PVA=',F10.5)

PS=PSAT(TO)
CSAIRE=PS*PM/(RG*TAK)

C      *****
C  DIFERENCIA DE CONCENTRACIONES DE VAPOR CARACTERISTICA
C  DE LA PELICULA DE AIRE
C      *****

DIFCAI = CSAIRE - CVA

AW=0.99
PVSUP=AW*PS

C      *****
C  HUMEDAD DECIMAL BASE SECA (DE ISOTERMA) EN EQUILIBRIO CON EL AIRE
C      *****

WEQUI = 0.119546*(HR/(1-HR))**0.5194

CCERO = DENSO*FACTOR(WCERO)
CEQUI = DENSO*FACTOR(WEQUI)

TMEDIA=TO
YOMED=YO
CMEDIA=CCERO

C      *****
C  DIFERENCIA DE CONCENTRACIONES CARACTERISTICA DE AGUA
C  A TRAVES DE LA PELICULA EXPRESADA COMO MEDIO SOLIDO EQUIVALENTE
C      *****

```

```

DIFCM = CCERO - CEQUI

WRITE(*,507)
507 FORMAT(1X,'INGRESE EL CODIGO DE GEOMETRIA, O PLACA, 1 CILINDRO, 2
1 ESFERA')
READ(*,404) IC
404 FORMAT(I1)

IF(IC.EQ.0) THEN

WRITE(*,540)
540 FORMAT(1X,'INGRESE LA LONGITUD DE LA PLACA EN MTS (F19.9)')
READ(*,420) PLALON
420 FORMAT(F19.9)

ELSE
PLALON=0
ENDIF

C *****
C CALCULO DE NUMEROS ADIMENSIONALES RELEVANTES
C *****

SEMIE=ESP/2.
PR=CPA*VISCA/CONDA
SC=VISCA/(DENSIA*DVA(TO))
RE1=DENSIA*VA*PLALON/VISCA
RE2=DENSIA*VA*ESP/VISCA

C *****
C CALCULO DE H Y K
C *****

IF(IC.EQ.0) THEN

AREA=1.
VOLUMEN=SEMIE

C CORREL DE TREYBAL PARA RE LE 5E5

RNU=0.664*PR**0.3333*RE1**0.5
H=RNU*CONDA/PLALON

C CORRELACION PARA K POR ANALOGIA

RNUAB=RNU*(PR**(-0.333333))/(SC**(-0.33333))
K1=RNUAB*DVA(TO)/PLALON
WRITE(*,545) K1
545 FORMAT(1X,'K1 POR ANALOGIA=',E10.5)

C CORRELACION DE OASIS

RNUAB=1.235*RE1**0.444*SC**0.3333
K2=RNUAB*DVA(TO)/PLALON

WRITE(*,973) K2
973 FORMAT(1X,'K2 POR OASIS=',E10.5)

```

```

        WRITE(*,643)
643  FORMAT('INGRESE 1 SI DESEA USAR K1, 2 SI DESEA EMPLEAR K2')
        READ(*,644) IEL1
644  FORMAT(I1)

        IF(IEI1.GT.1) GOTO 646
        K=K1
        GOTO 757
646  K=K2
757  CONTINUE

        ELSE IF(IC.EQ.1) THEN

        AREA=1.
        VOLUMEN=ESP/4.

C      CORRELACION DE MORGAN

        IF(RE2.GT.4E4) GOTO 971
        RNU=0.193*PR**0.33*RE2**0.618
        GOTO 972
971  RNU=0.027*PR**0.33*RE2**0.805

972  H=RNU*CONDA/ESP
        WRITE(*,93) H
93   FORMAT(1X,'H=',F10.5)

C      PARA EL CALCULO DE K CORRELACION DE AGUIRRE PUENTE

        IF(RE2.GT.3400) GOTO 974
        RNUAB=0.6863*RE2**0.461
        GOTO 975
974  RNUAB=0.0239*RE2**0.8638
975  K1=RNUAB*DVA(TO)/ESP

        WRITE(*,976) K1
976  FORMAT(1X,'K1 DE AGUIRRE PUENTE=',E10.3)

C      CORRELACION POR OASIS

        RNUAB=0.234*RE2**0.579*SC**0.3333
        K2=RNUAB*DVA(TO)/ESP

        WRITE(*,273) K2
273  FORMAT(1X,'K2 POR OASIS=',E10.5)

        WRITE(*,635)
635  FORMAT('INGRESE 1 SI DESEA USAR K1, 2 SI DESEA EMPLEAR K2')
        READ(*,684) IEL2
684  FORMAT(I1)

        IF(IEI2.GT.1) GOTO 606
        K=K1
        GOTO 707
606  K=K2
707  CONTINUE

        ELSE

```

```

AREA=1.
VOLUMEN=ESP/6.
C   CORRELACION PARA ESFERAS CLASICA

RNU=2+0.6*RE2**0.5*PR**0.3333
H=RNU*CONDA/ESP
WRITE(*,977) H
977 FORMAT(1X,'H=',F10.5)

C   K POR ANALOGIA

RNUAB=RNU*(PR**(-0.333333))/(SC**(-0.333333))
K1=RNUAB*DVA(TO)/ESP
WRITE(*,97) K1
97  FORMAT(1X,'K1 POR ANALOGIA=',E10.3)

C   CORRELACION POR OASIS

RNUAB=0.207*RE2**0.603*SC**0.3333
K2=RNUAB*DVA(TO)/ESP

WRITE(*,243) K2
243 FORMAT(1X,'K2 POR OASIS=',E10.5)

WRITE(*,835)
835 FORMAT('INGRESE 1 SI DESEA USAR K1, 2 SI DESEA EMPLEAR K2')
READ(*,694) IEL3
694 FORMAT(I1)

IF(IEL3.GT.1) GOTO 626
K=K1
GOTO 77
626 K=K2
77  CONTINUE

ENDIF

WRITE(4,610) H
610 FORMAT(1X,'H=',F19.9)

C   PARA LA TRANSFERENCIA A T POSITIVAS SE EMPLEA EL K
C   EQUIVALENTE, EN UNIDADES DE PRODUCTO

KCG = K*DIFCAI/DIFCM

C   *****
C   INICIALIZACION EN ETAPA DE ENFRIAMIENTO
C   LA POSICION CENTRAL ES I=1
C   SE LLAMARA R A LA POSICION DEL FRENTE DE SUBLIMACION
C   *****

RANT=SEMIE
R=SEMIE

C   *****
C   LECTURA DE DX, DT E INTERVALO DE IMPRESION DTIMP
C   *****

```

```

WRITE(*,511)
511 FORMAT(1X,'INGRESE EL NUMERO DE INCREMENTOS (I2)')
READ(*,406) NINC
406 FORMAT(I2)

WRITE(*,512)
512 FORMAT(1X,'INGRESE EL VALOR DE DT SEG. DESEADO (F10.5)')
READ(*,407) DT
407 FORMAT(F10.5)

WRITE(*,513)
513 FORMAT(1X,'INGRESE EL INTERVALO DE IMPRESION (F6.2)')
READ(*,408) DTIMP
408 FORMAT(F6.2)

L=NINC
L1=L+1
DX1=SEMIE/NINC
TIEIMP=DTIMP

WRITE(2,961) L1,DX1
WRITE(4,961) L1,DX1

961 FORMAT(1X,'L1=',I3,'DX1=',E19.9)

C *****
C INICIALIZACION DE VARIABLES
C *****

TIE=0

DO 10 I=1,L1
T(I)=TO
C(I) = CCERO
YM(I) = YO
10 CONTINUE

WRITE(2,514) TIE,(T(I),I=1,L1)
WRITE(*,514) TIE,(T(I),I=1,L1)
WRITE(3,514) TIE,(C(I),I=1,L1)
514 FORMAT(F10.5,50(F10.5))

