



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE TIEMPOS DE
CONGELACIÓN EN DIFERENTES ALIMENTOS CON DISTINTAS GEOMETRÍAS**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

QUÍMICA DE ALIMENTOS

PRESENTA

ATENEA SUSANA IBARRA PACHECO



MÉXICO, D.F.

2014



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: Q.F.B. JUAN DIEGO ORTIZ PALMA PÉREZ

VOCAL: Dr. ALBERTO TECANTE CORONEL

SECRETARIO: M. en C. GABRIELA ALATORRE GARCÍA

1er. SUPLENTE: I. A. MARIANA RAMÍREZ GILLY

2do. SUPLENTE: M. en C. FEDERICO NIETO PINEDA

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

**LABORATORIO 313, DEPARTAMENTO DE ALIMENTOS Y BIOTECNOLOGÍA. CONJUNTO E,
FACULTAD DE QUÍMICA. UNAM**

ASESOR DEL TEMA:

DR. ALBERTO TECANTE CORONEL

SUSTENTANTE:

ATENEA SUSANA IBARRA PACHECO

ÍNDICE

ÍNDICE	I
Lista de figuras	VII
Lista de tablas	XI
Lista de nomenclatura	XIII
RESUMEN	XVI
INTRODUCCIÓN	1
Objetivo general	3
Objetivos específicos	3
CAPÍTULO I	4
ASPECTOS GENERALES	4
1. Congelación de alimentos.....	4
1.1. Proceso de conservación de alimentos	4
1.2. Proceso de congelación	4
1.3. Aspectos termodinámicos del proceso de congelación	5
1.3.1. Formación del cristal	5
1.3.2. Agua pura	5
1.3.3. Alimentos	6
1.3.4. Punto eutéctico	7
1.4. Propiedades termodinámicas de los alimentos congelados.....	7
1.4.1. Punto de congelación	9
1.1.2. Agua congelada y no congelada.....	10
1.1.3. Densidad.....	10
1.1.4. Conductividad térmica	10
1.1.5. Entalpía	11

1.1.6.	Calor latente	11
1.1.7.	Calor específico aparente	11
1.1.8.	Difusividad térmica aparente	11
1.1.9.	Coeficiente de transferencia convectiva de energía térmica.....	12
1.5.	Tiempo de congelación	12
1.5.1.	Cálculo del tiempo de congelación	13
1.5.2.	Ecuación de Plank.....	14
1.5.2.1.	Ecuaciones modificadas de Plank	15
1.5.3.	Factores que afectan la estimación de cálculo.....	18
1.5.3.1.	Datos térmicos	19
CAPÍTULO II		21
METODOLOGÍA		21
2.1	Diagrama general	21
2.2	Materiales.....	21
2.3	Métodos.....	21
2.3.1.	Caracterización del equipo.....	22
2.3.2.	Determinación de humedad.....	23
2.3.3.	Determinación de densidad	24
2.3.4.	Congelación.....	24
2.3.4.2.	Agua	25
2.3.4.3.	Pasta de hojaldre.....	26
2.3.4.4.	Zanahorias.....	27
2.3.4.5.	Guayabas.....	27
2.3.4.6.	Determinación del punto inicial de congelación.....	27
2.3.4.7.	Determinación del tiempo de congelación experimental.....	27

2.3.5.	Cálculo de las propiedades térmicas	29
2.3.5.1.	Densidad.....	30
2.3.5.2.	Conductividad térmica (k).....	30
2.3.5.3.	Calor específico (Cp).....	31
2.3.5.3.1.	Cp _s	31
2.3.5.3.2.	Cp _L	31
2.3.5.4.	Difusividad térmica (α)	32
2.3.5.5.	Calor latente (ΔH_f).....	32
2.3.5.6.	Coeficiente de transferencia convectiva de energía térmica.....	34
2.3.5.6.1.	Método de Ramaswamy y Tung (1981)	34
2.3.5.6.2.	Método a partir de la ecuación de Plank con el tiempo de congelación experimental	34
2.3.6.	Cálculo del tiempo de congelación empleando la ecuación de Plank	34
2.3.7.	Cálculo empleando la ecuación de Rjutov	35
2.3.8.	Cálculo empleando la ecuación de Levy	35
2.3.9.	Cálculo empleando la ecuación de Pham	35
2.3.10.	Cálculo empleando la ecuación de López-Leyva y Hallström	36
2.3.11.	Cálculo del porcentaje de error	37
2.3.12.	Análisis de la sensibilidad de las ecuaciones	37
CAPÍTULO III	38
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	38
3.1	Caracterización del congelador.....	38
3.2.	Humedad y densidad de los alimentos por congelar	40
3.3.	Temperaturas de los alimentos congelados	41
3.3.1.	Perfiles térmicos.....	43
3.3.1.1.	Agua	43

3.3.1.2.	Carne molida	44
3.3.1.3.	Pasta de hojaldre	44
3.3.1.4.	Zanahorias.....	48
3.3.1.5.	Guayabas.....	48
3.3.2.	Tiempo de congelación experimental.....	53
3.4.	Tiempos experimentales	53
3.3.2.1.	Agua	54
3.3.2.2.	Carne molida.....	55
3.3.2.3.	Pasta de hojaldre	58
3.3.2.4.	Zanahorias.....	60
3.3.2.5.	Guayabas.....	62
3.5.	Propiedades térmicas para la ecuación de Plank	67
3.6.	Propiedades térmicas para la ecuación de Rjutov	69
3.7.	Propiedades térmicas para la ecuación de Levy.....	71
3.8.	Propiedades térmicas para la ecuación de Q.T. Pham.....	73
3.9.	Propiedades térmicas para la ecuación de López-Leyva y Hallström	74
3.10.	Tiempo calculado del cambio de fase.....	76
3.11.	Tiempo calculado del proceso completo de congelación.....	78
3.12.	Análisis de sensibilidad de las ecuaciones	80
3.12.1.	Ecuación de Plank.....	80
a)	Efecto del coeficiente de transferencia convectiva de energía térmica (h)	80
b)	Efecto de la conductividad térmica (k)	81
c)	Efecto de la temperatura del medio de enfriamiento (T_a).....	81
d)	Efecto del calor latente de congelación (ΔH_f).....	82
f)	Efecto de la temperatura inicial de congelación (T_f)	83

3.12.2. Ecuación de López- Leyva y Hallström	84
a) Efecto de la reducción de h_{exp}	84
b) Efecto de la densidad (ρ)	84
c) Efecto del calor latente (ΔH_f)	85
d) Efecto de la temperatura inicial de congelación T_f	85
e) Efecto de la temperatura del medio de enfriamiento T_a	86
f) Efecto del número de Bi	86
g) Efecto de P	87
3.12.3. Ecuación de Rjutov	88
a) Efecto del número de biot Bi	88
b) Efecto de la difusividad térmica α	88
c) Efecto de la temperatura inicial del alimento T_i	89
d) Efecto de la temperatura inicial de congelación T_f	89
e) Efecto de la temperatura final de la muestra T_e	90
f) Efecto del tiempo de congelación de acuerdo a F_{Plank}	90
g) Efecto de la temperatura del medio de enfriamiento T_a	91
3.12.4. Ecuación de Levy	91
a) Efecto del tiempo de congelación experimental F_{exp}	91
b) Efecto del cambio de entalpía del proceso completo ΔH_{PR}	92
c) Efecto del calor latente ΔH_f	92
d) Efecto de la temperatura inicial T_i	93
e) Efecto de la temperatura inicial de congelación T_f	93
3.12.5. Ecuación de Q. T. Pham.....	94
a) Efecto de h_{exp}	94
b) Efecto de V	95

c) Efecto de f_0	95
d) Efecto de ΔH_1	96
e) Efecto de ΔH_2	96
f) Efecto de ΔT_1	97
g) Efecto de ΔT_2	97
h) Efecto de Bi	98
Conclusiones	99
Referencias	100

Lista de figuras

Figura 1. Perfil térmico del proceso de congelación de agua y de un alimento.....	6
Figura 2. Perfil térmico de un alimento con varios puntos eutécticos.....	8
Figura 3. Proceso de congelación de alimentos dividido de acuerdo con el método de Pham (imagen modificada de Singh & Heldman, 2009).....	17
Figura 4. Cámara de congelación con las zonas superior, central e inferior.....	22
Figura 5. Termostato de la cámara de congelación.....	23
Figura 6. Termistor digital.....	23
Figura 7. Termopares conectados al termistor.....	24
Figura 8. Carne molida de res en placa antes de ser congelada.....	25
Figura 9. Congelación de agua destilada en placa con termopar en posición transversal en el centro térmico.....	26
Figura 10. Congelación de agua destilada en placa con termopar en posición perpendicular en el centro térmico.....	26
Figura 11. Historia térmica del proceso de congelación de carne molida BR-2. Los símbolos llenos señalan el tiempo de congelación experimental.....	29
Figura 12. Perfiles típicos de enfriamiento de la cámara de congelación.....	39
Figura 13. Perfiles térmicos de agua destilada para dos posiciones diferentes del termopar; transversal (AT) y perpendicular (AP).....	43
Figura 14. Perfiles de congelación de carne molida de res en forma de placa.....	45
Figura 15. Perfiles de congelación de pasta de hojaldre en forma de placa.....	46
Figura 16. Perfiles de congelación de pasta de hojaldre en forma de cilindro.....	47
Figura 17. Perfiles de congelación de zanahoria con el medio de enfriamiento acondicionado.....	49
Figura 18. Perfiles de congelación de zanahorias sin el medio de enfriamiento acondicionado.....	50

Figura 19. Perfiles de congelación de guayabas sin el medio de enfriamiento acondicionado.	51
Figura 20. Perfiles de congelación de guayabas con el medio de enfriamiento acondicionado.	52
Figura 21. Perfiles de congelación de agua destilada en placa con regresión lineal para delimitar el periodo de cambio de fase.	54
Figura 22. Perfiles de congelación de la prueba 1 para carne molida de res en placa con regresión lineal para identificar el periodo de congelación.	55
Figura 23. Perfiles de congelación de la prueba 2 para carne molida de res en placa con regresión lineal para delimitar el periodo de cambio de fase.	56
Figura 24. Perfiles de congelación de la prueba 3 para carne molida de res en placa para delimitar el periodo de cambio de fase.	57
Figura 25. Perfiles de congelación de pasta de hojaldre en cilindro con regresión lineal para delimitar el periodo de cambio de fase.	58
Figura 26. Perfiles de congelación de pasta de hojaldre en placa con regresión lineal para delimitar el periodo de cambio de fase.	59
Figura 27. Perfiles de congelación de zanahoria con regresión lineal (el medio de enfriamiento acondicionado) para delimitar el periodo de cambio de fase.	60
Figura 28. Perfiles de congelación de zanahoria con regresión lineal (sin el medio de enfriamiento acondicionado) para delimitar el periodo de cambio de fase.	61
Figura 29. Perfiles de congelación de guayabas con regresión lineal (sin el medio de enfriamiento acondicionado) para delimitar el periodo de cambio de fase.	62
Figura 30. Perfiles de congelación de guayabas con regresión lineal (con el medio de enfriamiento acondicionado) para delimitar el periodo de cambio de fase.	63
Figura 31. Efecto de la reducción de h en el cálculo del tiempo de congelación al usar la ecuación de Plank.	80
Figura 32. Efecto de la reducción de k en el cálculo del tiempo de congelación al usar la ecuación de Plank.	81
Figura 33. Efecto de la reducción de T_a en el cálculo del tiempo de congelación al usar la ecuación de Plank.	81

Figura 34. Efecto de la reducción de ΔH_f en el cálculo del tiempo de congelación al usar la ecuación de Plank	82
Figura 35. Efecto de la reducción de ρ en el cálculo del tiempo de congelación al usar la ecuación de Plank.	82
Figura 36. Efecto de la reducción de T_f en el cálculo del tiempo de congelación al usar la ecuación de Plank	83
Figura 37. Efecto de la reducción de h_{exp} en el cálculo del tiempo de congelación al usar la ecuación de López-Leyva y Hallström.	84
Figura 38. Efecto de la reducción de ρ en el cálculo del tiempo de congelación al usar la ecuación de López-Leyva y Hallström.	84
Figura 39. Efecto de la reducción de ΔH_f en el cálculo del tiempo de congelación al usar la ecuación de López-Leyva y Hallström.	85
Figura 40. Efecto de la reducción de T_f en el cálculo del tiempo de congelación al usar la ecuación de López-Leyva y Hallström.	85
Figura 41. Efecto de la reducción de T_a en el cálculo del tiempo de congelación al usar la ecuación de López-Leyva y Hallström.	86
Figura 42. Efecto de la reducción de Bi en el cálculo del tiempo de congelación al usar la ecuación de López-Leyva y Hallström.	86
Figura 43. Efecto de la reducción de P en el cálculo del tiempo de congelación al usar la ecuación de López-Leyva y Hallström.	87
Figura 44. Efecto de la reducción de Bi en el cálculo del tiempo del proceso completo de congelación con la ecuación de Rjutov.....	88
Figura 45. Efecto de la reducción de α en el cálculo del tiempo del proceso completo de congelación con la ecuación de Rjutov.....	88
Figura 46. Efecto de la reducción de T_i en el cálculo del tiempo del proceso completo de congelación con la ecuación de Rjutov.....	89
Figura 47. Efecto de la reducción de T_f en el cálculo del tiempo del proceso completo de congelación con la ecuación de Rjutov.....	89
Figura 48. Efecto de la reducción de T_e en el cálculo del tiempo del proceso completo de congelación con la ecuación de Rjutov.....	90