IF(TO.LE.TC) GOTO 994

C *****
C SE GUARDAN LOS VALORES EN VARIABLES ANTERIORES
C *****

200 DO 20 I=1,L1
TANT(I)=T(I)
CANT(I)=C(I)
20 CONTINUE

```

```

C *****
C AVANCE DE TIEMPO
C *****

TIE=TIE+DT

C *****
C EN PRIMER LUGAR PARA LA TRANSFERENCIA A T POSITIVAS
C SE CALCULA MATERIA
C *****

I=1
FCC=1./DT
FCC1=(IC+1)*DIFT(TANT(I))/DX1**2
BM(1)=FCC+FCC1
CM(1)=-1.*FCC1
DM(1)=CANT(I+1)*FCC1+CANT(I)*(FCC-FCC1)

DO 36 I=2,L
FCC2=1./DT
FCC3=DIFT(TANT(I))/DX1**2
FCC4=DIFT(TANT(I-1))/(8*DX1**2)
FCC5=DIFT(TANT(I+1))/(8*DX1**2)
FCI5=DIFT(TANT(I))*IC/(4*(I-1)*DX1**2)
AM(I)=-1*FCC3/2.+FCC5-FCC4+FCI5
BM(I)=FCC2+FCC3
CM(I)=-1*FCC3/2.-FCC5+FCC4-FCI5
DGG1=CANT(I+1)*(FCC3/2.+FCC5-FCC4+FCI5)+CANT(I)*(FCC2-FCC3)
DM(I)=DGG1+CANT(I-1)*(-1*FCC5+FCC3/2.+FCC4-FCI5)
36 CONTINUE

I=L1
DGG9=KCG*2*DX1/DIFT(TANT(I))
FCC25=1./DT
FCC26=DIFT(TANT(I))/DX1**2
FCC27=DIFT(TANT(I-1))/(8*DX1**2)
FCC28=DIFT(TANT(I))/(8*DX1**2)
DIC10=DIFT(TANT(I))*IC/(4*(I-1)*DX1**2)
DG10=FCC26/2.+FCC28-FCC27+DIC10
AM(I)=-FCC26
BM(I)=FCC25+DGG9*DG10+FCC26
DGG11=CANT(I)*(-1*DGG9*DG10+FCC25-FCC26)
DGG12=CANT(I-1)*FCC26
DM(I)=DGG11+DGG12+DGG9*CEQUI*2*DG10

I=1
BCOEF(1)=BM(I)
CCOEF(1)=CM(I)
DCOEF(1)=DM(I)

DO 56 I=2,L
ACOE(I)=AM(I)
BCOEF(I)=BM(I)
CCOEF(I)=CM(I)
DCOEF(I)=DM(I)
56 CONTINUE

I=L1
ACOE(I)=AM(I)

```

```

BCOEF(I)=BM(I)
DCOEF(I)=DM(I)

CALL THOMAS

DO 109 I=1,L1
C(I)=U(I)
YM(I)=C(I)/DENSCF(TANT(I))
109 CONTINUE

C *****/
C LUEGO CALCULA LAS ECUACIONES DEL BCE DE ENERGIA
C *****

I=1
FCC=DENSCF(TANT(I))*CPCF(TANT(I))/DT
FCC1=(IC+1)*CONDCF(TANT(I))/DX1**2
BE(1)=FCC+FCC1
CE(1)=-1.*FCC1
DE(1)=TANT(I+1)*FCC1+TANT(I)*(FCC-FCC1)

DO 35 I=2,L
FCC2=DENSCF(TANT(I))*CPCF(TANT(I))/DT
FCC3=CONDCF(TANT(I))/DX1**2
FCC4=CONDCF(TANT(I-1))/(8*DX1**2)
FCC5=CONDCF(TANT(I+1))/(8*DX1**2)
FCI5=CONDCF(TANT(I))*IC/(4*(I-1)*DX1**2)
AE(I)=-1*FCC3/2.+FCC5-FCC4+FCI5
BE(I)=FCC2+FCC3
CE(I)=-1*FCC3/2.-FCC5+FCC4-FCI5
DGG1=TANT(I+1)*(FCC3/2.+FCC5-FCC4+FCI5)+TANT(I)*(FCC2-FCC3)
DE(I)=DGG1+TANT(I-1)*(-1*FCC5+FCC3/2.+FCC4-FCI5)

35 CONTINUE

I=L1
DGG9=H*2*DX1/CONDCF(TANT(I))
FCC25=DENSCF(TANT(I))*CPCF(TANT(I))/DT
FCC26=CONDCF(TANT(I))/DX1**2
FCC27=CONDCF(TANT(I-1))/(8*DX1**2)
FCC28=CONDCF(TANT(I))/(8*DX1**2)
DIC10=CONDCF(TANT(I))*IC/(4*(I-1)*DX1**2)
DG10=FCC26/2.+FCC28-FCC27+DIC10
DG178=DG10*DELTHV*2*DX1*KCG/CONDCF(TANT(I))
AE(I)=-FCC26
BE(I)=FCC25+DGG9*DG10+FCC26
DGG11=TANT(I)*(-1*DGG9*DG10+FCC25-FCC26)
DGG12=TANT(I-1)*FCC26
DGG14=DGG9*TA*2*DG10
DGG15=DG178*(CANT(I)+C(I))
DGG16=DG178*CEQUI*2.
DE(I)=DGG11+DGG12+DGG14-DGG15+DGG16

C *****
C SE CONVIERTEN LOS COEFICIENTES
C *****

I=1

```

```

BCOEF(1)=BE(I)
CCOEF(1)=CE(I)
DCOEF(1)=DE(I)

DO 40 I=2,L
ACOE(I)=AE(I)
BCOEF(I)=BE(I)
CCOEF(I)=CE(I)
DCOEF(I)=DE(I)
40 CONTINUE

I=L1
ACOE(I)=AE(I)
BCOEF(I)=BE(I)
DCOEF(I)=DE(I)

C *****
C SE CONVIERTEN LOS VALORES
C *****

CALL THOMAS

DO 50 I=1,L1
T(I)=U(I)
50 CONTINUE

C *****
C CALCULO DE PP1
C *****

EVAP= KCG*(C(L1)-CEQUI)
PP1= PP1+EVAP*DT*100*AREA/(DENSO*VOLUMEN)
PPT=PP1
PESOI=(1-PPT/100.)*PESO

C *****
C IMPRESION DE RESULTADOS
C *****

IF(TIE.LE.TIEIMP) GOTO 60
TIEM=TIE/60
WRITE(2,515) TIEM,(T(I),I=1,L1),TA
WRITE(*,515) TIEM,(T(I),I=1,L1),TA
515 FORMAT(F10.3,50(F19.9))
WRITE(3,523) TIEM,(C(I),I=1,L1),CEQUI,PP1,PESOI
WRITE(*,523) TIEM,(C(I),I=1,L1),CEQUI,PP1,PESOI
523 FORMAT(F10.5,50(F19.9),F10.5,F19.9,F19.9)

TIEIMP=TIEIMP+DTIMP

60 IF(T(L).GE.TC) GOTO 200

C *****
C CALCULO DE YOMEDIA
C *****

DO 12 I=1,L1
SUIM=SUIM+YM(I)
12 CONTINUE

```

```

YOMED=SUIM/L1

WRITE(3,518) TIEM,(YM(I),I=1,L1)
518  FORMAT(F10.3,50(F19.9))

WRITE(3,202) YOMED
WRITE(*,202) YOMED
202  FORMAT(1X,'YOMED=',F19.9)

WRITE(*,888)
888  FORMAT(1X,'INGRESE 1 SI QUIERE SEGUIR,0 SI QUIERE
1 PARAR EL CALCULO')
READ(*,889) ICCAL
889  FORMAT(I1)

IF(ICCAL.GT.0) THEN
GOTO 994
ELSE
GOTO 998
ENDIF

C *****
C COMIENZA LA SUBLIMACION
C *****

994  M=L1
L1=M+3
L=L1-1

N=M-1
NN=M+1
NM2=M-2

SDR=0.
SSUB=0.
SSUP=0.

PVE=PEQ(T(M))
PM=18./1000.
CVSS=CHPC(PVE,T(M))

YO=YOMED

WHF=1.1866-(0.1866/YO)+2.7013*(1-YO)/(YO*T(M))
W(M)=WHF*YO

FRAD=UP(TA,HR)

C *****
C CALCULO DEL PRIMER INCREMENTO POR SUBLIMACION
C *****

RN=RANT-K*(CVSS-CVA)*DT/(DENSCEF(T(M))*(W(M)-FRAD*(1-YO)))

```

```

DRT=R-RN
DR=R-RN
SDR=SDR+DR

C      *****
C      CALCULO DE PP2
C      *****

SSUB=SSUB+DENSCF(T(M))*(W(M)-FRAD*(1-YO))*DR/DT
SSUP=K*(CVSS-CVA)

PP2=PP2+SSUP*DT*100*AREA/(DENSCF(TO)*VOLUMEN)
PPT=PP1+PP2
PESOI=PESO*(1-PPT/100.)

C      *****
C      DEFINE NUEVOS INTERVALOS DX1, DX2 Y DX4
C      *****

IF(DRT.GT.DX1) THEN
IHM=DR/DX1
M=M-IHM
DX1=DX1
DX2ANT=DX2
DX2=DX1-(DR-IHM*DX1)
DX4ANT=DX4
DX4=DRT/3.
ELSE
DX1=DX1
DX2=DX1-DR
DX4=DRT/3.
ENDIF

C      *****
C      GUARDO LAS VARIABLES EN EL TIEMPO ANTERIOR
C      *****

WRITE(4,516)
WRITE(3,516)
516  FORMAT(1X,'ESTE ES EL PERFIL AL FINAL DEL ENFRIAMIENTO')
WRITE(3,517) RN,DX1,DX2,DX4
WRITE(4,517) RN,DX1,DX2,DX4

517  FORMAT(1X,'RN1=',F19.9,'DX1=',F10.5,'DX2=',F17.9,'DX4=',F17.9)
WRITE(3,51) W(M)
51   FORMAT(1X,'WH=',E10.5)
WRITE(3,519) SDR
519  FORMAT(1X,'SDR=',F15.9)
WRITE(3,520) SSUB
520  FORMAT(1X,'SSUB=',E16.8)
WRITE(3,521) SSUP
521  FORMAT(1X,'SSUP=',E16.8)

210  DO 70 I=1,N
TANT(I)=T(I)
70   CONTINUE

```

```

I=M
TANT(I)=T(I)
PVANT(I)=PEQ(TANT(I))
CVANT(I)=CHPC(PVANT(I),TANT(I))

DO 75 I=NN,L1
TANT(I)=T(M)
CVANT(I)=CVANT(M)
75 CONTINUE

TIEM=TIE/60
WRITE(2,905)
905 FORMAT(1X,'ESTE ES EL PERFIL AL FINAL DEL ENFRIAMIENTO')
WRITE(*,522) TIEM,(T(I),I=1,L1),TA
WRITE(2,522) TIEM,(T(I),I=1,L1),TA
522 FORMAT(F10.5,50(F10.5))
WRITE(3,233) TIEM,(CVANT(I),I=M,L1),CVA
233 FORMAT(F10.5,5(F10.5),F10.5)

C *****
C AVANCE DE TIEMPO
C *****

220 TIE=TIE+DT

C *****
C CALCULO DEL PERFIL DE TEMPERATURA AL TIEMPO POSTERIOR
C *****

IF(T(1).LE.TA) GOTO 95

I=1
FC=DENSCF(TANT(I))*CPCF(TANT(I))/DT
FC1=(IC+1)*CONDCF(TANT(I))/DX1**2
BE(1)=FC+FC1
CE(1)=-1.*FC1
DE(1)=TANT(I+1)*FC1+TANT(I)*(FC-FC1)

BEE(1)=(BE(1)-FC)*DT/(DENSCF(TANT(I))*CPCF(TANT(I)))
CEE(1)=CE(1)*DT/(DENSCF(TANT(I))*CPCF(TANT(I)))
SUMCO(1)=ABS(CEE(1))

DO 80 I=2,M-2
FC2=DENSCF(TANT(I))*CPCF(TANT(I))/DT
FC3=CONDCF(TANT(I))/DX1**2
FC4=CONDCF(TANT(I-1))/(8*DX1**2)
FC5=CONDCF(TANT(I+1))/(8*DX1**2)
FCI55=IC*CONDCF(TANT(I))/(4*(I-1)*DX1**2)
AE(I)=-1*FC3/2.+FC5-FC4+FCI55
BE(I)=FC2+FC3
CE(I)=-1*FC3/2.-FC5+FC4-FCI55
DG1=TANT(I+1)*(FC3/2.+FC5-FC4+FCI55)+TANT(I)*(FC2-FC3)
DE(I)=DG1 + TANT(I-1)*(-1*FC5+FC3/2.+FC4-FCI55)

AEE(I)=AE(I)*DT/(DENSCF(TANT(I))*CPCF(TANT(I)))
BEE(I)=(BE(I)-FC2)*DT/(DENSCF(TANT(I))*CPCF(TANT(I)))
CEE(I)=CE(I)*DT/(DENSCF(TANT(I))*CPCF(TANT(I)))

```

SUMCO(I) = ABS(AEE(I)) + ABS(CEE(I))

80 CONTINUE

I=M-1

FC6=CONDCF(TANT(I)) / ((DX1**2+DX2**2) * (DX1+DX2))

FC7=CONDCF(TANT(I+1)) / (2 * (DX1+DX2)**2)

FC8=CONDCF(TANT(I-1)) / (2 * (DX1+DX2)**2)

FC9=DENSCF(TANT(I)) * CPCF(TANT(I)) / DT

FC10=CONDCF(TANT(I)) / (DX1**2+DX2**2)

FCI10=IC*CONDCF(TANT(I)) / ((I-1) * DX1**2 * (DX1+DX2))

AE(I) = FC7 - FC8 - FC6 * DX2**2 + FCI10

BE(I) = FC9 + FC10 * 2

CE(I) = -FC6 * DX1**2 - FC7 + FC8 - FCI10

DG2 = TANT(I+1) * (FCI10 + FC6 * DX1**2 + FC7 - FC8) + TANT(I) * (FC9 - FC10 * 2)

DG3 = TANT(I-1) * (FC6 * DX2**2 - FC7 + FC8 - FCI10)

DE(I) = DG2 + DG3

AEE(I) = AE(I) * DT / (DENSCF(TANT(I)) * CPCF(TANT(I)))

BEE(I) = (BE(I) - FC9) * DT / (DENSCF(TANT(I)) * CPCF(TANT(I)))

CEE(I) = CE(I) * DT / (DENSCF(TANT(I)) * CPCF(TANT(I)))

SUMCO(I) = ABS(AEE(I)) + ABS(CEE(I))

I=M

SUBLI = DENSCF(TANT(I)) * (W(M) - FRAD * (1 - YO))

FG1 = CONDCS(TANT(I)) * DX2 / (CONDCF(TANT(I)) * DX4)

FG2 = CSUB * SUBLI * DR * DX2 / (DT * CONDCF(TANT(I)))

FC11 = DENSCF(TANT(I)) * CPCF(TANT(I)) / DT

FC12 = CONDCF(TANT(I)) / DX2**2

FC14 = CONDCF(TANT(I-1)) / (8 * DX2**2)

FC15 = CONDCF(TANT(I+1)) / (8 * DX2**2)

FCI15 = IC * CONDCF(TANT(I)) / (4 * (I-1) * DX2**2)

AE(I) = -FC12/2. + FC15 - FC14 + FCI15

BE(I) = FC11 + FC12/2. - FC15 + FC14 - FCI15

DGF1 = TANT(I) * (FC11 - FC12/2. + FC15 - FC14 + FCI15)

DGF2 = TANT(I-1) * (FC12/2. + FC14 - FC15 - FCI15)

DGF3 = FG1 * (FC12 - 2 * FC14 + 2 * FC15 + 2 * FCI15) * (TANT(I+1) - TANT(I))

DE(I) = DGF1 + DGF2 + DGF3 + FG2 * (-FC12 - 2 * FC15 + 2 * FC14 - 2 * FCI15)

CE(I) = 0.

DGF4 = (-FC12/2. - FC14 + FC15 + FCI15) * DT / (DENSCF(TANT(I)) * CPCF(TANT(I)))

DGFF = FC12

DGFFF = -FC12/2 + FC14 - FC15 - FCI15

DGF5 = (DGFF + (1 - FG1) * DGFFF) * DT / (DENSCF(TANT(I)) * CPCF(TANT(I)))

DGF6 = FG1 * DGFFF * DT / (DENSCF(TANT(I)) * CPCF(TANT(I)))

SUMCO(I) = ABS(DGF4) + ABS(DGF6)

DO 85 I=M+1, L1-1

FC211 = DENSCS(TANT(I)) * CPCS(TANT(I)) / DT

FC212 = CONDCS(TANT(I)) / DX4**2

FC213 = CONDCS(TANT(I-1)) / (8 * DX4**2)

FC214 = CONDCS(TANT(I+1)) / (8 * DX4**2)

FCI14 = IC * CONDCS(TANT(I)) / (4 * (I-1) * DX4**2)

AE(I) = -1 * FC212/2. + FC214 - FC213 + FCI14

BE(I) = FC211 + FC212

CE(I) = -1 * FC212/2. - FC214 + FC213 - FCI14

DG18 = TANT(I+1) * (FC212/2. + FC214 - FC213 + FCI14) + TANT(I) * (FC211 - FC212)

DE(I) = DG18 + TANT(I-1) * (-1 * FC214 + FC212/2. + FC213 - FCI14)

AEE(I) = AE(I) * DT / (DENSCS(TANT(I)) * CPCS(TANT(I)))

BEE(I) = (BE(I) - FC211) * DT / (DENSCS(TANT(I)) * CPCS(TANT(I)))

CEE(I)=CE(I)*DT/(DENSCS(TANT(I))*CPCS(TANT(I)))
 SUMCO(I)=ABS(AEE(I))+ABS(CEE(I))

85 CONTINUE

I=L1
 TFICC=TANT(I)-H*DX1*(TANT(I)-TA)/CONDCS(TANT(I))
 DG9=H*DX4**2/CONDCS(TANT(I))
 DG10=H*TA**2*DX4/CONDCS(TANT(I))
 FC25=DENSCS(TANT(I))*CPCS(TANT(I))/DT
 FC26=CONDCS(TANT(I))/DX4**2
 FC27=CONDCS(TANT(I-1))/(8*DX4**2)
 FC28=CONDCS(TANT(I))/(8*DX4**2)
 FCI9=IC*CONDCS(TANT(I))/(4*(I-1)*DX4**2)
 AE(I)=-FC26
 BE(I)=FC25+DG9*(FC26/2.+FC28-FC27+FCI9)+FC26
 DG11=TANT(I)*(DG9*(FC27-FC26/2.-FC28-FCI9)+FC25-FC26)
 DG12=TANT(I-1)*FC26
 DE(I)=DG11+DG12+DG10*(FC26+2*FC28-2*FC27+2*FCI9)

 AEE(I)=AE(I)*DT/(DENSCS(TANT(I))*CPCS(TANT(I)))
 BEE(I)=(BE(I)-FC25)*DT/(DENSCS(TANT(I))*CPCS(TANT(I)))
 SUMCO(I)=ABS(AEE(I))

C *****
 C CONVERSION
 C *****

I=1
 BCOEF(1)=BE(I)
 CCOEF(1)=CE(I)
 DCOEF(1)=DE(I)

DO 90 I=2,L1-1
 ACOEF(I)=AE(I)
 BCOEF(I)=BE(I)
 CCOEF(I)=CE(I)
 DCOEF(I)=DE(I)

90 CONTINUE

I=L1
 ACOEF(I)=AE(I)
 BCOEF(I)=BE(I)
 DCOEF(I)=DE(I)

CALL THOMAS

C *****
 C SE CONVIERTEN LOS VALORES
 C *****

DO 95 I=1,L1
 T(I)=U(I)

95 CONTINUE

C *****
 C CALCULO DEL PERFIL DE CONCENTRACION AL TIEMPO POSTERIOR
 C *****