Figura 49. Efecto de la reducción de F en el cálculo del tiempo del proceso completo de congelación con la ecuación de Rjutov.....	90
Figura 50. Efecto de la reducción de F_{exp} en el cálculo del tiempo del proceso completo de congelación al usar la ecuación de Levy.	91
Figura 51. Efecto de la reducción de ΔH_{PR} en el cálculo del tiempo del proceso completo de congelación al usar la ecuación de Levy.	92
Figura 52. Efecto de la reducción de ΔH_f en el cálculo del tiempo del proceso completo de congelación al usar la ecuación de Levy.	92
Figura 53. Efecto de la reducción de T_i en el cálculo del tiempo del proceso completo de congelación al usar la ecuación de Levy.	93
Figura 54. Efecto de la reducción de T_f en el cálculo del tiempo del proceso completo de congelación al usar la ecuación de Levy.	93
Figura 55. Efecto de la reducción de h_{exp} en el cálculo del tiempo del proceso completo de congelación al usar la ecuación de Q. T. Pham.....	94
Figura 56. Efecto de la reducción de V en el cálculo del tiempo del proceso completo de congelación al usar la ecuación de Q. T. Pham.....	95
Figura 57. Efecto de la reducción de f_o en el cálculo del tiempo del proceso completo de congelación al usar la ecuación de Q. T. Pham.....	95
Figura 58. Efecto de la reducción de ΔH_1 en el cálculo del tiempo del proceso completo de congelación al usar la ecuación de Q. T. Pham.....	96
Figura 59. Efecto de la reducción de ΔH_2 en el cálculo del tiempo del proceso completo de congelación al usar la ecuación de Q. T. Pham.....	96
Figura 60. Efecto de la reducción de ΔT_1 en el cálculo del tiempo del proceso completo de congelación al usar la ecuación de Q. T. Pham.....	97
Figura 61. Efecto de la reducción de ΔT_2 en el cálculo del tiempo del proceso completo de congelación al usar la ecuación de Q. T. Pham.....	97
Figura 62. Efecto de la reducción de Bi_S en el cálculo del tiempo del proceso completo de congelación al usar la ecuación de Q. T. Pham.....	98

Lista de tablas

Tabla 1. Dimensiones de las muestras de alimentos congelados.	28
Tabla 2. Composición (g/100 g) de los alimentos (Heldman & Lund, 2007).	29
Tabla 3. Valores de los coeficientes para calcular la densidad para cada componente.	30
Tabla 4. Valores de los coeficientes para calcular k para cada componente.	30
Tabla 5. Valores de los coeficientes para calcular C_{pS} para cada componente del alimento.	31
Tabla 6. Valores de los coeficientes para calcular C_{pS} para hielo en un alimento.	31
Tabla 7. Valores de los coeficientes para calcular el calor específico de cada componente.	32
Tabla 8. Tiempos promedio (min) para alcanzar la temperatura señalada.	38
Tabla 9. Humedad y densidad de los alimentos examinados.	40
Tabla 10. Temperaturas de todas las muestras congeladas.	42
Tabla 11. Tiempos experimentales de cambio de fase y del proceso completo de congelación.	65
Tabla 12. Propiedades térmicas calculadas y densidad de todas las muestras para usar en la ecuación de Plank.	67
Tabla 13. Propiedades térmicas de todas las muestras calculadas para la ecuación de Rjutov.	69
Tabla 14. Resultados del cálculo del cambio de entalpía durante el proceso completo de todas las muestras para la ecuación de Levy.	71
Tabla 15. Cambio de entalpía volumétrica y del gradiente de temperatura de acuerdo con las consideraciones de la ecuación de Q.T. Pham con los valores de B_i calculados con los diferentes valores de h	73
Tabla 16. Propiedades térmicas calculadas para la ecuación de López-Leyva y Hallström.	74

Tabla 17 Tiempo de congelación calculado con la ecuación de Plank y la ecuación de López-Leyva y Hallström.....	76
Tabla 18. Tiempo (min) del proceso completo congelación calculado con h_{exp} obtenida de la ecuación de Plank.....	78
Tabla 19. Tiempo (min) del proceso completo congelación calculado con h obtenida de acuerdo al método de Ramaswamy y Tung (1981).	79
Tabla 20. Efecto de la reducción de los parámetros de la ecuación de Plank sobre el porcentaje de la diferencia de tiempos de congelación al reducir 10% los valores de cada parámetro.	83
Tabla 21. Efecto de la reducción de los parámetros de la ecuación de López-Leyva y Hallström sobre el porcentaje de la diferencia de tiempos de congelación al reducir 10% los valores de cada parámetro.	87
Tabla 22. Efecto de la reducción de los parámetros de la ecuación de Rjutov sobre el porcentaje de la diferencia de tiempos de congelación al reducir 10% los valores de cada parámetro.	91
Tabla 23. Efecto de la reducción de los parámetros de la ecuación de Levy sobre el porcentaje de la diferencia de tiempos de congelación al reducir 10% los valores de cada parámetro.	94
Tabla 24. Efecto de la reducción de los parámetros de la ecuación de Q. T. Pham sobre el porcentaje de la diferencia de tiempos del proceso completo de congelación al reducir 10% los valores de cada parámetro.	98

Lista de nomenclatura

A = agua control

Al = aluminio

AP= termopar en posición perpendicular

AT= termopar en posición transversal

α = difusividad térmica (m^2/s)

Bi = número de Biot

Bi_S = número de Biot en estado congelado

BR = bolsa resellable

β = calor latente de congelación del agua pura

cm = centímetros

°C = grados Celsius

CA= congelador acondicionado (medio de enfriamiento en su temperatura mínima)

CM= carne molida de res

Cp_L = capacidad calorífica del alimento en estado no congelado ($kJ/kg \cdot ^\circ C$)

Cp_S = capacidad calorífica del alimento congelado ($kJ/kg \cdot ^\circ C$)

CTA= congelador a temperatura ambiente (inicio de congelación con el medio de enfriamiento a temperatura ambiente)

ΔF = diferencia de tiempos de congelación (%)

ΔH_f = cambio de entalpía durante la congelación (J/kg)

ΔH_{PR} = cambio de entalpía durante el proceso completo (J/m^3)

ΔH_1 = cambio de entalpía volumétrica para el periodo de preenfriamiento (J/m^3)

ΔH_2 = cambio de entalpía volumétrica para el cambio de fase y el periodo de post-enfriamiento (J/m^3)

ΔT_1 = gradiente de temperatura para el periodo de preenfriamiento

ΔT_2 = gradiente de temperatura para el cambio de fase y el periodo de post-enfriamiento.

d = espesor de la muestra (m)

ρ = densidad (kg/m^3)

ρ_S = densidad del alimento en estado congelado (kg/m^3)

EPU = espuma de poliuretano

F = tiempo de congelación de acuerdo a Plank (s,min)

F_{cal} = tiempo de congelación calculado (s,min)

F'_{cal} = tiempo de congelación recalculado (s,min)

F_{exp} = tiempo experimental del cambio de fase (s,min)

F_{eff} = tiempo total de congelación (tiempo de congelación efectivo) (s,min)

F'_{eff} = tiempo total de congelación recalculado (tiempo de congelación efectivo) (s,min)

F_{-10 °C} = el tiempo que tarda el alimento en llegar a -10 °C

f₀ = área de transferencia de calor (m²)

G = guayaba

g = gramos

h = coeficiente de transferencia convectiva de energía térmica (W/m².°C)

h_{exp} = coeficiente de transferencia convectiva de energía térmica experimental (W/m².°C)

K = grados Kelvin

k = conductividad térmica del alimento congelado (W/m °C)

M_S = masa molecular equivalente de solutos

min = minutos

m = metros

m² = metros cuadrados

PH = pasta de hojaldre

P, R = parámetros que dependen de la forma geométrica del alimento.

R_j = coeficiente de Rjutov

R_g = constante de gases

T = temperatura (°C)

T_a = temperatura del medio de congelación (°C)

T_c es la temperatura final del centro geométrico (°C)

T_e = temperatura final (°C)

T_f = temperatura inicial de congelación (°C)

T_{fm} es la temperatura promedio de congelación obtenida por Q. T. Pham

T_i = temperatura inicial ($^{\circ}\text{C}$)

T_{0A} = temperatura de congelación del agua pura

t = tiempo (s, min)

V_0 = volumen del alimento (m^3)

W = watts

x_{ac} = fracción másica de agua congelada

x_{ai} = fracción másica inicial de agua

X_{apc} = fracción molar de agua en el punto de congelación

X_{anc} = fracción molar de agua no congelada

x_{anc} = fracción másica de agua no congelada

x_S = la fracción másica de sólidos

Z = zanahoria

$\%$ = por ciento

RESUMEN

Se congelaron alimentos de geometrías cilíndrica, esférica y placa en un congelador sin circulación forzada de aire. El objetivo fue obtener el cambio de la temperatura con el tiempo del proceso completo de congelación para analizar la forma en que ocurre según el tipo de alimento y su geometría. Las historias térmicas se registraron por medio de termopares ubicados en el centro geométrico de cada alimento, en agua líquida usada como referencia y en el interior del congelador para obtener el registro del medio de enfriamiento. Se registraron las temperaturas en intervalos de cinco minutos hasta que se alcanzó una temperatura mínima. Los perfiles de temperatura así obtenidos se analizaron para evaluar los métodos de estimación del tiempo de congelación con la ecuación de Plank y ecuaciones modificadas disponibles en la literatura. El propósito fue correlacionar los tiempos medidos con los calculados para establecer las limitaciones de cada ecuación y las variables requeridas para el cálculo. Se espera que los tiempos de congelación calculados se aproximen a los experimentales de manera que sea posible encontrar el método más preciso para el cálculo del tiempo de congelación.

INTRODUCCIÓN

El trabajo objeto de esta tesis formó parte del proyecto PAPIME PE203509 “Desarrollo de protocolos de enseñanza experimental para la asignatura Laboratorio de Tecnología de la licenciatura en Química de Alimentos”, cuyo objetivo principal fue desarrollar protocolos experimentales para el estudio de las operaciones unitarias al interior de un proceso determinado de diferentes tipos de alimentos y productos alimenticios, como productos lácteos, cárnicos y vegetales. Como tal, su propósito fue desarrollar un protocolo experimental de uso en la asignatura Laboratorio de Tecnología de Alimentos (Labtec) de la Licenciatura en Química de Alimentos de la Facultad de Química de la UNAM, para estimar el tiempo de congelación de alimentos con la finalidad de comprender la conservación de alimentos por frío. Para ello, se examinó el funcionamiento y operación de una cámara de congelación, adquirida con recursos del proyecto, para conocer las condiciones que permitieran aprovechar al máximo su uso. Se seleccionaron alimentos frescos de fácil disponibilidad, de manejo sencillo, con diferente contenido de humedad y con distintas formas geométricas para estudiar las diferencias entre los perfiles térmicos. En particular, se examinó el tiempo requerido para el cambio de fase del agua, además de consideraciones relacionadas con la geometría de los alimentos y de las propiedades térmicas necesarias para usar la ecuación de Plank y en las ecuaciones modificadas de la misma, para calcular el tiempo de congelación y de los periodos de enfriamiento y subenfriamiento. Se analizó la sensibilidad de la ecuación de Plank ante cambios en los valores de los parámetros que la forman, para conocer el efecto que dichos cambios tienen sobre el cálculo del tiempo de congelación. Finalmente, se compararon los tiempos de congelación experimentales con los calculados con el fin de determinar la forma más adecuada y la mejor ecuación para predecir el tiempo de congelación.

En términos experimentales, se espera que los alimentos con mayor contenido de humedad y mayor tamaño requieran un tiempo de congelación más largo. En lo que respecta al cálculo, la complejidad y las consideraciones de las ecuaciones

que incluyen los valores de las propiedades térmicas calculadas contribuyen de manera significativa a la incertidumbre en los tiempos de congelación, por lo que el tiempo de congelación experimental y el tiempo de congelación calculado difícilmente serán iguales. No obstante, desde un punto de vista de enseñanza experimental es importante conocer cuáles variables y qué propiedades están involucradas y determinan la forma en la que se lleva a cabo el fenómeno de congelación.

La importancia de la congelación como operación en la industria alimentaria incluye la determinación del tiempo de congelación y su predicción. Esto es importante para llevar a cabo un adecuado proceso de congelación que sirva para conservar alimentos al reducir la actividad enzimática y el crecimiento microbiano responsables de su deterioro y de mantener sus características sensoriales. Por otro lado, también es indispensable en el diseño de equipos de congelación para optimizar la eficiencia de uso de energía, reducir costos e implementar mejoras en el proceso.

En los primeros dos capítulos de este trabajo se exponen los fundamentos teóricos de la congelación vista como el cambio de fase del agua líquida a sólida, los conceptos sobre las propiedades térmicas y las ecuaciones empleadas para el cálculo del tiempo de congelación. En el segundo capítulo se describe la metodología experimental. El tercer capítulo incluye los resultados así como los tiempos de congelación calculados, los resultados de la determinación de humedad y densidad, los valores de las propiedades térmicas calculadas, además del análisis de sensibilidad de la ecuación de Plank con su respectiva discusión. Por último, se ofrecen las conclusiones.

Vale la pena aclarar que actualmente ya se está usando el protocolo experimental que aparece en el Anexo de esta tesis en la mencionada asignatura. Dicho protocolo fue producto del trabajo que aquí se presenta con mayor detalle.

Objetivo general

Desarrollar un protocolo de enseñanza experimental para determinar los tiempos de congelación de diferentes alimentos en el laboratorio, emplear las ecuaciones representativas para estimar el tiempo de congelación y comparar los tiempos predichos y calculados para entender el fenómeno de congelación en cámara.

Objetivos específicos

1. Obtener los perfiles térmicos de alimentos con diferentes geometrías durante su congelación con aire para calcular el tiempo de congelación y determinar la duración de los periodos de enfriamiento y subenfriamiento.
2. Estimar el tiempo de congelación de alimentos a partir de la ecuación de Plank y de las ecuaciones de Plank modificadas para comparar la capacidad de predicción de dichas ecuaciones.

CAPÍTULO I

ASPECTOS GENERALES

1. Congelación de alimentos

1.1. Proceso de conservación de alimentos

En la industria de alimentos la congelación es un proceso que sirve para prolongar la vida útil de un alimento por un efecto combinado de bajas temperaturas con la formación de cristales de hielo en el alimento para reducir la velocidad con la que se llevan a cabo reacciones físicas y bioquímicas (enzimáticas y de oxidación) que causan el deterioro del alimento, la velocidad de crecimiento de los microorganismos y la disponibilidad de agua para su proliferación debido a que esta se separa como hielo y la porción de agua no congelada se concentra en solutos (Fellows 2007; Singh, 2003). Existen diferentes sistemas de congelación diseñados para un proceso eficiente que conserve la calidad del alimento; el mejor sistema dependerá de las características del producto (Singh, 2003).

1.2. Proceso de congelación

Se entiende por congelar, la cristalización de agua líquida pura en hielo; para un sistema alimentario la única diferencia es la presencia del resto de sus componentes (Reid, 1983). Es importante conocer cómo varía la temperatura del alimento a lo largo del proceso. Para ello se obtienen los perfiles térmicos, los cuales muestran los periodos en los que inicialmente desciende la temperatura tanto del alimento como del agua alcanzando su punto de congelación, el periodo de cambio de fase y el descenso posterior de temperatura hasta alcanzar un equilibrio con la temperatura del medio de enfriamiento.

1.3. Aspectos termodinámicos del proceso de congelación

Los perfiles de congelación muestran los cambios físicos que ocurren en el agua dentro del producto y el cambio de la temperatura mientras la energía térmica se transfiere desde el alimento hacia su entorno (Berk, 2009; Heldman & Lund, 2007).

1.3.1. Formación del cristal

La cristalización ocurre en dos pasos: la formación de un núcleo generado por el subenfriamiento por debajo del punto inicial de congelación (Mittal, 2006) y el posterior crecimiento del núcleo hasta un tamaño de cristal específico, que depende de la velocidad de nucleación, del crecimiento del cristal y de la temperatura final. La nucleación es el principal paso para la formación del cristal, comienza con la colisión de las moléculas una con otra debido al movimiento aleatorio en la solución que permite la formación de grupos de nucleación que al aumentar comienzan a asociarse para formar un conglomerado hasta formar pequeños cristales en el proceso llamado crecimiento del cristal. La nucleación que ocurre en sistemas puros es conocida como homogénea. Si una interfase sólida, ya sea una pared o un cristal se encuentra involucrada, la nucleación se llama heterogénea; siendo ésta la que predomina en alimentos (Delgado; Sun 2011).

1.3.2. Agua pura

La temperatura de congelación del agua es 0 °C. Su perfil de congelación, Figura 1, muestra que la temperatura desciende linealmente (calor sensible) hasta llegar a una temperatura inferior a 0 °C (A-B), en la que todavía se encuentra agua en estado líquido. Este descenso se conoce como “sobreenfriamiento” (Fellows, 2007; Rahman *et al.*, 2002) y es un estado metaestable del líquido antes de que la nucleación del primer cristal de hielo ocurra; en agua pura libre de partículas la

nucleación es homogénea debido a la acumulación de moléculas de agua (Nesvadba, 2008). La temperatura aumenta de manera instantánea hasta la temperatura de congelación (0 °C) y se inicia el periodo de cambio de fase al liberar el calor latente a temperatura constante hasta que toda el agua ha cristalizado (C-D). Finalmente la temperatura desciende (calor sensible) hasta alcanzar la del medio de congelación (D-E).

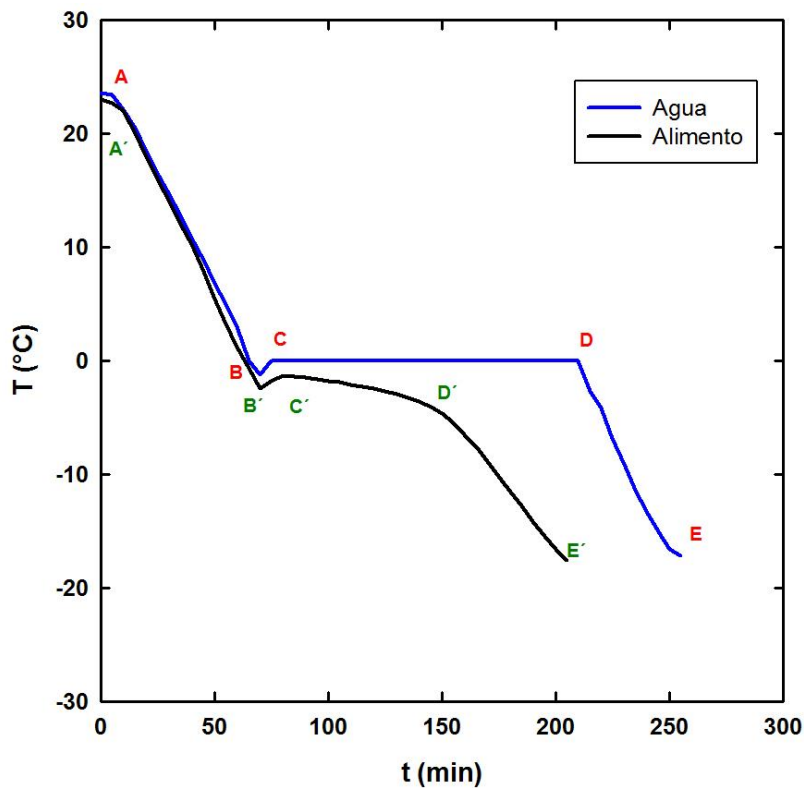


Figura 1. Perfil térmico del proceso de congelación de agua y de un alimento.

1.3.3. Alimentos

El proceso de congelación de alimentos difiere en dos aspectos del de congelación del agua pura, Figura 1. El primero es que la magnitud de la depresión de la temperatura para la formación inicial de los cristales de hielo es más baja debido a que depende de la composición del alimento (Heldman & Lund, 2007) y está precedida por una nucleación heterogénea debido a la presencia de

solutos que actúan como sitios de nucleación (Nesvadba, 2008). Segundo, la liberación de calor latente ocurre en un intervalo decreciente de temperaturas del alimento (Heldman & Lund, 2007) debido al aumento de la concentración de solutos en la fracción de agua no congelada (C'-D') (Fellows, 2007). La relación temperatura-tiempo durante el cambio de fase depende de la cantidad de agua congelada en cualquier tiempo en el proceso. El perfil de congelación varía con la composición del producto y de su estructura (Heldman & Lund, 2007). El descenso gradual continua hasta que alguno de los solutos alcanza la temperatura de sobresaturación y cristaliza liberando su calor latente y provoca un aumento de la temperatura hasta la temperatura eutéctica del soluto (Fellows, 2007).

1.3.4. Punto eutéctico

Conforme ocurre el descenso gradual de temperatura, se va alcanzando la saturación de diferentes sustancias presentes en la solución no congelada. En consecuencia, al llegar un soluto a un equilibrio con el líquido no congelado y el hielo se dice que ha llegado a un punto eutéctico (Fellows, 2007). Los puntos eutécticos se presentan una vez que el agua libre ha cristalizado, i.e. después del cambio de fase, de manera que influye sobre otros solutos libres que posteriormente cristalizan al liberar su calor latente elevando ligeramente la temperatura (Rahman *et al.*, 2002). Después del cambio de fase, en algunos alimentos se puede apreciar uno o varios puntos eutécticos (George, 1993). La Figura 2 muestra un ejemplo de un alimento con varios puntos eutécticos después del periodo de cambio de fase.

1.4. Propiedades termodinámicas de los alimentos congelados

La mayoría de los alimentos que se congelan tiene más de 50% de humedad, con el agua como componente mayoritario, de ahí que el proceso de congelación causa un cambio de fase en el agua afectando las propiedades térmicas del

alimento congelado, las cuales dependen de las propiedades del agua en estado congelado y no congelado (Heldman, 1982).

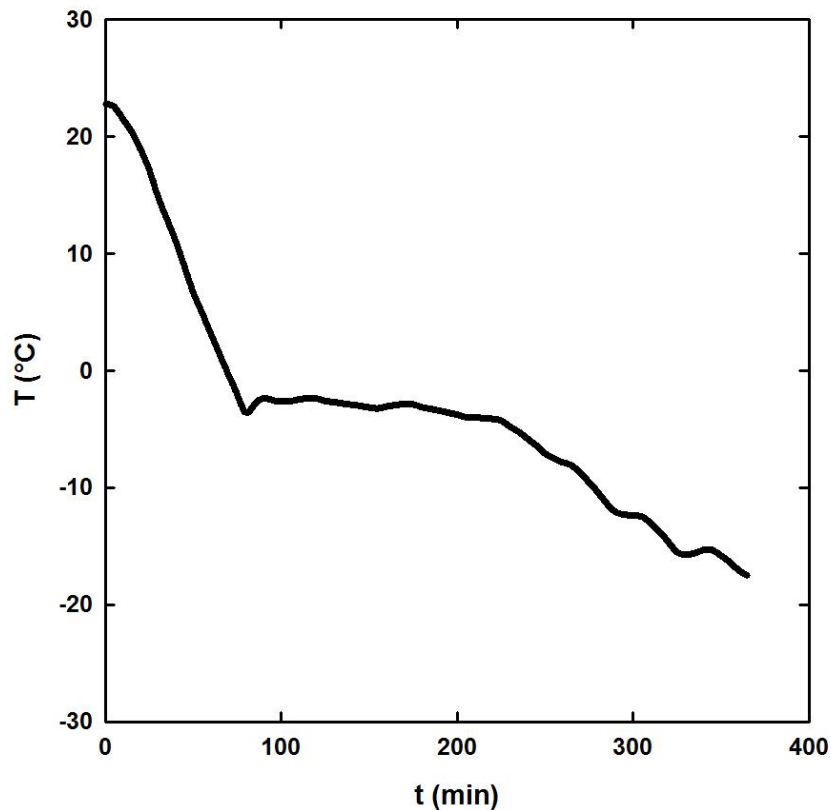


Figura 2. Perfil térmico de un alimento con varios puntos eutécticos.

A partir del conocimiento de la composición del producto y de sus fracciones en la composición total, es posible estimar las propiedades térmicas del producto (Heldman, 1982). El factor clave en las estimaciones de las propiedades es la relación entre la fracción de agua no congelada y la temperatura (Heldman, 1982). Las propiedades termodinámicas dependen de los componentes de cada alimento. La magnitud de estas propiedades depende de la temperatura de cada componente del alimento. El agua es el componente principal y puede estar tanto en estado líquido como en estado sólido en alimentos congelados (Wang & Weller, 2006). Las variaciones entre las propiedades térmicas se deben a la composición del alimento y a su estructura. Los modelos para estimarlas pueden usarse sobre un amplio intervalo de condiciones y composición con razonable exactitud (Wang

& Weller, 2006). Las propiedades de los alimentos de interés para el proceso de congelación incluyen la densidad, el calor específico, la conductividad térmica, la entalpía y el calor latente, las cuales deben considerarse en la estimación de la capacidad de refrigeración para el sistema de congelación y el cálculo de tiempos de congelación para establecer tiempos de residencia adecuados. Las magnitudes dependen de la fracción de agua no congelada y de la temperatura (Heldman & Lund, 2007).

1.4.1. Punto de congelación

El punto de congelación es una de las propiedades más importante debido a la discontinuidad del resto de las propiedades térmicas en este punto. Por lo tanto, es necesario conocer el punto inicial de congelación para estimar las propiedades térmicas de los alimentos (Wang & Weller, 2006). Aunque cualquier alimento sólido no es una solución, el componente acuoso en un alimento sólido congelado puede ser una mezcla de hielo y una solución de componentes no acuosos en agua líquida (Wang & Weller, 2006). El cambio de agua a hielo incrementa la concentración de la solución no congelada y provoca el abatimiento del punto inicial de congelación (George, 1993). Mientras el agua presente en el alimento congela como si estuviese pura, la solución restante se hace cada vez más concentrada. Así, el descenso del punto de congelación de un alimento continua mientras la concentración se incrementa, en consecuencia el punto inicial de congelación es inferior a 0 °C. El proceso de congelación ocurre sobre un intervalo de temperaturas a diferencia de la congelación de agua pura que ocurre a una sola temperatura (Wang & Weller, 2006). El punto inicial de congelación de alimentos varía con el contenido de agua, otros componentes no acuosos, el peso molecular de los componentes, la interacción de los mismos y las características del agua ligada. Por ello es evidente que el descenso del punto de congelación depende de la composición del producto (Wang & Weller, 2006).

1.1.2. Agua congelada y no congelada

El cambio de fase domina el cambio de las propiedades durante la congelación. El agua total en alimentos congelados consiste de tres fracciones: agua líquida congelable, agua líquida ligada no congelada y agua congelada, i.e. hielo, pero durante la congelación es la suma del agua congelada y la no congelada (Wang & Weller, 2006).

1.1.3. Densidad

La densidad del agua en estado sólido es menor que la del agua líquida; por lo tanto la densidad de un alimento congelado será menor que cuando no lo está. El cambio es proporcional a la humedad del producto (Singh, 2003). La densidad del agua disminuye durante el cambio de fase de líquido a sólido desde el punto inicial de congelación, en el que influye notablemente sobre el producto (Heldman, 1982). La influencia de la congelación es pequeña, pero cambia significativamente por abajo de la temperatura inicial de congelación (Heldman & Lund, 2007).

1.1.4. Conductividad térmica

En el hielo, esta propiedad es cuatro veces mayor que la del agua en estado líquido, esto es, a 0 °C el hielo tiene una conductividad térmica de 2.25 W/m·K, mientras que a la misma temperatura en estado líquido es de 0.55 W/m·K; a 20 °C su valor es 0.59 W/m·K (Nesvadba, 2008). Considerando que en un alimento el cambio de fase del agua es gradual, la conductividad lo hace de manera similar (Singh, 2003). Un incremento moderado ocurre a temperaturas por debajo del punto inicial de congelación, en relación con el aumento de la conductividad térmica del hielo a bajas temperaturas (Heldman, 1982). Esta propiedad representa la capacidad de un alimento para conducir el calor (Wang & Weller, 2006).

1.1.5. Entalpía

La entalpía o contenido de energía térmica de un alimento congelado es una combinación del calor sensible y del calor latente. La contribución del calor sensible está relacionada con los cambios de temperatura, mientras que el calor latente está directamente relacionado con la fracción de agua congelada en el producto. (Heldman, 1982). Es la energía térmica contenida por unidad de masa de un alimento. Es conveniente usarla para cuantificar la energía en alimentos congelados debido a que es complicado separar el calor latente del calor sensible mientras exista agua no congelada en los alimentos a muy baja temperatura (Wang & Weller, 2006).

1.1.6. Calor latente

El calor latente es la cantidad de energía térmica liberado o absorbido a una temperatura específica cuando una unidad de masa de alimento se transforma de un estado a otro (Wang & Weller, 2006).

1.1.7. Calor específico aparente

Debido a que la eliminación de calor latente ocurre en un intervalo de temperaturas, el calor específico de un alimento congelado incluye la porción del calor latente en el contenido de calor o entalpía, lo cual resulta en el calor específico aparente. Este varía con la temperatura (Heldman, 1982) y disminuye a medida que la temperatura también lo hace (Wang & Weller, 2006).