```

DO 110 I=1,M
IF (T(I).LE.TC) THEN
W(I)=(1.1866 - 0.1866/YO + 2.7013*(1-YO)/(YO*T(I)))*YO
ENDIF
110 CONTINUE

I=M
PV(I)=PEQ(T(I))
CV(I)=CHPC(PV(I),T(I))

I=M+1
FM61=DIFVS(TANT(I))*DT/(POROSI*2*DX4**2)
FM62=DIFVS(TANT(I-1))*DT/(POROSI*8*DX4**2)
FM63=DIFVS(TANT(I+1))*DT/(POROSI*8*DX4**2)
FMI63=IC*DIFVS(TANT(I))*DT/(4*(I-1)*POROSI*DX4**2)
AMAT=-FM61+FM63-FM62+FMI63
BM(I)=1+2*FM61
CM(I)=-FM61-FM63+FM62-FMI63
DM11=CVANT(I+1)*(FM61+FM63-FM62+FMI63)+CVANT(I)*(1-2*FM61)
DM(I)=DM11+CVANT(I-1)*(FM61+FM62-FM63-FMI63)-CV(M)*AMAT

I=M+2
FM64=DIFVS(TANT(I))*DT/(POROSI*2*DX4**2)
FM65=DIFVS(TANT(I-1))*DT/(POROSI*8*DX4**2)
FM66=DIFVS(TANT(I+1))*DT/(POROSI*8*DX4**2)
FMI6=DIFVS(TANT(I))*IC*DT/(POROSI*4*(I-1)*DX4**2)
AM(I)=-FM64+FM66-FM65+FMI6
BM(I)=1+2*FM64
CM(I)=-FM64-FM66+FM65 -FMI6
DM12=CVANT(I+1)*(FM64+FM66-FM65+FMI6)+CVANT(I)*(1-2*FM64)
DM(I)=DM12+CVANT(I-1)*(FM64+FM65-FM66-FMI6)

I=L1
FM67=DIFVS(TANT(I))*DT/(POROSI*2*DX4**2)
FM68=DIFVS(TANT(I-1))*DT/(POROSI*8*DX4**2)
FM69=DIFVS(TANT(I))*DT/(POROSI*8*DX4**2)
FM70=K*DX4/DIFVS(TANT(I))
FMI7=IC*DIFVS(TANT(I))*DT/(POROSI*4*(I-1)*DX4**2)
AM(I)=-FM67+FM69-FM68+FMI7
BM(I)=(1-FM70)*(-FM67-FM69+FM68-FMI7)+1+2*FM67
DM14=CVANT(I-1)*(FM67+FM68-FM69-FMI7)
DM15=CVANT(I)*((1-FM70)*(FM67+FM69-FM68+FMI7)+1-2*FM67)
DM16=CVA*FM70*2*(FM67-FM68+FM69+FMI7)
DM(I)=DM14+DM15+DM16

C *****
C CONVERSION
C *****

I=M+1
BCOEF(1)=BM(I)
CCOEF(1)=CM(I)
DCOEF(1)=DM(I)

I=M+2
ACOEF(2)=AM(I)
BCOEF(2)=BM(I)
CCOEF(2)=CM(I)
DCOEF(2)=DM(I)

```

```

I=L1
ACOE(3)=AM(I)
BCOE(3)=BM(I)
DCOE(3)=DM(I)

LL=3
CALL GAUSS

C *****
C SE CONVIERTEN LOS VALORES
C *****

DO 115 I=1,3
CV(M+I)=Z(I)
115 CONTINUE

C *****
C CALCULO DE ESPESOR DE LA ZONA SECA
C *****

RANT=RN
GEO=DENSCF(T(M))*(W(M)-FRAD*(1-YO))*DRT
RN=RANT+DIFVS(T(M))*(CV(L1)-CV(M))*DT/GEO

DRT=R-RN
DR=RANT-RN
SDR=SDR+DR

SSUB=SSUB+DENSCF(T(M))*(W(M)-FRAD*(1-YO))*DR/DT
SSUP=K*(CV(L1)-CVA)
SSUP1=DENSCF(T(M))*(W(M)-FRAD*(1-YO))*DR/DT
SSUP2=DIFVS(T(M))*(CV(M)-CV(L1))/DRT

C *****
C CALCULO DE LA PERDIDA DE PESO
C *****

PP2=PP2+SSUP*DT*100*AREA/(DENSCF(TO)*VOLUMEN)
PPT=PP1+PP2
PESOI=PESO*(1-PPT/100.)

C *****
C SE MODIFICAN DE ACUERDO A LA NUEVA GRILLA
C *****

IF(DR.GT.(DX1+DX2)) THEN
DIFERR=DR-DX2
IH=DIFERR/DX1
MANT=M
M=M-1-IH
DX1=DX1
DX2ANT=DX2
DX2=DX1-(DR-DX2ANT-IH*DX1)
DX4ANT=DX4
DX4=DRT/3.
L1=M+3
ELSE IF(DR.GT.DX2) THEN
MANT=M

```

```

M=M-1
DX1=DX1
DX2ANT=DX2
DX2=DX1-(DR-DX2ANT)
DX4ANT=DX4
DX4=DRT/3.
L1=M+3
ELSE IF(DR.LT.DX2) THEN
MANT=M
DX2ANT=DX2
DX2=DX2ANT-DR
DX4ANT=DX4
DX4=DRT/3.
L1=M+3
ELSE IF(DR.EQ.DX2) THEN
MANT=M
M=M-1
L1=M+3
DX2ANT=DX2
DX2=DX1
DX4ANT=DX4
DX4=DRT/3.
ENDIF

C *****
C CONTROL DE TAMAÑOS DE INCREMENTOS
C *****

IF(DX2.LT.1E-5) THEN
WRITE(*,197)
WRITE(2,197)
WRITE(3,197)
WRITE(4,197)
197 FORMAT(1X,'DX2<1e-5')
MANT=M
M=M-1
DX2ANT=DX2
DX2=DX1+DX2ANT
DX4=DX4
L1=M+3
ENDIF

C *****
C IMPRESION DE RESULTADOS
C *****

IF(TIE.LE.TIEIMP) GOTO 230
TIEM=TIEM/60
WRITE(*,525) TIEM,(T(I),I=1,L1),TA
WRITE(2,525) TIEM,(T(I),I=1,L1),TA
525 FORMAT(F10.3,50(F10.5),F10.5)

WRITE(*,526) TIEM,(CV(I),I=M,L1),CVA,PP1,PP2,PPT,PESOI
526 FORMAT(F10.3,5(F10.5),F10.5,4(F19.9))

TIEIMP=TIEIMP+DTIMP

```

```

C      *****
C      VERIFICA SI LLEGO AL FINAL DE LA CONGELACION
C      *****

230  IF(TIE.GT.FINL) GOTO 250

C      *****
C      CONTROL DE LOS PUNTOS EN LA GRILLA
C      *****

      IF (M.LT.MANT) THEN

          DO 125 I=1,M-1
          TANT(I)=T(I)
125   CONTINUE

          I=M
          TANT(I)=T(I+1)
          CVANT(I)=CV(I+1)
          PVANT(I)=PV(I+1)

          DO 129 I=M+1,L1
          TANT(I)=T(I+1)
          CVANT(I)=CV(I+1)
129   CONTINUE

          ELSE

          DO 120 I=1,M-1
          TANT(I)=T(I)

120   CONTINUE

          I=M
          TANT(I)=T(I)
          CVANT(I)=CV(I)
          PVANT(I)=PV(I)

          DO 195 I=M+1,L1
          TANT(I)=T(I)
          CVANT(I)=CV(I)
195   CONTINUE
          ENDIF

          GOTO 220

250  TIEM=TIE/60.
      WRITE(*,525)TIEM,(T(I),I=1,L1)
      WRITE(2,525)TIEM,(T(I),I=1,L1)
      WRITE(*,527) TIEM,PPT
      WRITE(2,527) TIEM,PPT
527  FORMAT(1X,'EL TIEMPO DE CONG ES:',F10.5,'MINUTOS','PPT=',F19.9)

      WRITE(3,508) TIEM,(CV(I),I=M,L1),CVA,PP1,PP2,PPT,PESOI

508  FORMAT(F10.3,5(F10.5),F10.5,4(F19.9))

```

```

WRITE(3,529) RN,DX1,DX2,DX4,SDR
529  FORMAT(1X,'RN,DX1,DX2,DX4,SDR',5(F19.9))

998  STOP
     END

```

SUBROUTINAS DE CÁLCULO

Coefficiente de difusión de agua líquida en el interior del alimento:

```

FUNCTION DIFT(T)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
IMPLICIT REAL*8(K)
COMMON/UNO/YO,TC
IF(T.GE.TC) THEN
DIFT=8.5E-8*DEXP(-2300./(T+273.16))
ELSE
DIFT=1.075E-5*DEXP(-3282.8/(T+273.16))
ENDIF
RETURN
END

```

Presión de vapor del agua a temperaturas positivas y negativas:

```

FUNCTION PSAT(T)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
IMPLICIT REAL*8(K)
IF(T.GE.0.0) THEN
A=72.73974
B=-8.2
C=0.0057113
D=-7235.4261
P=A+B*LOG(T+273.16)+C*(T+273.16)+D/(T+273.16)
PSAT=EXP(P)*100
ELSE
TK=T+273.16
PSAT=133.329*EXP(23.986059-6139.9094/TK)
ENDIF
RETURN
END

```

Presión de vapor de equilibrio a temperaturas negativas:

```

FUNCTION PEQ(T)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
IMPLICIT REAL*8(K)
TK=T+273.16
PEQ=133.329*EXP(23.986059-6139.9094/TK)
RETURN
END

```

Fracción de hielo adsorbida:

```

FUNCTION UP(T,HR)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
IMPLICIT REAL*8(K)
A1=-2.7349-0.01513*T-5.063E-4*T**2-4.083E-6*T**3
A2=5.089E-2+2.269E-3*T+8.285E-5*T**2+9.172E-7*T**3
A3=-9.442E-4-7.085E-5*T-2.673E-6*T**2-3.206E-8*T**3
A4=7.323E-6+6.188E-7*T+2.337E-8*T**2+2.9E-10*T**3
HREL=HR*100
UP=EXP(A1+A2*HREL+A3*HREL**2+A4*HREL**3)
RETURN
END

```

Coefficiente de difusión de agua en carne:

```

FUNCTION DIFAC(T)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
IMPLICIT REAL*8(K)
COMMON/UNO/YO,TC
IF(T.GE.TC) THEN
DIFAC=8.5E-8*DEXP(-2300./(T+273.16))
ELSE
DIFAC=1.075E-5*DEXP(-3282.8/(T+273.16))
ENDIF
RETURN
END

```

Densidad del hielo:

```

FUNCTION DENSHI(T)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
IMPLICIT REAL*8(K)
DENSHI=961.525-0.2428*(T+273.16)+0.0008*(T+273.16)**2
RETURN
END

```

Conductividad del producto fresco y congelado:

```

FUNCTION CONDCF(T)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
IMPLICIT REAL*8(K)
COMMON/UNO/YO,TC
IF(T.GE.TC) THEN
CONDCF=0.0866+0.501*YO+5.0521E-4*YO*T
ELSE
CONDCF=0.378+1.376*YO+0.93/T
ENDIF
RETURN
END

```

Densidad del producto fresco y congelado:

```

FUNCTION DENS CF(T)
IMPLICIT REAL*8 (A-H, O-Z)
IMPLICIT REAL*8 (K)
COMMON/UNO/YO, TC
COMMON/CUATRO/DFRES
IF (T.GE.TC) THEN
DENS CF=DFRES
ELSE
DENS CF=DFRES/(0.98221+0.1131*YO+0.25746*(1-YO)*T**(-1))
ENDIF
RETURN
END

```

Calor específico del producto fresco y congelado:

```

FUNCTION CPCF(T)
IMPLICIT REAL*8 (A-H, O-Z)
IMPLICIT REAL*8 (K)
COMMON/UNO/YO, TC
IF (T.GE.TC) THEN
CPCF=1448*(1-YO)+4187*YO
ELSE
CPCF=3874-2534*YO+902893*(1-YO)*T**(-2)
ENDIF
RETURN
END

```

Coefficiente de difusión del vapor de agua en aire:

```

FUNCTION DVA(TO)
IMPLICIT REAL*8 (A-H, O-Z)
IMPLICIT REAL*8 (K)
COMMON/DOS/TA
TMEDIA=(TO+TA)/2.
TMK=TMEDIA+273.5
GAMMA=1.78917-2.1314348E-3*TMK
DVA=5.6845525E-9*(TMK**1.5)/GAMMA
RETURN
END

```