1.1.8. Difusividad térmica aparente

Esta propiedad aumenta al disminuir la temperatura por debajo del punto inicial de congelación del producto (Singh, 2003). Es usada en la determinación de la velocidad de transferencia de energía térmica en un alimento de cualquier forma

geométrica. Físicamente expresa la habilidad del material para conducir y almacenar energía térmica. La difusividad aparente, α , de un alimento congelado se calcula a partir de los valores de conductividad térmica, k , densidad, ρ , y el calor específico, C_p , con la siguiente ecuación:

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (1)$$

Cualquier error relacionado con los valores empleados genera errores en la estimación de la difusividad térmica. El valor promedio para alimentos no congelados es de $1.3 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ y para alimentos congelados de $4 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ (Wang & Weller, 2006); para hielo a $0 \text{ }^\circ\text{C}$ es de $1.14 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ (Berk, 2009).

1.1.9. Coeficiente de transferencia convectiva de energía térmica

Este coeficiente es un parámetro de transferencia de energía térmica difícil de medir, en consecuencia produce la mayor fuente de error en la estimación de los tiempos de congelación (Hung, 1990). No es una propiedad intrínseca del alimento, pero refleja las condiciones entre el alimento y el medio de enfriamiento. La incertidumbre en este parámetro es mayor que en las propiedades térmicas (Nesvadba, 2008). En la congelación por aire frío, la velocidad de transferencia de energía térmica del alimento al medio depende de la velocidad de movimiento del medio de enfriamiento, la forma del alimento y su espesor, entre otros. Para la congelación por convección natural h tiene un valor entre 6 a $20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ (Nesvadba, 2008).

1.5. Tiempo de congelación

Los tiempos de congelación son criterios básicos de diseño para sistemas de congelación y representan el tiempo de residencia necesario para que el alimento permanezca dentro del sistema de congelación hasta alcanzar el nivel deseado de congelación. La definición más aceptada de tiempo de congelación indica que es

el tiempo requerido para reducir la temperatura del producto desde una magnitud inicial hasta una temperatura final establecida en el sitio más lento de enfriamiento (Heldman & Lund, 2007). Este tiempo establece la capacidad del sistema para asegurar la calidad del alimento congelado. El método para calcularlo depende del sistema de congelación adecuado para cada producto (Singh, 2003).

1.5.1. Cálculo del tiempo de congelación

La cinética de congelación ha sido ampliamente estudiada y matemáticamente definida como el proceso de conducción de energía térmica con cambio de fase (Pardo; Niranjana, 2006). Los métodos para estimar tiempos de congelación son de dos tipos: fórmulas simples o métodos analíticos y métodos numéricos (Cleland; Valentas, 1997). El cálculo de tiempos de congelación es el primer paso en el diseño de un sistema de congelación de alimentos. El tiempo de congelación establece el tiempo de residencia del producto en el sistema. La temperatura final del producto está establecida como la magnitud necesaria para mantener la calidad óptima del producto durante el almacenamiento (Heldman & Lund, 2007). Los métodos para estimar tiempo de enfriamiento y de congelación pueden dividirse en dos grupos: métodos analíticos y numéricos. Los métodos analíticos están derivados sobre supuestos de ingeniería razonables, al usar el modelo de cambio de fase, y empíricos que han resultado ser precisos en muchas situaciones y más sencillos de emplear con algunas suposiciones restrictivas. Estos métodos tienen las ventajas de ser simples, fáciles de entender, requerir pocos datos térmicos comparados con los métodos numéricos y una amplia disponibilidad. Los métodos numéricos son abstracciones matemáticas del complejo problema de transferencia de energía térmica, el cual se resuelve mediante computadoras de alta velocidad. Éstos generalmente predicen el tiempo de congelación con mayor exactitud que los métodos analíticos y también proporcionan la información tiempo-temperatura del proceso completo. Sin embargo, los métodos numéricos son más complejos que los analíticos y requieren mayor conocimiento del producto y del proceso y un esfuerzo sustancial

para aplicarlos (Cleland; Valentas, 1997; Hung, 1990). Se han propuesto un gran número de fórmulas de estimación. La mayoría se basan en la ecuación de Plank, la cual es una solución analítica de una versión simplificada del único modelo de cambio de fase (Cleland; Valentas, 1997).

1.5.2. Ecuación de Plank

La primera ecuación para estimar el tiempo de congelación fue propuesta por R. Plank, y sólo es aplicable para el periodo de cambio de fase del proceso de congelación (López-Leyva & Hallström, 2003). Fue derivada basándose en el principio de balance de energía y la conducción de energía térmica a través de la región congelada (Mittal, 2006). La solución analítica de Plank es reconocida como la primera ecuación propuesta para estimar tiempos de congelación. Se basa en dos suposiciones: a) el objeto está inicialmente en su punto de congelación y b) hay una temperatura constante en la región no congelada. Estas suposiciones implican que cada capa en la región no congelada permanece a temperatura constante hasta que se alcanza el frente de congelación. Además, el modelo de Plank emplea la transferencia convectiva de energía térmica como una condición límite. El modelo de Plank ha sido empleado para diferentes geometrías básicas, la solución general es:

$$F = \frac{\rho \Delta H_f}{T_f - T_a} \left(P \frac{d}{h} + R \frac{d^2}{k} \right) \quad (2)$$

En esta ecuación, P y R son constantes geométricas cuyos valores cambian de acuerdo con la forma de la muestra. Para una placa $P = 1/2$, $R = 1/8$; para un cilindro $P = 1/4$, $R = 1/8$ y para una esfera $P = 1/6$ y $R = 1/24$ (Pardo; Niranjana, 2006). F es el tiempo de congelación (s), ρ es la densidad del alimento (kg/m^3), ΔH_f es el cambio de entalpía durante la congelación (J/kg), T_f es el punto inicial de congelación ($^{\circ}\text{C}$), T_a es la temperatura del medio de congelación ($^{\circ}\text{C}$), d es el espesor de la muestra (m), h es el coeficiente de transferencia convectiva de

energía térmica ($W/m^2 \cdot ^\circ C$) y k es la conductividad térmica del alimento congelado ($W/m \cdot ^\circ C$).

Sin embargo, otras suposiciones inherentes a la ecuación de Plank son que la capacidad calorífica de la región no congelada y de la congelada son insignificantes comparadas con el efecto del calor latente. Las versiones de la ecuación de Plank han sido derivadas analíticamente para cilindros infinitos, esferas y paralelepípedos finitos, pero debido a su aproximación analítica no es útil en productos con geometrías complejas (Singh; Heldman, 2009). Lo anterior significa que la ecuación de Plank no es un método de estimación exacto en sí mismo. No obstante su valor es doble; primero por su fundamento como método empírico y segundo porque puede mostrar el efecto relativo de las variables de proceso. Para el diseño actual de un congelador se requiere mayor exactitud así como considerar los efectos del calor sensible, el resto de las limitaciones del modelo único del frente de cambio de fase y el resto de geometrías posibles (Valentas *et al.*, 1997).

1.5.2.1. Ecuaciones modificadas de Plank

1.5.2.1.1. Ecuación de Rjutov

A partir de análisis teóricos y experimentos, Rjutov obtuvo una ecuación modificada de Plank que incluye el periodo de pre-enfriamiento y el de subenfriamiento, i.e. antes y después del periodo de cambio de fase, respectivamente. Es una ecuación para estimar el tiempo del proceso completo (López-Leyva & Hallström, 2003).

$$F_{\text{eff}} = F \left[1 + R_j (T_i - T_f) \right] + 0.266 \left(\frac{d^2}{\alpha} \right) \frac{1}{Bi^{0.05}} \left(1 + \frac{4}{Bi} \right) \times \left(\ln \frac{T_f - T_a}{T_e - T_a} - 0.0913 \right) \quad (3)$$

En esta ecuación F_{eff} es el tiempo total de congelación (tiempo de congelación efectivo), F es el tiempo de congelación de acuerdo con Plank, R_j es el coeficiente de Rjutov, Bi es el número de Biot, α es la difusividad térmica del alimento en estado congelado (m^2/s), T_e es la temperatura final del alimento congelado ($^\circ C$) y

T_a es la temperatura del medio de congelación ($^{\circ}\text{C}$). El número de Biot es un número adimensional que relaciona la resistencia interna y la resistencia externa de un objeto, el cual se expresa con la siguiente ecuación:

$$Bi = \frac{hd}{k} = \frac{\text{resistencia externa}}{\text{resistencia interna}} \quad (4)$$

Valores de Bi mayores de 40 indican que la resistencia externa para transferir la energía térmica es grande, mientras que un valor menor de 0.2 significa que el material tiene una resistencia interna pequeña para transferir energía térmica, esto es, que su conductividad térmica es alta (Singh, 2007).

1.5.2.1.2. Ecuación de Pham

Q. T. Pham modificó la ecuación de Plank, aunque en realidad la dedujo de la ecuación de Rjutov (López-Leiva & Hallström, 2003) bajo las siguientes consideraciones (Singh & Heldman, 2009):

- Las condiciones ambientales son constantes.
- La temperatura inicial, T_i , es constante.
- La temperatura final, T_c (del centro geométrico), está ajustada.
- La transferencia convectiva de energía térmica en la superficie está descrita por la ley de Newton de enfriamiento.

La ecuación (5) es el resultado de su trabajo:

$$F_{\text{eff}} = \frac{V_0}{h f_0} \left(\frac{\Delta H_1}{\Delta T_1} + \frac{\Delta H_2}{\Delta T_2} \right) \left(1 + \frac{Bi_s}{4} \right) \quad (5)$$

En esta ecuación V_0 es el volumen del alimento (m^3), h es el coeficiente de transferencia convectiva de energía térmica ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$), f_0 es el área de transferencia de energía térmica (m^2), Bi_s es el número de Biot en el estado congelado, ΔH_1 es el cambio de entalpía volumétrica para el periodo de preenfriamiento, ΔH_2 es el cambio de entalpía volumétrica para el cambio de fase y el periodo de subenfriamiento, ΔT_1 es el gradiente de temperatura para el periodo de

pre-enfriamiento y ΔT_2 es el gradiente de temperatura para el cambio de fase y el periodo de subenfriamiento.

El método de Pham divide el diagrama de congelación en dos partes mediante la temperatura promedio de congelación, T_{fm} , Figura 3.

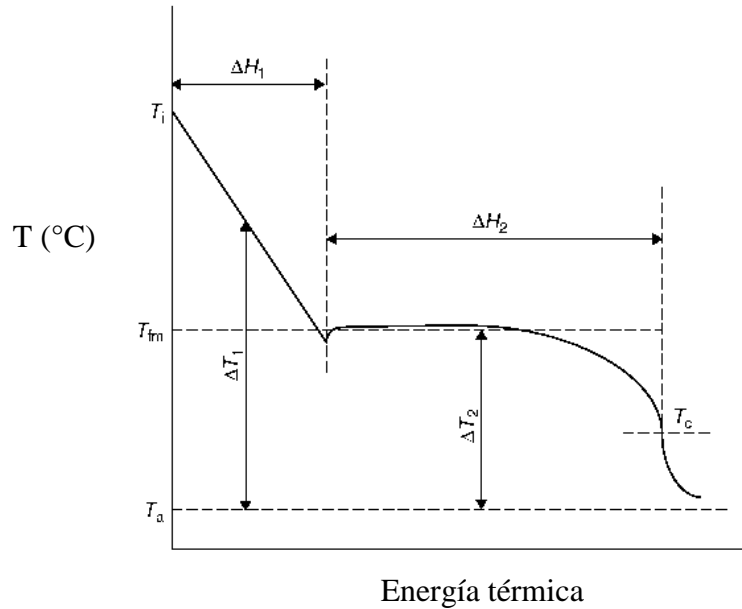


Figura 3. Proceso de congelación de alimentos dividido de acuerdo con el método de Pham (imagen modificada de Singh & Heldman, 2009).

Por arriba de T_{fm} se observa el periodo de pre-enfriamiento con un poco de cambio de fase. La otra parte corresponde al cambio de fase y el periodo hasta alcanzar la temperatura del medio de enfriamiento. La ecuación (6) es la única ecuación empírica que emplea T_{fm} , la cual es válida para la mayoría de los materiales biológicos (Singh & Heldman, 2009)

$$T_{fm} = 1.8 + 0.263T_c + 0.105T_a \quad (6)$$

En esta ecuación T_{fm} es la temperatura promedio de congelación obtenida por Q. T. Pham, T_c es la temperatura final del centro geométrico ($^{\circ}\text{C}$) y T_a es la temperatura del medio de enfriamiento ($^{\circ}\text{C}$).

1.5.2.1.3. Ecuación de Levy

Levy también desarrolló una ecuación para calcular el tiempo total de congelación. En esta ecuación el cambio de entalpía durante el cambio de fase que usa la ecuación original de Plank, ΔH_f , es reemplazada por el cambio total de entalpía del proceso completo (López-Leyva & Hallström, 2003).

$$F_{\text{eff}} = F \left(\frac{\Delta H_{\text{PR}}}{\Delta H_f} \right) [1 + 0.008(T_i - T_f)] \quad (7)$$

En esta ecuación F_{eff} es el tiempo total de congelación (tiempo de congelación efectivo), F es el tiempo de congelación de acuerdo con Plank, ΔH_{PR} es el cambio de entalpía durante el proceso completo (J/m^3) y ΔH_f es el cambio de entalpía durante la congelación (J/kg).

1.5.2.1.4. Ecuación de López-Leyva y Hallström

Esta ecuación solo estima el tiempo de congelación

$$F = \frac{(\rho \Delta H_f) d}{h(T_f - T_a)} P \left(1 + \frac{\text{Bi}}{3,7} \right) \quad (8)$$

Aquí F es el tiempo de congelación de acuerdo con Plank (s), ρ es la densidad del alimento (kg/m^3), ΔH_f es el cambio de entalpía durante la congelación (J/kg), T_f es el punto inicial de congelación ($^{\circ}\text{C}$), T_a es la temperatura del medio de congelación ($^{\circ}\text{C}$), d es el espesor de la muestra (m), h es el coeficiente de transferencia convectiva de energía térmica ($\text{W/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$) y P es el parámetro de geometría del alimento en la ecuación de Plank.

1.5.3. Factores que afectan la estimación de cálculo

La exactitud para estimar tiempos de congelación depende de la precisión del método de estimación, de las incertidumbres de los datos usados para representar las condiciones dentro del congelador y de la selección de las propiedades físicas y térmicas involucradas. Algunos métodos requieren los datos térmicos en el

intervalo completo de temperatura y son en consecuencia sensibles a la inexactitud de los mismos. En contraste, otros métodos sólo requieren datos térmicos en un parte del intervalo de temperatura. Estos métodos algunas veces suelen ser más exactos que aquellos que requieren datos térmicos en todo el intervalo de temperatura ya que evitan aquellos datos que están sujetos a incertidumbres considerables. Por lo tanto, no es posible separar por completo los efectos de la inexactitud del método de estimación e incertidumbre de los datos.