```

FUNCTION DVAS(T)
IMPLICIT REAL*8 (A-H, O-Z)
IMPLICIT REAL*8 (K)
TK=T+273.5
GAMMA=1.78917-2.1314348E-3*TK
DVAS=5.6845525E-9*(TK**1.5)/GAMMA
RETURN
END

```

Coefficiente de difusión efectivo del vapor de agua:

```

FUNCTION DIFVS(T)
IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
IMPLICIT REAL*8 (K)
COMMON/TRES/POROSI,TORTUO
DIFVS=DVAS(T)*POROSI/TORTUO
RETURN
END

```

Algoritmo de Thomas:

```

SUBROUTINE THOMAS
IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
IMPLICIT REAL*8 (K)
DIMENSION BETA(100),TAU(100)
COMMON/COEFI/A(100),B(100),C(100),D(100)
COMMON/ALGOR/U(100)
COMMON/V1/L1
BETA(1)=B(1)
TAU(1)=D(1)/B(1)
DO 10 I=2,L1
BETA(I)=B(I)-(A(I)*C(I-1))/BETA(I-1)
TAU(I)=(D(I)-A(I)*TAU(I-1))/BETA(I)
10 CONTINUE
U(L1)=TAU(L1)
DO 20 INDEX=1,L1-1
I=L1-INDEX
U(I)=TAU(I)-(C(I)*U(I+1))/BETA(I)
20 CONTINUE
RETURN
END

```

Densidad del producto deshidratado:

```

FUNCTION DENSCS(T)
IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
IMPLICIT REAL*8 (K)
COMMON/TRES/POROSI,TORTUO
DENSCS=890.
RETURN
END

```

Calor específico del producto deshidratado:

```

FUNCTION CPCS(T)
IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
IMPLICIT REAL*8 (K)
COMMON/TRES/POROSI,TORTUO
CPCS=795.
RETURN
END

```

Conductividad del producto deshidratado:

```

FUNCTION CONDCS(T)
IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
IMPLICIT REAL*8(K)
COMMON/TRES/POROSI,TORTUO
COMMON/SEIS/WAD
CONDCS=0.07
RETURN
END

```

Cálculo de la concentración de vapor de agua con el empleo de la ley de los gases ideales:

```

FUNCTION CHPC(P,T)
IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
IMPLICIT REAL*8(K)
COMMON/TRES/POROSI,TORTUO
COMMON/DOS/TA
RG=8.314
PM=18./1000.
TK=T+273.16
CHPC=P*PM/(RG*TK)
RETURN
END

```

Método de Eliminación de Gauss:

```

SUBROUTINE GAUSS
IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
IMPLICIT REAL*8(K)
COMMON/COEFI/A(100),B(100),C(100),D(100)
COMMON/ALGOR2/Z(100)
COMMON/V2/LL
DIMENSION BP(100),CP(100),DP(100)
I=1
BP(I)=B(I)
CP(I)=C(I)
DP(I)=D(I)
M=LL-1
DO 30 I=2,M
FAC=BP(I-1)/A(I)
BP(I)=B(I)*FAC-CP(I-1)
CP(I)=C(I)*FAC
DP(I)=D(I)*FAC-DP(I-1)
30 CONTINUE
I=LL
FAC=BP(I-1)/A(I)
BP(I)=B(I)*FAC-CP(I-1)
DP(I)=D(I)*FAC-DP(I-1)
Z(I)=DP(I)/BP(I)
DO 40 I=1,LL-2
J=LL-I
Z(J)=(DP(J)-CP(J)*Z(J+1))/BP(J)
40 CONTINUE
I=1
Z(I)=(D(I)-C(I)*Z(I+1))/B(I)
RETURN
END

```

NOMENCLATURA

NOMENCLATURA

A	Area, m ²
A _n	Matriz de coeficientes, ecuación (2.71)
A _{ws}	Actividad acuosa
b	Índice, posición de la superficie
Bi	Número de Biot, definido como (h L/k)
B _n	Matriz de coeficientes, ecuación (2.71)
C	Concentración molar, moles/m ³
C _n	Matriz de coeficientes, ecuación (2.71)
C _p	Calor específico, J/(kg °C)
D	Diámetro, m
D _{ef}	Coefficiente efectivo de difusión del vapor de agua, m ² /s
D _n	Matriz de coeficientes, ecuación (2.71)
D _w	Coefficiente de difusión del agua, m ² /s
E	Espesor, m o cm
ER	Error relativo, %
f _{ads}	Fracción adsorbida de hielo, (kg de hielo)/(kg de sólido seco)
GI	Índice geométrico
G _s	Flujo de materia por sublimación, ecuación (1.2)
h	Coefficiente de transferencia de energía, W/(m ² °C)
HR	Humedad relativa, %
i	Índice de posición
J	Flujo de materia (kg/m ² s)
j _m	Factor de Colburn, definido como (Sh Re ⁻¹ Sc ^{-1/3})
k	Conductividad térmica, W/(m°C)
k _m	Coefficiente de transferencia de materia (fuerza impulsora en unidades de vapor), m/s
k _m	Coefficiente de transferencia de materia (fuerza impulsora en unidades equivalentes de alimento), m/s
K _G	Coefficiente global de transferencia de materia, m/s
L	Semi espesor, m
L	Longitud para placas y cilindros, m
L _f	Calor latente de fusión, J/kg

L_s	Calor de sublimación del hielo, J/kg
L_{vap}	Calor de vaporización del agua líquida, J/kg
m	Índice, posición del frente de sublimación
M	Peso molecular
m_s	Masa sublimada por unidad de volumen, kg/m ³
n	Índice, tiempo
Nu	Número de Nusselt, definido como $(h L/k_a, h D/k_a)$
P	Presión, Pa
P_a	Presión del vapor de agua en el aire, Pa
PP	Pérdida de peso
$PP1$	Pérdida de peso durante la Etapa 1, (kg de agua)/(kg de alimento)
$PP2$	Pérdida de peso durante la Etapa 2, (kg de agua)/(kg de alimento)
Pr	Número de Prandtl, definido como $(Cp_a \mu_a/k_a)$
P_{sat}	Presión de vapor de saturación, Pa
Q_n	Matriz de coeficientes, ecuación (2.76)
R	Radio de Gerschgorin
R_g	Constante universal de los gases, 8.31 J/(mol K)
Re_D	Número de Reynolds, definido como $(\rho_a v D/\mu_a)$
Re_L	Número de Reynolds, definido como $(\rho_a v L/\mu_a)$
Sc	Número de Schmidt, definido como $(\mu_a/\rho_a D_{va-a})$
Sh	Número de Sherwood, definido como $(k_m L/D_{va-a}, k_m D/D_{va-a})$
t	Tiempo, s (o min)
T	Temperatura, °C
U	Temperatura o Concentración
v	Velocidad del aire, m/s
va	Velocidad del aire, m/s
V	Conductividad térmica o coeficiente de difusión
Vol	Volumen, m ³
w	Contenido de hielo, (kg de hielo)/(kg de alimento)
wbs	Contenido de humedad expresado en base seca.
x	Coordenada espacial, m
x_1	Posición del frente de sublimación móvil, m
Y_0	Contenido inicial de agua, (kg de agua)/(kg de alimento)

Δx	Incremento espacial constante, zona congelada, m
Δx_2	Incremento espacial variable, dentro de la zona congelada, m
Δx_4	Incremento espacial variable, dentro de la zona deshidratada, m
Δt	Incremento temporal, s

Símbolos Griegos

α	Difusividad térmica, m^2/s
β	Coefficiente de evaporación, ecuación (1.2)
ϵ	Porosidad
λ_i	Autovalor
μ	viscosidad, Pa s
μ_i	Autovalor
ρ	Densidad, kg/m^3
$\rho(C_n)$	Radio espectral
τ	Tortuosidad

Subíndices

a	Aire
bh	Búlbo húmedo
c	Congelación
d	Deshidratado
ef	Efectivo
equi	Equilibrio
exp	Experimental
ini	Inicial
if	Inicial de congelación
f	Congelado
final	Final
m	Materia
piel	Piel o envoltura

pred	Predicho
sat	Saturación
va	Vapor de agua
va-a	Vapor de agua en aire
vap	Evaporación
w	Agua

Supraíndices

f	Ficticio
---	----------

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allen M.B., Herrera I. y Pinder J.F. (1988). *Numerical modeling in science and engineering*. John Wiley and Sons, New York.
- Aguirre Puente J., Frémond M. y Comini, G. (1978). Freezing of soils-Physical study and mathematical models. *Int. J. Ref.*, 1, 99.
- Aguirre Puente J. y Sukhwai R.N. (1983). Sublimation of ice in frozen dispersed media. En *Proc. III Int. Offshore Mechanics and Arctic Eng. Symp.*, 3, 38.
- AOAC (1980). *Official methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemist*. Editado por AOAC, Washington.
- Aström S. (1972). Freezing equipment influence on weight losses. *Tiefkühl-praxis Int.*, 2, 14.
- Bazán H.C. y Mascheroni R.H. (1984). Heat transfer with simultaneous change of phase in freezing boned mutton. *Lat. Am. J. Heat Mass Transf.*, 8, 55.
- Berlin E., Kliman P.G. y Pallansh M.J. (1966). Surface areas and densities of freeze dried foods. *J. Agric. Food Chem.*, 14, 15.
- Bevilacqua A., Zaritzky N.E. y Calvelo A. (1979). Histological measurements of ice in frozen beef. *J. Food Technol.*, 14, 237.
- Bird R.B., Stewart W.E. y Lightfoot E.N. (1976). *Transport phenomena*. John Wiley and Sons, New York.
- Boeh-Ocansey O. (1988). Freeze-drying evaluation of external transfer coefficients. *J. Food Eng.*, 7, 127.
- Brebbia C.A. y Walker S. (1979). *Boundary Element techniques in engineering*. Butterworths, London.
- Bonacina C. y Comini G. (1971). On a numerical method for the solution of the unsteady state heat conduction equation with temperature dependent parameters. En *Proc. XIII Int. Cong. Ref.*, 2, 329.
- Bonacina C., Comini G., Fasano A. y Primicerio M. (1974). On the estimation of thermophysical properties in non-linear heat conduction problems. *Int. J. Heat Mass Transf.*, 17, 861.
- Brown, M.H. (1991). Microbiological aspects of frozen foods. *Food Frreezing: today and tomorrow*. W.B.Bald Ed., Springer-Verlag, London.

- Burfoot D. y Self K.P. (1989). Predicting the heating times of beef joints. *J. Food Eng.*, 9, 251.
- Burden R.L. y Faires J.D. (1998). *Análisis Numérico*. Int. Thompson Ed., New York.
- Burrows G. (1965). Evaporation in an evacuated container. *Vacuum*, 15, 389.
- Campañone L.A., Salvadori V.O. y Mascheroni R.H. (1998). A finite-difference method to solve coupled heat and mass balances with simultaneous surface dehydration during freezing. *Lat. Am. Appl. Res.*, 28, 83.
- Carman P.C. (1948). Molecular distillation and sublimation. *Trans. Faraday Soc.*, 44, 529.
- Clary B.L. y Nelson G.L. (1970). Determining heat transfer coefficients from ellipsoidal shapes. *Trans. ASAE*, 13, 309.
- Cleland A.C. y Earle R.L. (1977). A comparison of analytical and numerical methods for predicting the freezing times of foods. *J. Food Sci.*, 42, 1390.
- Cleland A.C. y Earle R.L. (1979). A comparison of analytical and numerical methods for predicting the freezing times of cylindrical and spherical foodstuffs. *J. Food Sci.*, 44, 958.
- Cleland A.C. y Earle R.L. (1984). Assessment of freezing time prediction methods. *J. Food Sci.*, 49, 1034.
- Cleland A.C. (1990). *Food refrigeration processes. Analysis, design and simulation*. Elsevier Applied Science Publishers Ltd, London.
- Cleland A.C. y Özilgen S. (1998). Thermal design calculations for food freezing equipment—past, present and future. *Int. J. Ref.*, 21, 359.
- Cleland D.J. (1985). Prediction of freezing and thawing times for foods. Ph.D. Thesis, Massey University, New Zeland.
- Cleland D.J., Cleland A.C., Earle R.L. y Byrne S.J. (1984). Prediction of freezing and thawing times for multi-dimensional shapes by numerical methods. *Int. J. Ref.*, 10, 32.
- Chumak I.G. y Sibiriakov P.V. (1988). Influencia de los parámetros del aire dentro de una cámara frigorífica en el contenido de humedad de la superficie de la carne durante la refrigeración (en ruso). *Izvestia vuzov, Pischevaia tejnologuia*, 2, 54.
- Comini G., Bonacina C. y Barina S. (1974). Thermal properties of foodstuffs. *Ref. Sci. Technol.*, 1974-3, 163.
- Crank J. y Nicolson P. (1947). A practical method for numerical integration of solutions of partial differential equations of heat conduction type. *Proc. Cam. Phil. Soc.*, 43, 50.
- Daudin J.D. y Swain M.V.L. (1990). Heat and mass transfer in chilling and storage of meat. *J. Food Eng.*, 12, 95.

- De Michelis A. y Calvelo A. (1982). Mathematical models for nonsymmetric freezing of beef. *J. Food Sci.*, 47, 1211.
- Ershov E.D., Kucukov E.Z. y Komarov I.A. (1975). Sublimación del hielo en medios dispersos (en ruso). M.G.U im. M.V. Lomonosova, Geologiceskii Fal., Kafedra Merzlotovedenija. Izdatel'stvo Moskovskogo Univ.
- Ershov E.D., Gurov V.V., Komarov I.A. y Kucukov E.Z. (1978). Etude expérimentale du transfert de chaleur et d'humidité lors de la sublimation et désublimation de l'eau dans le sols fins. En *Proc. III Int. Cong. Pergélisol*, 1, 168.
- Fennema O. y Berny L.A. (1974). Equilibrium vapour pressure and water activity of food at subfreezing temperature. En *Proc. IV Int. Cong. Food Sci. Technol.*, 2, 27.