1.5.3.1. Datos térmicos

Como es evidente en la ecuación de Plank, diferentes propiedades termodinámicas tienen una influencia directa sobre la estimación del tiempo de congelación. Estas propiedades incluyen: el coeficiente de transferencia convectiva de energía térmica, la entalpía del alimento congelado, el punto inicial de congelación, la conductividad térmica y la densidad del alimento.

1. Coeficiente de transferencia convectiva de energía térmica. Es el parámetro de transferencia de energía térmica más complicado de medir. La influencia de este coeficiente sobre los tiempos de congelación tanto como sobre los factores involucrados en la medición han sido discutidos por Cleland & Earle (1976a). Este coeficiente puede ser medido directamente, estimado por el método de penetración de energía térmica, estimado considerando la temperatura de superficie o identificado por el método de superficie.
2. Entalpía del alimento congelado. Esta entalpía es una combinación del calor sensible y el calor latente. La entalpía total es función de la temperatura y una evaluación de su valor a una temperatura dada debe involucrar la integración sobre los límites apropiados. El cálculo de la entalpía es complicado porque el agua de un alimento no congela a una sola temperatura. No toda el agua está completamente congelada al final de la congelación. La relación entre la fracción de agua congelada y la temperatura puede emplearse para determinar la energía térmica eliminada durante la congelación y puede ser usada como una característica básica para el cálculo de diseño del proceso de congelación.

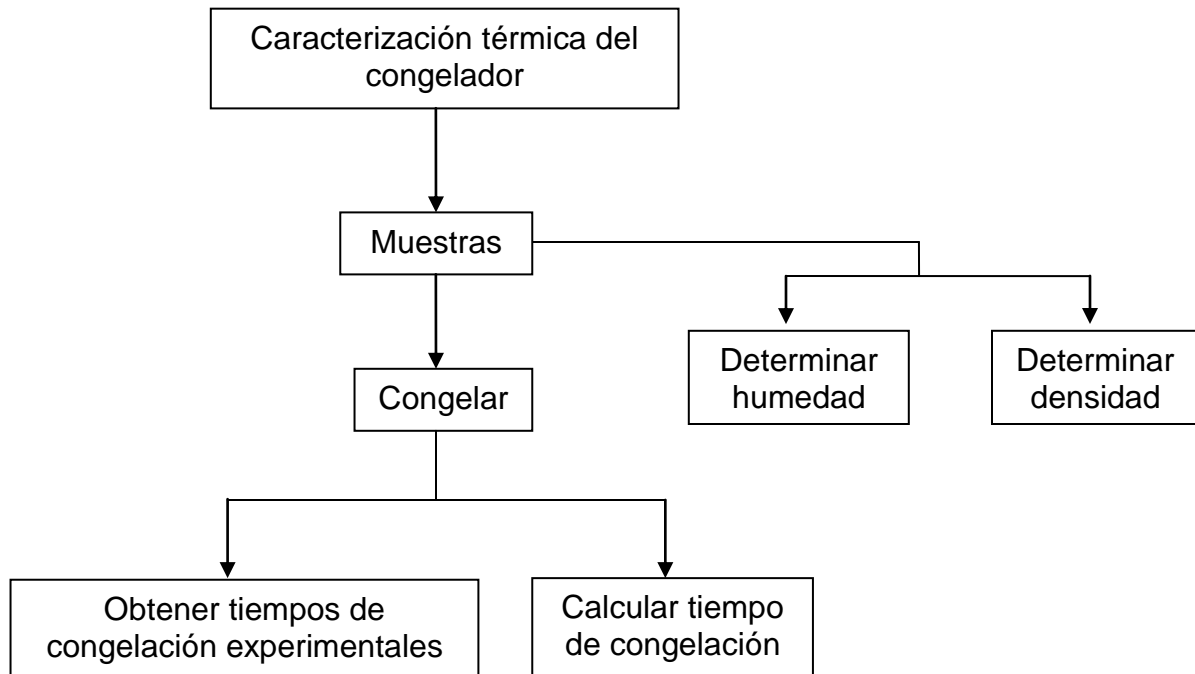
La cantidad de agua no congelada puede determinarse por análisis diferencial térmico o estimada usando el punto de congelación.

3. Punto inicial de congelación. En la ecuación de Plank la diferencia entre la temperatura inicial de congelación y la temperatura del medio de congelación afecta significativamente la estimación de tiempo de congelación. La temperatura inicial de congelación puede determinarse a partir de datos de congelación o de datos experimentales.
4. Conductividad térmica. Los errores en esta propiedad afectan el tiempo de estimación matemáticamente. Sin embargo, los errores en la conductividad térmica del alimento no congelado no influyen significativamente en la estimación del tiempo de congelación. Su valor para el hielo es cuatro veces mayor que para el agua no congelada. Por lo tanto, el valor de la conductividad térmica cambia con el cambio de fase.
5. Densidad. La densidad cambia significativamente durante la congelación. Sin embargo, la influencia de la congelación sobre la densidad del producto puede ser bien estimada. También la influencia del cambio de la densidad sobre la estimación del tiempo de congelación puede no ser significativa.
6. Otros. Cuando se comparan los modelos de estimación con las temperaturas experimentales, la ubicación del sensor de temperatura dentro del alimento es crítica. Sin embargo, es difícil advertir que el sensor se encuentre propiamente colocado (Hung, 1990).

CAPÍTULO II

METODOLOGÍA

2.1 Diagrama general



2.2 Materiales

Agua destilada, carne molida de res (pierna o bola), pasta de hojaldre comercial, zanahorias crudas (*Daucus carota* L.) y guayabas (*Psidium guajava* L.).

2.3 Métodos

Antes de congelar se caracterizó el equipo, después se seleccionaron diferentes alimentos con geometrías diversas, se obtuvieron los tiempos de congelación del cambio de fase y del proceso completo de congelación. Además, se determinó la humedad y la densidad de cada muestra. Se empleó la ecuación de Plank y cuatro ecuaciones modificadas de la misma para estimar el tiempo de congelación y el

del proceso completo. Finalmente, se compararon los tiempos experimentales con los calculados con los diferentes modelos para establecer la ecuación con mayor aproximación a los tiempos experimentales de congelación.

2.3.1. Caracterización del equipo

El equipo es un congelador comercial (Thermo Scientific modelo 3556-4, Thermo Electron, Iowa, USA) de 5.6 pies cúbicos de capacidad con dimensiones interiores de 70 cm de altura, 46 cm de ancho y 38 cm de fondo (Figura 4).



Figura 4. Cámara de congelación con las zonas superior, central e inferior.

El espacio está dividido por parrillas que separan la cámara en tres secciones denominadas aquí superior, central e inferior. El congelador cuenta con un termostato provisto de una perilla numerada de 1 a 7 con la cual se regula la temperatura en su interior (Figura 5). En el manual del equipo no se especifica a qué temperatura de la cámara corresponde cada uno de los números, por ello fue necesario determinarla experimentalmente. En consecuencia, los perfiles de enfriamiento se determinaron para todas las posiciones de la perilla del termostato. La temperatura fue medida con un termistor digital (Cole Parmer modelo 8502-16, Chicago, USA) (Figura 6) al cual se conectaron termistores de

bayoneta por medio de plugs tipo audifono (Figura 7). Se usaron tres termistores colocados en las diferentes secciones de la cámara con el propósito de determinar el perfil de enfriamiento del congelador en diferentes zonas.



Figura 5. Termostato de la cámara de congelación.

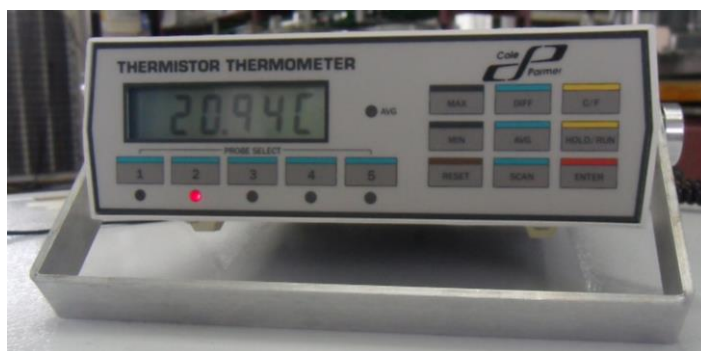


Figura 6. Termistor digital.

2.3.2. Determinación de humedad

La humedad de la carne molida de res fue determinada por triplicado con el método oficial AOAC Official Method 950.46 Moisture in Meat, en un horno con control de temperatura (Barnstead/Lab-Line modelo 3608 serie 1104-8043, Illinois, USA). La humedad de la pasta de hojaldre, zanahoria y guayaba fue determinada

por el método de secado en estufa a 100 °C por 2 horas, entre 90-107 °C por 4 horas y entre 110-109 °C por 3 horas, respectivamente.



Figura 7. Termopares conectados al termistor.

2.3.3. Determinación de densidad

La densidad de todas las muestras fue determinada por desplazamiento de volumen con una probeta Kimax, 50 mL y una balanza (Adventurer, OHAUS, China). En el caso de la guayaba, se determinó a temperatura ambiente y a temperatura de congelación.

2.3.4. Congelación

Una vez determinados los perfiles de enfriamiento de la cámara, se procedió a congelar los alimentos; la carne molida en forma de placa, el agua en forma de placa, la pasta de hojaldre en forma cilíndrica y en placa, las zanahorias y las guayabas en su forma natural. Con base en el comportamiento térmico del congelador en las diferentes posiciones de la perilla del termostato, se decidió trabajar para todas las muestras en la posición 3, la cual permite alcanzar una temperatura mínima aproximada de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

2.3.4.1. Placas de carne molida

Se usaron 200 g de carne molida fresca en forma de placa de 13 cm x 13 cm x 1 cm. Una placa de carne se colocó sobre una hoja de papel aluminio (Al), otra sobre espuma de poliuretano (EPU) y una tercera en el interior de una bolsa de polietileno resellable tipo Ziploc (BR). Un termistor se ubicó en el centro geométrico de cada placa. Adicionalmente, se usó una masa de 60 g de agua líquida en un vaso de precipitados para obtener su perfil de congelación (Figura 8).



Figura 8. Carne molida de res en placa antes de ser congelada.

2.3.4.2. Agua

Se congelaron entre 150 y 160 g de agua en forma de placa en charolas de aluminio (Tabla 1). Las Figuras 9 y 10 muestran la posición del termopar en cada prueba.

2.3.4.3. Pasta de hojaldre

Se moldearon entre 40 y 45 g de pasta de hojaldre en forma cilíndrica y 40 g de agua como control contenida en un vaso de precipitados. Se realizó una repetición con 90 y 100 g de pasta de hojaldre en forma de placa y 100 g de agua aproximadamente también en forma de placa como control (Tabla 1).

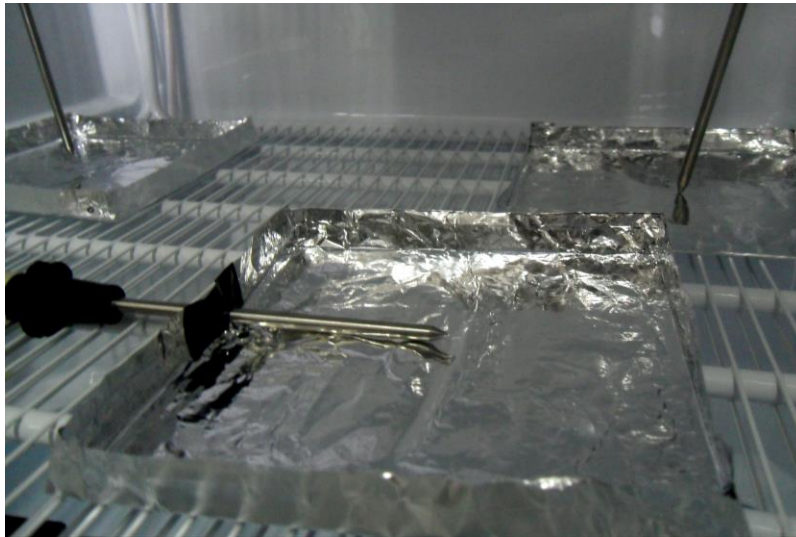


Figura 9. Congelación de agua destilada en placa con termopar en posición transversal en el centro térmico.

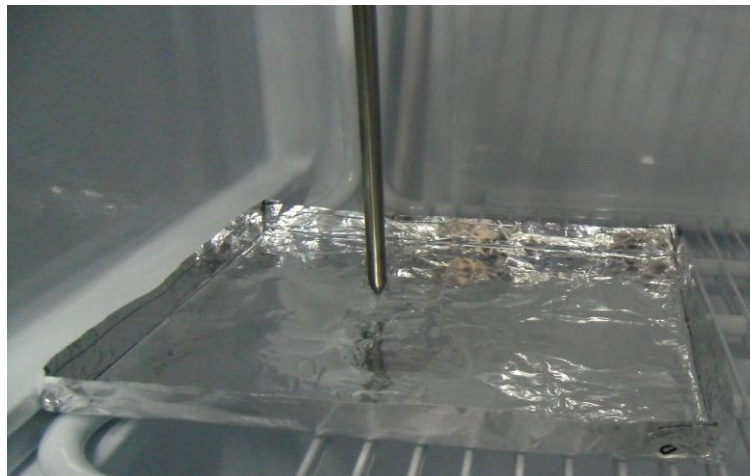


Figura 10. Congelación de agua destilada en placa con termopar en posición perpendicular en el centro térmico.

2.3.4.4. Zanahorias

Se congelaron entre 18 y 26 g de zanahorias y aproximadamente 18 g de agua en un vaso de precipitados (Tabla 1). En la primera prueba, se esperó a que el medio de enfriamiento llegara a su temperatura mínima en la posición 3, la cual fue en promedio $-19.13\text{ }^{\circ}\text{C}$.

2.3.4.5. Guayabas

Se congelaron entre 43 y 50 g de guayabas y agua en un vaso de precipitados como control (Tabla 1). En la segunda prueba, se esperó que el medio de enfriamiento llegara a su temperatura mínima en la posición 3, la cual fue en promedio de $-19.06\text{ }^{\circ}\text{C}$. El termopar se colocó en el centro geométrico. La Tabla 1 muestra las dimensiones y características de cada alimento que se congeló.