- Flores E.S. y Mascheroni R.H. (1988). Determination of heat transfer coefficients for continuous belt freezers. *J. Food Sci.*, 0, 1.
- Fockens F.H. y Meffert H.F. (1972). Biophysical properties of horticultural products as related to loss of moisture during cooling down. *J. Sci. Food Agric.*, 23, 285.
- Forsythe G.E. y Wasow W.R. (1960). *Finite difference methods for partial differential equations*. John Wiley and Sons, New York.
- Glasstone S. (1976). *Tratado de Química Física*. Aguilar Ed., Madrid.
- Gros J.B., Dussap C.G. y González-Méndez N. (1984). Solute diffusivities in meat – a review. *Engineering and Food*. Elsevier Applied Science Publishers Ltd., London.
- Gruda Z. y Postolski (1985). *Tecnología de la congelación de los alimentos*. Ed. Acribia S.A., España.
- Harper J. (1962). Transport properties of gases in porous media at reduced pressures with reference to freeze-drying. *AIChE J.*, 8, 298.
- Iglesias H.A y Chirife J. (1982). *Handbook of food isotherms: water sorption parameters for food and food components*. Academic Press, New York.
- Joshi C. y Tao L.C. (1974). A numerical method for simulating the axisymmetrical freezing of food systems. *J. Food Sci.*, 39, 623.
- King C.J. (1971). *Freeze-drying of foods*. CRC Press, Londres.
- Kochs M., Körber Ch., Nunner B. y Heschel I. (1991). The influence of the freezing process on vapour transport during sublimation in vacuum-freeze-drying. *Int. J. Heat Mass Transf.*, 34, 2395.
- Kondjoyan A., Daudin J.D. y Bimbenet J.J. (1993). Heat and mass transfer coefficients at the surface of elliptical cylinders placed in a turbulent air flow. *J. Food Eng.*, 20, 339.

- Kramers H. y Stemerding S. (1951). Sublimation of ice in vacuum. *Appl. Sci. Res.*, *A3*, 73.
- Kramers H. (1958). Rate controlling factors in freeze-drying . *Fundamentals aspects of the dehydration of foodstuffs*. Macmillan, New York.
- Krokida M.K., Zogzas N.P. y Maroulis Z.B. (1997). Modelling shrinkage and porosity during vacuum dehydration. *Int. J. Food Sci. Technol.*, *32*, 445.
- Krokida M.K., Karathanos V.T. y Maroulis Z.B. (1998). Effect of freeze-drying conditions on shrinkage and porosity of dehydrated agricultural products. *J. Food Eng.*, *35*, 369.
- Lambrinos G.P. y Aguirre Puente J. (1983). Deshydratation des milieux dispersés congelés. Influence des conditions d'entreposage sur les pertes de masse. En *Proc. XVI Int. Cong. Ref.*, *2*, 567.
- Lees M. (1966). A linear three level difference scheme for quasi-linear parabolic equations. *Math. Comput.*, *20*, 516.
- Lind I. (1991). The measurement and prediction of thermophysical properties of food during freezing and thawing, a review with particular respect to meat and dough. *J. Food Eng.*, *13*, 285.
- Lombardi A.M. y Zaritzky N.E. (1996). Simultaneous diffusion of citric acid and ascorbic acid in prepeeled potatoes. *J. Food Proc. Eng.*, *19*, 27.
- Löndahl G., Göransson S., Sundstén S., Andersson A. y Tornberg E. (1995). Quality differences in fast freezing. En *Proc. XIX Int. Cong. Ref.*, *1*, 197.
- Mannapperuma J.D. y Singh R.P. (1988). Prediction of freezing and thawing times of foods using a numerical method based on enthalpy transformation. *J. Food Sci.*, *53*, 626.
- Mascheroni R.H., y Calvelo A. (1978). Modelo de descenso crioscópico en tejidos cárneos. *La Alimentación Latinoamericana*, *12*, 34.
- Mascheroni, R.H. y Calvelo A. (1982). A simplified model for freezing time calculations in foods. *J. Food Sci.*, *47*, 1201.
- Mellor J.D. (1978). *Fundamentals of Freeze Drying*. Academic Press, London.
- Méndez Bustabad O. (1999). Weight loss during freezing and the storage of frozen meat. *J. Food Eng.* *41*, 1.
- Miles C.A., van Beek G. y Veerkamp C.H. (1983). Calculation of thermophysical properties of foods. *Physical Properties of Foods*. Applied Science Publishers, London
- Misra R.N. y Young H.H. (1979). The finite element approach for solution of transient heat transfer in a sphere. *Trans. ASAE*, *22*, 944.

- Mitchell A.R. y Griffiths D.F. (1980). *The finite difference method in partial differential equations*. John Wiley and Sons, New York.
- Mohsenin N. (1980). *Thermal properties of foods and agricultural materials*. Gordon and Breach Science Publishers, London.
- Morgan V.T. (1975). The overall convective heat transfer from smooth circular cylinders. *Adv. Heat Transf.*, 11, 199.
- Nakamura S. (1992). *Métodos Numéricos aplicados con software*. Prentice Hall Hispanoamericana S.A., México.
- Pan J.C. y Bhowmik S.R. (1991). The finite analysis of transient heat transfer in fresh tomatoes during cooling. *Trans. ASAE*, 34, 972.
- Perry R.H. y Chilton C.H. (1985). *Chemical Engineers' Handbook, fifth edition*. McGrawHill, New York.
- Pham Q.T. (1984). An extension to Plank's equation for predicting freezing times for foodstuffs of simple shapes. *Int. J. Ref.*, 7, 377.
- Pham Q.T. y Willix J. (1984). A model for food desiccation in frozen storage. *J. Food Sci.*, 49, 1275.
- Pham Q.T. y Willix J. (1987). Heat transfer coefficients in air blast freezing of rows of cartons. En *Proc. XVII Int. Cong. Ref.*, C, 350.
- Pham, Q.T. (1990). Prediction of thermal conductivity of meats and other animal products from composition data. *Engineering and Food, vol I- Physical properties and process control*. Elsevier Applied Science, London.
- Plank R. (1913). Die gefrierdauer von eisblocken. *Zeitschrift für die gesante. Kalte-Industrie*, 20, 109.
- Plank R. (1963). *El empleo del frío en la industria de la refrigeración*. Ed. Reverté, Barcelona.
- Polley S.L., Snyder O.P. y Kotnour P. (1980). A compilation for thermal properties of foods. *Food Technol.*, 34, 76.
- Quick Frozen Foods (2000). European QFF market still growing, but it's harder to pin down details. 42, 156.
- Rubiolo de Reinick, A. y Schwartzberg H. (1986). Predicting temperature vs time behaviour during the freezing and thawing of rectangular foods. *Biotech. Progress*, 2, 164.
- Sakly M. y Lambrinos G. (1989). Sublimation de la glace sous convection forcée.

- Determination du coefficient global de transfert de masse. *Int. Comm. Heat Mass Transf.*, 16, 633.
- Salvadori V.O. y Mascheroni R.H. (1991). Prediction of freezing and thawing times of foods by means of a simplified analytical method. *J. Food Eng.*, 13, 67.
- Salvadori V.O. , De Michelis A. y Mascheroni R.H. (1997). Prediction of freezing times for regular multi-dimensional foods using simple formulae. *Lebensm. Wiss. u.-Technol.*, 30, 30.
- Sanz P.D., Dominguez M. y Mascheroni R.H. (1987). Thermophysical properties of meat products. General bibliography and experimental data. *Trans. ASAE*, 30, 283.
- Saravacos G.D. y Pilsworth J.R. (1965). Thermal conductivities of freeze-dried model food gels. *J. Food Sci.*, 30, 773.
- Sastry S.K. y Buffington D.E. (1983). Transpiration rates of stored perishable commodities: a mathematical model and experiments on tomatoes. *Int. J. Ref.*, 6, 84.
- Schrage R.W. (1953). *Theoretical study of interphase mass transfer*. Columbia University Press, New York.
- Sherwood T.K., Pigford R.L y Wilke C.R. (1975). *Mass Transfer*. Mc Graw-Hill, New York.
- Strickland-Constable R.F. y Bruce E.W. (1954). The mechanism of drying of solids. Part IV: The sublimation of pure ice. *Trans. Inst. Chem. Eng.*, 32, 192.
- Succar J. y Hayakawa K. (1984). Parametric analysis for predicting freezing time of infinitely slab shaped food. *J. Food Sci.*, 49, 468.
- Succar J. (1986). Estimation of thermophysical properties of food at freezing temperatures. *ASHRAE Trans.*, 91, 312.
- Sukhwil R.N. y Aguirre Puente J. (1983). Sublimation des milieux dispersés. Considerations theoriques et experimentation. *Rev. Gen. Therm.*, 262, 663.
- Strasser J., Heiss R. y Görling P. (1966). The water vapour and heat transport during vacuum freeze drying with reference to optimal process conditions. *Kältetechnik*, 18, 286.
- Tocci A. M. y Mascheroni R.H. (1994). Freezing times of meat balls in belt freezers: experimental determination and prediction by different methods. *Int. J. Ref.*, 17, 445.
- Tocci A.M. y Mascheroni R.H. (1995). Heat and mass transfer coefficients during refrigeration, freezing and storage of meats, meat products and analogues. *J. Food Eng.*, 26, 146.
- Tschudin K. (1946). Rate of vaporization of ice. *Helv. Phys. Acta*, 19, 91.
- Treybal (1968). *Mass transfer operations*. Mc Graw Hill, New York.

Wang N. y Brennan J.G. (1992). Thermal conductivity of potato as a function of moisture content. *J. Food Eng.*, 17, 153.

Wang N. y Brennan J.G. (1993). The influence of moisture content and temperature on the specific heat of potato measured by differential scanning calorimetry. *J. Food Eng.*, 19, 303.

Wang N. y Brennan J.G. (1995). Changes in structure, density and porosity of potato during dehydration. *J. Food Eng.*, 24, 61.

Welty J.R. (1974). *Engineering Heat Transfer*, John Wiley and Sons, New York.

Wilson H.A y Singh R.P. (1987). Numerical simulation of individual quick freezing of spherical particles. *Int. J. Ref.*, 10, 149.