2.3.4.6. Determinación del punto inicial de congelación

El punto de congelación de un alimento puede determinarse a partir de una curva de congelación (Wang & Weller, 2006). En este trabajo se consideró el punto inicial de congelación como aquel inmediato al terminar el primer periodo de enfriamiento.

2.3.4.7. Determinación del tiempo de congelación experimental

Delimitar el tiempo de congelación de modo gráfico a partir del perfil térmico para agua es sencillo debido a que su temperatura inicial de congelación (T_f) permanece constante durante el periodo de congelación. Sin embargo, esto no es así para un alimento ya que su T_f disminuye con el tiempo para el mismo periodo, debido a que el agua no congelada se hace cada vez más concentrada en solutos con la consecuente variación decreciente de la temperatura durante el cambio de

fase. Por esto, para determinar el tiempo de congelación experimental, se hizo una regresión lineal sobre los valores de temperatura que mostraron un comportamiento casi lineal hasta obtener la mejor correlación para cada muestra de alimento, un ejemplo se muestra en la Figura 11.

Tabla 1. Dimensiones de las muestras de alimentos congelados.

Alimento	Muestra	Forma	Masa (g)	Dimensiones (m)	Espesor (m)
Carne molida de res	BR-1	Placa	259.76	0.16 x 0.17	0.01
	Al-1	Placa	120.54	0.11 x 0.12	0.01
	BR-2	Placa	283.87	0.14 x 0.18	0.01
	EPU-2	Placa	179.38	0.12 x 0.13	0.01
	A-2	Cilindro	39.46	h = 0.0342 d = 0.0397	0.0397
	BR-3	Placa	209.44	0.13 x 0.14	0.01
	EPU-3	Placa	201.98	0.14 x 0.14	0.01
	Al-3	Placa	202.86	0.14 x 0.14	0.009
Agua destilada	A-3	Placa	60.02	h = 0.0361 d = 0.0472	0.0472
	AT I	Placa	156.62	0.13 x 0.13	0.01
	AP	Placa	163.48	0.13 x 0.13	0.01
Pasta de hojaldre	AT II	Placa	160.87	0.13 x 0.13	0.01
	PH-I	Cilindro	45.71	h = 0.0397 d = 0.0385	0.0385
	PH-II	Cilindro	40.58	h = 0.0385 d = 0.0343	0.0343
	PH-III	Cilindro	41.33	h = 0.0336 d = 0.0374	0.0374
	A	Cilindro	40.96	h = 0.0367 d = 0.0350	0.0350
	PH-I	Placa	101.82	0.080 x 0.084	0.01
	PH-II	Placa	91.71	0.083 x 0.085	0.01
	PH-III	Placa	99.17	0.083 x 0.083	0.01
Zanahorias	A	Placa	104.83	0.082 x 0.082	0.01
	Z I	Cilindro	18.77	h = 0.0730 d = 0.0182	0.0182
	ZII	Cilindro	21.84	h = 0.0700 d = 0.0198	0.0198
	ZIII	Cilindro	21	h = 0.0697 d = 0.0187	0.0187
	A	Cilindro	18.01	h = 0.0170 d = 0.0383	0.0383
	Z a	Cilindro	35.35	h = 0.0764 d = 0.0244	0.0244
	Z b	Cilindro	29	h = 0.0759 d = 0.0220	0.0220
	Z c	Cilindro	26.06	h = 0.0758 d = 0.0207	0.0207
Guayabas	A	Cilindro	27.47	h = 0.0252 d = 0.0378	0.0378
	G a	Esfera	64.38	d = 0.0522	0.0522
	G b	Esfera	59.33	d = 0.0538	0.0538
	G c	Esfera	59.06	d = 0.0519	0.0519
	A	Cilindro	50.02	h = 0.0444 d = 0.0378	0.0378
	G d	Esfera	51.81	d = 0.0467	0.0467
	G e	Esfera	52.29	d = 0.0479	0.0479
	G f	Esfera	53.97	d = 0.0508	0.0508
A	Cilindro	43.27	h = 0.0384 d = 0.0388	0.0388	

h = altura, d = diámetro

A= agua control; Al=aluminio; BR= bolsa resellable; EPU= espuma de poliuretano; G= guayaba; T= termopar en posición transversal; P= termopar en posición perpendicular; PH= pasta de hojaldre; Z= zanahoria; a, b, c, d, e, f, I, II, III, 1, 2, 3= muestras.

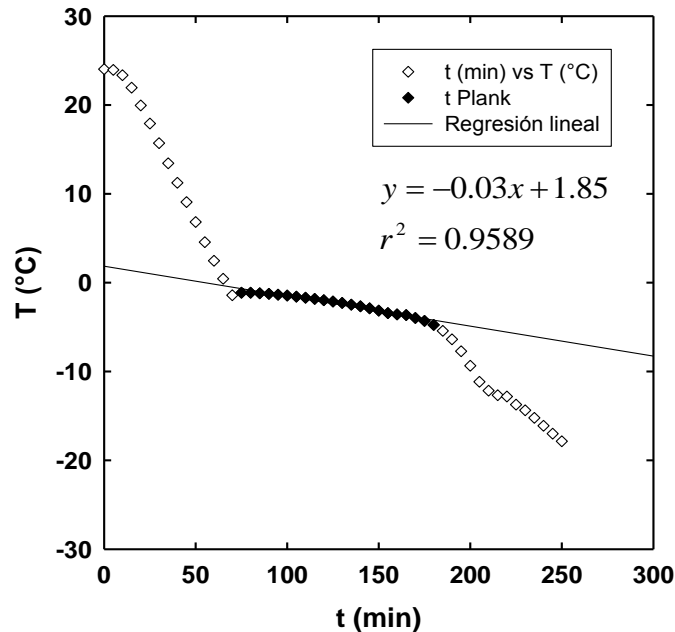


Figura 11. Historia térmica del proceso de congelación de carne molida BR-2. Los símbolos llenos señalan el tiempo de congelación experimental

2.3.5. Cálculo de las propiedades térmicas

Para calcular las propiedades térmicas y la densidad: ρ , k , y C_p se usaron las ecuaciones de Choi y Okos (Heldman & Lund, 2007), las cuales requieren la composición del alimento y la temperatura. La composición se consultó en la literatura y en sitios de internet, la Tabla 2 muestra los valores de composición de cada alimento que se congeló en este trabajo.

Tabla 2. Composición (g/100 g) de los alimentos (Heldman & Lund, 2007).

Componente	Carne de res	Pasta de hojaldre*	Zanahoria	Guayaba
Humedad	74.00	33.52	90.7	78
Proteína	21.45	3.58	1.1	0.9
Grasa	3.56	35.74	---	---
Cenizas	0.99	0.57	0.9	2.2
Carbohidratos	---	25.06	7.2**	10.4**
Fibra	---	1.53	---	8.5

*dietas.net; **incluye fibra dietética

2.3.5.1. Densidad

La densidad de los componentes de cada alimento congelado fue calculada a partir de las ecuaciones de Choi y Okos (Heldman & Lund, 2007) en función de la temperatura. La densidad de los componentes del alimento corresponde con la forma de la ecuación (9)

$$\rho = A + BT \quad (9)$$

Para el agua corresponde con la ecuación (10)

$$\rho = a + bT + cT^2 \quad (10)$$

La Tabla 3 muestra los valores de los coeficientes de las ecuaciones (9) y (10).

Tabla 3. Valores de los coeficientes para calcular la densidad para cada componente.

	A	B	A	b	c
Proteína	$1.3299 \cdot 10^3$	$-5.1849 \cdot 10^{-1}$			
Grasa	$9.2559 \cdot 10^2$	$-4.1757 \cdot 10^{-1}$			
Cenizas	$2.4238 \cdot 10^3$	$-2.8063 \cdot 10^{-1}$			
Hielo	$9.1689 \cdot 10^{-2}$	$-1.3071 \cdot 10^{-1}$			
Agua			$9.9718 \cdot 10^2$	$3.1439 \cdot 10^{-3}$	$-3.7574 \cdot 10^{-3}$

2.3.5.2. Conductividad térmica (k)

La conductividad térmica de los componentes de carne molida de res congelada fue calculada con las ecuaciones de Choi y Okos (Heldman & Lund, 2007) en función de la temperatura. La conductividad térmica de los componentes del alimento se calculó con la ecuación (11) con los coeficientes mostrados en la Tabla 4.

$$k = D + ET + FT^2 \quad (11)$$

Tabla 4. Valores de los coeficientes para calcular k para cada componente.

Componente	D	E	F
Proteína	$1.7881 \cdot 10^{-1}$	$1.1958 \cdot 10^{-3}$	$-2.7178 \cdot 10^{-6}$
Grasa	$1.8071 \cdot 10^{-1}$	$-2.7064 \cdot 10^{-3}$	$-1.7749 \cdot 10^{-7}$
Cenizas	$3.2962 \cdot 10^{-1}$	$-1.4011 \cdot 10^{-3}$	$-2.9069 \cdot 10^{-6}$
Hielo	2.2196	$-6.2459 \cdot 10^{-3}$	$1.0154 \cdot 10^{-4}$
Agua	$5.7109 \cdot 10^{-1}$	$1.7625 \cdot 10^{-3}$	$-6.7063 \cdot 10^{-6}$

2.3.5.3. Calor específico (Cp)

2.3.5.3.1. Cp_s

El Cp_s del alimento se calculó con las correlaciones de Choi y Okos (Heldman & Lund, 2007) en función de la composición del alimento con los valores de los coeficientes mostrados en las Tablas 5 y 6. El Cp_s de los componentes del alimento se calculó con la ecuación (12)

$$Cp_s = G + HT + IT^2 \quad (12)$$

Tabla 5. Valores de los coeficientes para calcular Cp_s para cada componente del alimento.

Componente	G	H	I
Proteínas	2.0082	$1.2089 \cdot 10^{-3}$	$-1.3129 \cdot 10^{-6}$
Grasas	1.9842	$1.4733 \cdot 10^{-3}$	$-4.8006 \cdot 10^{-6}$
Cenizas	1.0926	$1.8896 \cdot 10^{-3}$	$-3.6817 \cdot 10^{-6}$
Agua	4.0817	$-5.3062 \cdot 10^{-3}$	$9.9516 \cdot 10^{-4}$

El Cp_s de hielo del alimento se calculó con la ecuación (13)

$$Cp_s = J + KT \quad (13)$$

Tabla 6. Valores de los coeficientes para calcular Cp_s para hielo en un alimento.

Componente	J	K
Hielo	2.0623	$6.0769 \cdot 10^{-3}$

2.3.5.3.2. Cp_L

El calor específico del alimento no congelado, es decir a la temperatura inicial del alimento (T_i = 24.03 °C) se calculó con las ecuaciones de Choi y Okos (Heldman & Lund, 2007) en función de la temperatura. El calor específico de los componentes del alimento se calculó con la ecuación (14)

$$Cp = A + BT + CT^2 \quad (14)$$

En esta ecuación A, B y C son coeficientes y T es la temperatura en °C.

Tabla 7. Valores de los coeficientes para calcular el calor específico de cada componente.

Componente	A	B	C
Proteínas	2.0082	+1.2089·10 ⁻³	-1.3129·10 ⁻⁶
Grasas	1.9842	+1.4733·10 ⁻³	-4.8006·10 ⁻⁶
Cenizas	1.0926·10 ³	+1.8896·10 ⁻³	-3.6817·10 ⁻⁶
Hielo	2.0623	+6.0769·10 ⁻³	
Agua	4.1762	-9.0864·10 ⁻⁵	+5.4731·10 ⁻⁶

2.3.5.4. Difusividad térmica (α)

Conocidos C_{pS} , k y ρ se calculó la difusividad térmica empleando la ecuación

$$\alpha = \frac{k}{C_{pS} \rho} \quad (15)$$

En esta ecuación α es la difusividad térmica (m²/s), k es la conductividad térmica del alimento congelado (W/m·°C), C_{pS} es la capacidad calorífica del alimento congelado (kJ/kg·°C) y ρ es la densidad del alimento congelado (kg/m³).

2.3.5.5. Calor latente (ΔH_f)

Se empleó el método descrito en Ibarz y Barbosa-Cánovas (1999).

1. La fracción molar de agua en el punto de congelación (X_{apc}) se estimó con la ecuación

$$\ln X_{apc} = \frac{\beta}{R_g} \left[\frac{1}{T_{0A}} - \frac{1}{T_f} \right] \quad (16)$$

T_{0A} es la temperatura de congelación del agua pura (273 K), β es el calor latente de congelación del agua pura (6003 kJ/kmol = 333500 J/kg), R_g es la constante de gases (8.314 kJ/kmol·K) y T_f es la temperatura inicial de congelación del alimento.

2. La masa molecular equivalente de solutos (M_S) se calculó con la ecuación

$$X_{ai} = \frac{18X_S X_{apc}}{M_S (1 - X_{apc})} \quad (17)$$

Despejando M_s

$$M_s = \frac{18x_s X_{apc}}{x_{ai}(1 - X_{apc})} \quad (18)$$

x_s es la fracción másica de sólidos ($1 - x_{ai}$) y x_{ai} es la fracción másica inicial de agua.

3. Se calculó la fracción molar de agua no congelada (X_{anc}) con la ecuación (16) sustituyendo T_i por T_f (temperatura del medio de enfriamiento)

$$\ln X_{anc} = \frac{\beta}{R_g} \left[\frac{1}{T_{0A}} - \frac{1}{T_a} \right] \quad (19)$$

4. La fracción másica de agua no congelada (x_{anc}) se obtuvo con la ecuación (17) sustituyendo X_{apc} por X_{anc} :

$$x_{anc} = \frac{18x_s X_{anc}}{M_s(1 - X_{anc})} \quad (20)$$

5. La fracción másica de agua congelada (x_{ac}) se calculó con la ecuación (21)

$$x_{ac} = x_{ai} - x_{anc} \quad (21)$$

6. Finalmente, el cambio de entalpía durante la congelación (ΔH_f) se calculó con la fracción másica de agua congelada (x_{ac}) usando la ecuación (22)

$$\Delta H_f = x_{ac} \beta \quad (22)$$

2.3.5.6. Coeficiente de transferencia convectiva de energía térmica

2.3.5.6.1. Método de Ramaswamy y Tung (1981)

A partir de la ecuación de Plank (ecuación 2), se despeja h para obtener

$$h = \frac{Pd}{\left[\frac{F_{-10^{\circ}\text{C}} (T_f - T_a)}{\rho \Delta H_f} \right] - \frac{Rd^2}{k}} \quad (23)$$

-10 °C es el tiempo que tarda el alimento en llegar a -10 °C (Ramaswamy & Tung, 1981).

2.3.5.6.2. Método a partir de la ecuación de Plank con el tiempo de congelación experimental

Básicamente el proceso es el mismo que el anterior, excepto que F no es el tiempo para que el alimento llegue a -10 °C sino el tiempo experimental del cambio de fase (F_{exp}).

$$h = \frac{Pd}{\left[\frac{F_{\text{exp}} (T_f - T_a)}{\rho \Delta H_f} \right] - \frac{Rd^2}{k}} \quad (24)$$

2.3.6. Cálculo del tiempo de congelación empleando la ecuación de Plank

En la ecuación de Plank (ecuación 2) las variables conocidas son: forma geométrica, espesor, densidad a temperatura ambiente y los valores de P y R. A partir del perfil térmico se obtuvo T_f y T_a , ΔH_f se calculó de acuerdo con el método de Ibarz y Barbosa-Cánovas (1999) descrito previamente. El valor de k se calculó con las ecuaciones de Choi y Okos (Heldman & Lund, 2007).

$$F = \frac{\rho \Delta H_f}{T_f - T_a} \left(P \frac{d}{h} + R \frac{d^2}{k} \right)$$

2.3.7. Cálculo empleando la ecuación de Rjutov

En la ecuación de Rjutov (ecuación 3) las variables conocidas son F (tiempo de congelación experimental), $R_j = 0.0053$ para carne y 0.026 para el resto de los alimentos (López-Leyva & Hallström, 2003), T_i , T_f , T_e , T_a y d . Bi se calculó con la ecuación

$$Bi = \frac{hd}{k} \quad (25)$$

h es el coeficiente de transferencia convectiva de energía térmica ($W/m^2 \cdot ^\circ C$), d es una dimensión característica (la distancia más corta sobre la que ocurre la transferencia de energía térmica) y k es la conductividad térmica del alimento congelado ($W/m \cdot ^\circ C$).

2.3.8. Cálculo empleando la ecuación de Levy

En la ecuación de Levy (ecuación 7) se conocen F , T_i y T_f , ΔH_f se calculó previamente, ΔH_{PR} se calculó de acuerdo con el método descrito por Ibarz y Barbosa-Cánovas (1999) mediante la ecuación

$$\Delta H_{PR} = C_{pL}(T_i - T_f) + \Delta H_f + C_{pS}(T_f - T_e) \quad (26)$$

2.3.9. Cálculo empleando la ecuación de Pham

De acuerdo con la ecuación 5, se calculó el cambio de entalpía volumétrica para el periodo de pre-enfriamiento y el periodo posterior a éste. Además del gradiente de temperatura para ambos periodos se usa la temperatura promedio de congelación, la cual se calcula con una ecuación empírica obtenida por Pham (ecuación 27)

$$T_{fm} = 1.8 + 0.263T_c + 0.105T_a \quad (27)$$

T_{fm} es la temperatura promedio de congelación obtenida por Pham, T_c es la temperatura final del centro geométrico ($^\circ C$) y T_a es la temperatura del medio de enfriamiento ($^\circ C$).

Para ΔH_1

$$\Delta H_1 = \rho [C_{pL}(T_i - T_{fm})] \quad (28)$$

C_{pL} es la capacidad calorífica del alimento a T_i (J/kg·°C), T_i es la temperatura inicial del alimento (°C), T_{fm} es la temperatura promedio del alimento (°C) y ρ es la densidad del alimento a T_i (kg/m³).

Para ΔH_2

$$\Delta H_2 = \rho_S [\Delta H_f + C_{pS}(T_{fm} - T_e)] \quad (29)$$

C_{pS} es la capacidad calorífica del alimento a T_i (J/kg·°C), T_e es la temperatura final del alimento (°C), T_{fm} es la temperatura promedio del alimento (°C), ρ_S es la densidad del alimento a T_e (kg/m³) y ΔH_f es el calor latente de fusión del alimento (J/kg).

Para ΔT_1

$$\Delta T_1 = \frac{T_i - T_{fm}}{2} - T_a \quad (30)$$

T_i es la temperatura inicial del alimento (°C), T_{fm} es la temperatura promedio del alimento (°C) y T_a es la temperatura del medio de enfriamiento (°C).

Para ΔT_2

$$\Delta T_2 = (T_{fm} - T_a) \quad (31)$$

T_{fm} es la temperatura promedio del alimento (°C) y T_a es la temperatura del medio de enfriamiento (°C).

2.3.10. Cálculo empleando la ecuación de López-Leyva y Hallström

En la ecuación (8), se conocen todos los parámetros, los cuales han sido calculados anteriormente, excepto P que se calculó empleando la ecuación

$$P = \frac{V}{Ad} \quad (32)$$

2.3.11. Cálculo del porcentaje de error

Se empleó la ecuación (33) para calcular el porcentaje de error en todos los cálculos realizados

$$\% \text{ error} = \left(\frac{F_{\text{cal}} - F_{\text{exp}}}{F_{\text{exp}}} \right) 100 \quad (33)$$

2.3.12. Análisis de la sensibilidad de las ecuaciones

Para evaluar la sensibilidad de los parámetros involucrados en las ecuaciones para calcular el tiempo de congelación y el tiempo del proceso completo de congelación, se seleccionaron valores menores que los empleados en el cálculo de F_{cal} y F_{eff} , esto es, se redujeron los parámetros desde 10 hasta 90%. Se recalculó el tiempo de congelación para obtener F'_{cal} y F'_{eff} y se calculó el porcentaje de la diferencia de tiempos de congelación de la siguiente manera:

Para F'_{cal}

$$\% \Delta F = \left[\frac{(F_{\text{cal}} - F'_{\text{cal}})}{F'_{\text{cal}}} \right] 100 \quad (34)$$

Para F'_{eff}

$$\% \Delta F = \left[\frac{(F_{\text{cal}} - F'_{\text{eff}})}{F'_{\text{eff}}} \right] 100 \quad (35)$$

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Caracterización del congelador

La Tabla 8 muestra los resultados de la caracterización del congelador. En ella se muestran los tiempos promedio para alcanzar las temperaturas señaladas para las posiciones 1 a 7 de la perilla del termostato (Figura 5).

Tabla 8. Tiempos promedio (min) para alcanzar la temperatura señalada.

PP*	0 °C	-10 °C	-15 °C	-20 °C	-25 °C
1	22.3 ± 1.53 ^a	36.3 ± 1.53 ^b	47.3 ± 0.577 ^c	62.7 ± 0.577 ^d	n.a.
2	25.2 ± 2.26 ^a	39.8 ± 2.36 ^b	50.8 ± 1.44 ^c	68.0 ± 2.00 ^e	n.a.
3	22.7 ± 2.08 ^a	37.0 ± 1.73 ^b	47.7 ± 1.53 ^c	62.2 ± 1.04 ^d	n.a.
4	26.7 ± 3.06 ^a	40.5 ± 1.80 ^b	52.3 ± 1.53 ^c	71.7 ± 3.82 ^f	95 ⁺
5	25.3 ± 2.52 ^a	41.0 ± 4.36 ^b	51.3 ± 1.53 ^c	71.5 ± 4.09 ^f	107 ± 11.7 ^g
6	25.3 ± 3.33 ^a	41.0 ± 2.65 ^b	53.3 ± 0.577 ^c	71.7 ± 3.82 ^f	108 ± 10.9 ^g
7	23.0 ± 2.65 ^a	36.7 ± 2.89 ^b	47.0 ± 1.73 ^c	63.3 ± 3.82 ^d	94.7 ± 9.61 ^g

*Posición de la perilla; n.a. = No alcanzada; igual superíndice indica ausencia de diferencia significativa ($p < 0.05$); ⁺ Valor alcanzado únicamente en la zona central.

El tiempo promedio se obtuvo considerando los tiempos en la zona superior, central e inferior de la cámara de congelación (Figura 4). Por ejemplo, para la posición 1 de la perilla, el tiempo promedio para alcanzar una temperatura de 0 °C a partir de una temperatura ambiente de aproximadamente 20 °C (en $t = 0$ se encendió el congelador) fue 22.3 ± 1.53 min, lo cual muestra que en este caso la diferencia de tiempos entre las tres zonas de la cámara de congelación para alcanzar 0 °C fue aproximadamente 7%. Para una misma temperatura, no se observó diferencia significativa ($p < 0.5$) entre los tiempos para las diferentes posiciones en la perilla, excepto en tres casos para -20 °C; posiciones 1, 2 y 4 lo cual pudiera deberse a imprecisiones en la medición. No obstante, los datos

muestran claramente que un comportamiento homogéneo del congelador para las diferentes posiciones de la perilla del termostato.

La Figura 12 muestra la historia térmica de la temperatura interna promedio del congelador sin alimento para las posiciones mínima (1) y máxima (7) de la perilla del termostato.

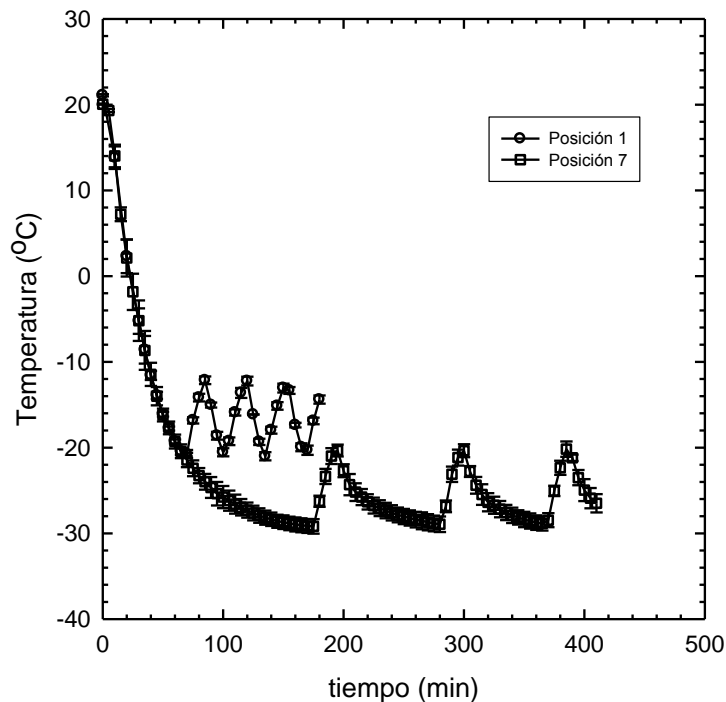


Figura 12. Perfiles típicos de enfriamiento de la cámara de congelación.

El descenso de temperatura desde la temperatura inicial hasta la temperatura mínima fue prácticamente igual para todas las posiciones. Esto implica que la velocidad de enfriamiento es independiente de la posición de la perilla. Por otro lado, la temperatura mínima alcanzada, antes de los ciclos de ascenso y descenso, sí depende de la posición seleccionada. Estas temperaturas fueron: -20.55 ± 0.47 , -21.47 ± 0.015 , -23.18 ± 0.79 , -26 ± 1.03 , -26.02 ± 0.84 , -27.79 ± 1.12 y -29.18 ± 0.85 °C para las posiciones 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7 de la perilla, respectivamente. La diferencia entre las posiciones extremas de la perilla, que también se aprecia en la Fig. 12, es evidente. Asimismo, el tiempo para alcanzar la temperatura mínima también fue diferente para cada posición como se muestra en

la Tabla 8. Una vez alcanzada esta temperatura mínima, el compresor del congelador se apaga y cuando la temperatura del aire en su interior aumenta el compresor se enciende. Entonces, los ciclos de encendido y apagado automáticos dan lugar a ciclos de ascenso y descenso de temperatura atribuibles a la transferencia de energía térmica que se establece de manera espontánea entre el aire ambiente y el aire en el interior del congelador, debida a la diferencia de temperaturas entre ambos medios.

3.2. Humedad y densidad de los alimentos por congelar

La Tabla 9 muestra la humedad y la densidad de los alimentos empleados. El contenido de humedad decreció en el orden zanahoria, guayaba, carne molida de res y pasta de hojaldre. El coeficiente de variación de la pasta de hojaldre fue muy grande posiblemente debido a una distribución no homogénea de la humedad en el material. Por ello, se tiene mayor incertidumbre en los cálculos de las propiedades térmicas de este material. La densidad fue del mismo orden de magnitud y decreció en el orden pasta de hojaldre, guayaba, zanahoria, carne molida con coeficientes de variación mayores para la guayaba y la pasta de hojaldre. Nuevamente esta última mostró mayor desviación estándar y podría no ser un material recomendable para las pruebas de congelación.

Tabla 9. Humedad y densidad de los alimentos examinados.

Alimento	Humedad (%)	CV (%)	Densidad (kg/m ³)	CV (%)
Zanahoria	91.1 ± 0.13	0.14	1019 ± 15.5	1.52
Guayaba	80.9 ± 0.44	0.54	1021 ± 65.6	6.42
Carne molida	73.4 ± 0.35	0.48	1003 ± 26.4	2.63
Pasta de hojaldre	33.0 ± 7.40	22.4	1071 ± 68.6	6.40

3.3. Temperaturas de los alimentos congelados

La Tabla 10 muestra las diferentes temperaturas de las distintas muestras trabajadas. La temperatura inicial, T_i , de las muestras fue en su mayoría cercana a 20 °C, con excepción de algunas muestras de zanahoria y guayaba, en las que el congelador ya estaba a su temperatura mínima antes de empezar la congelación del alimento. La temperaturas iniciales de congelación, T_f , para las pruebas en placa con agua destilada son cercanas a 0 °C y la pequeña desviación observada se explica por la presencia de sales disueltas en el agua destilada. La temperatura de congelación de la muestra AP fue -1.9 °C, debido a que la punta del termopar no alcanzó por completo su centro térmico (Figura 9). Sin embargo, la T_f promedio de las muestras de agua sola AT I, AT II y AP fue -0.65 ± 1.1 °C. Por otro lado, las referencias de agua (A) que se usaron con cada alimento mostraron una T_f promedio de -0.28 ± 0.13 °C ($n = 8$). Para los diferentes alimentos, la T_f promedio fue -1.25 ± 0.23 ($n = 9$), -4.67 ± 0.42 ($n = 6$), -3.57 ± 0.87 ($n = 6$) y -2.38 ± 0.11 °C ($n = 6$) para la carne de res, la pasta de hojaldre, la zanahoria y la guayaba, respectivamente. La diferencia en el valor promedio de T_f entre cada alimento se debe a su composición.

Para el agua destilada la temperatura final promedio, T_e , fue -19.98 ± 2.15 °C ($n = 3$), para las muestras de agua usadas como referencia con el resto de los alimentos fue -17.47 ± 0.99 °C ($n = 8$). Los valores para carne molida de res y pasta de hojaldre fueron, respectivamente, -18.95 ± 1.44 ($n = 7$) y -20.38 ± 2.07 °C ($n = 6$). Este último valor tiene una desviación estándar mayor debido a que en las pruebas realizadas para una geometría de placa la temperatura final descendió un poco más debido a la capacidad de transferencia de energía térmica del aluminio de la charola en la que fueron colocadas las muestras. Para la guayaba y la zanahoria T_e promedio fue, respectivamente, -17.65 ± 0.36 ($n = 6$) y -18.54 ± 0.63 °C ($n = 6$). Estas desviaciones aumentan la incertidumbre en la estimación de las propiedades térmicas y los cálculos con las diferentes ecuaciones.

La temperatura promedio del medio de enfriamiento, T_a , fue -18.88 ± 0.34 °C ($n = 36$). En algunos casos T_a fue menor que T_e de las muestras, principalmente en

aquellas en las cuales se usaron charolas de aluminio, e.g. carne molida y pasta de hojaldre.

Tabla 10. Temperaturas de todas las muestras congeladas.

Alimento	Muestra	T _i (°C)	T _f (°C)	T _e (°C)	T _a (°C)
Agua destilada	AT I	22.25	-0.03	-18.68	-18.12
	AT II	23.01	-0.03	-22.46	-18.12
	AP	22.82	-1.90	-18.79	-18.12
Carne molida de res	BR-1	24.89	-1.75	-17.89	-18.55
	BR-2	24.03	-1.13	-17.76	-18.80
	BR-3	22.70	-1.11	-17.76	-18.40
	Al-1	22.95	-1.21	-20.70	-18.55
	Al-3	20.61	-1.20	-21.24	-18.40
	A-2	23.61	-0.21	-17.09	-18.80
	A-3	22.03	-0.33	-17.36	-18.40
	EPU-2	20.47	-1.15	-18.51	-18.80
	EPU-3	19.56	-1.17	-18.75	-18.40
Pasta de hojaldre	PH-I	21.12	-4.66	-17.65	-19.29
	PH-II	21.46	-4.42	-19.03	-19.29
	PH-III	21.46	-4.33	-18.96	-19.29
	A	22.69	-0.18	-16.71	-19.29
	PH-I	23.03	-4.45	-22.17	-18.79
	PH-II	22.93	-5.47	-22.46	-18.79
	PH-III	23.19	-4.69	-21.99	-18.79
	A	22.18	-0.14	-19.65	-18.79
	Zanahoria	ZI	6.31	-4.51	-18.37
ZII	6.93	-4.04	-18.39	-19.13	
ZIII	6.90	-3.70	-19.76	-19.13	
A	12.16	-0.47	-17.07	-19.13	
Za	16.18	-2.06	-18.09	-19.13	
Zb	16.73	-3.15	-18.57	-19.13	
Zc	16.72	-3.97	-18.07	-19.13	
A	19.77	-0.29	-16.45	-19.13	
Guayaba	Ga	22.73	-2.40	-17.41	-19.12
	Gb	22.72	-2.24	-18.05	-19.12
	Gc	22.54	-2.31	-18.10	-19.12
	A	22.77	-0.17	-17.86	-19.12
	Gd	17.14	-2.56	-17.20	-19.06
	Ge	17.61	-2.35	-17.55	-19.06
	Gf	17.87	-2.42	-17.59	-19.06
	A	18.43	-0.44	-17.59	-19.06

A= agua control; Al=aluminio; BR= bolsa resellable; EPU= espuma de poliuretano; G= guayaba; T= termopar en posición transversal; P= termopar en posición perpendicular; PH= pasta de hojaldre; Z= zanahoria; a, b, c, d, e, f, I, II, III, 1, 2, 3= muestras.

3.3.1. Perfiles térmicos

3.3.1.1. Agua

La Figura 13 muestra que para las pruebas con el termopar en posición transversal (AT-I y AT-II) se obtuvieron buenos perfiles de congelación en los que se aprecia claramente el cambio de fase con un ligero descenso que indica la presencia de solutos en el agua destilada.

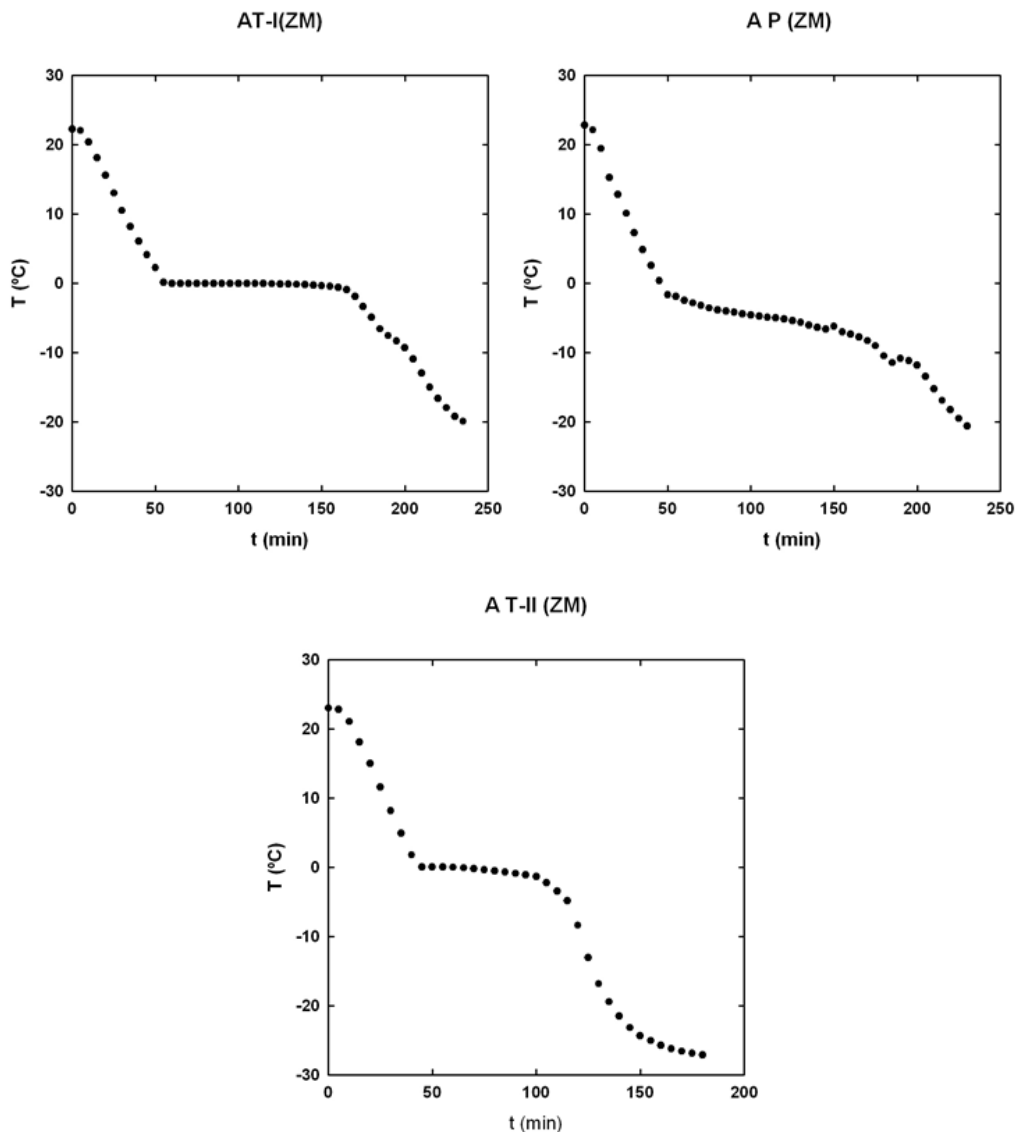


Figura 13. Perfiles térmicos de agua destilada para dos posiciones diferentes del termopar; transversal (AT) y perpendicular (AP).

A= agua control; T= termopar en posición transversal; P= termopar en posición perpendicular; ZM= zona central del congelador; I, II= muestras.

En las pruebas con el termopar en posición perpendicular (AP), hubo un descenso de temperatura más notable, que no es característico del perfil de congelación de agua. Entonces, resulta inadecuado colocar el termopar en esta posición para obtener un perfil térmico. En la Figura 10 se observa que la punta del termopar no alcanza el centro térmico de la charola debido a la altura que esta tiene. Se observa además que el tiempo de congelación es menor en la muestra AT-II, debido a su ubicación en la sección superior del congelador (Figura 4), ya que la transferencia de energía térmica en esta zona fue mayor.

3.3.1.2. Carne molida

La Figura 14 muestra los perfiles térmicos de las pruebas realizadas con placas de carne molida de res. Se observa con claridad el periodo de cambio de fase, así como todos los periodos del proceso completo de congelación. El tiempo de congelación experimental fue menor en las charolas de aluminio (CM-AI-1 y CM-AI-3) además de que alcanzaron una T_e inferior a $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. En los casos en los que las placas de alimento se colocaron sobre la charola de espuma de poliuretano (CM-EPU-2 y CM-EPU-3) y en la bolsa resellable (CM-BR-1, CM-BR-2 y CM-BR-3) la congelación fue más larga debido a que el material de soporte o de empaque del alimento actuó como barrera a la transferencia de energía térmica por convección entre el aire del medio de enfriamiento y el área de transferencia de las placas (Figura 8). Los perfiles térmicos de los controles de agua (Agua-CM-2 y Agua-CM-3) son característicos; el tiempo de cambio de fase fue mayor con respecto al de la carne molida.

3.3.1.3. Pasta de hojaldre

La Figura 15 muestra los perfiles térmicos de las pruebas con pasta de hojaldre en forma de placa. El proceso de congelación no muestra claramente el periodo de cambio de fase como en el caso de los otros alimentos y a la referencia de agua destilada (A PH P).

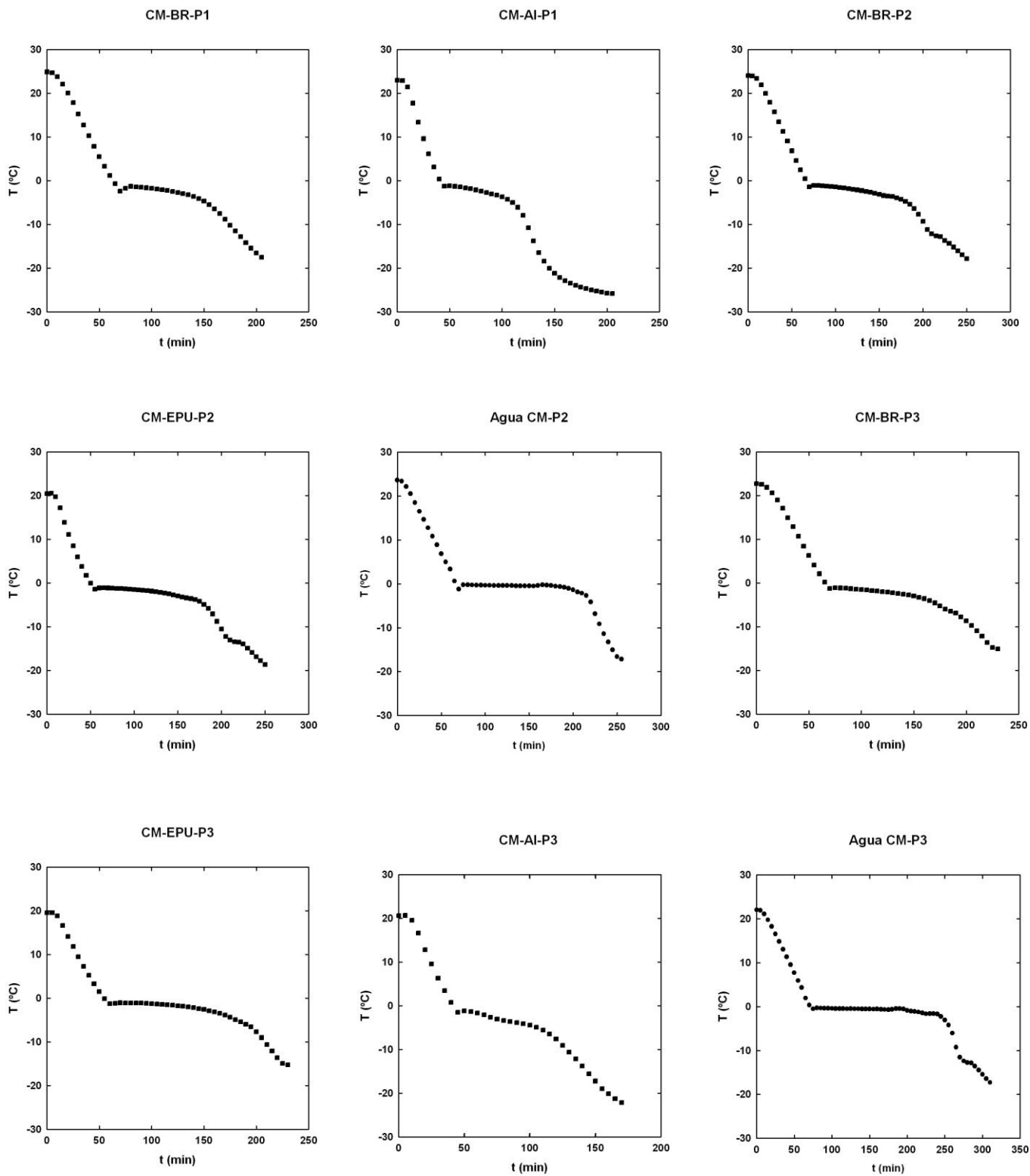


Figura 14. Perfiles de congelación de carne molida de res en forma de placa.

A= agua control; AI=aluminio; BR= bolsa resellable; CM= carne molida; EPU= espuma de poliuretano; P1, P2, P3= número de prueba.

La pasta de hojaldre tiene 33% de humedad y 67% de sólidos y esto podría explicar por qué el cambio de fase ocurre rápidamente y es difícil de apreciar. Por otro lado, en los perfiles térmicos de las muestras en forma cilíndrica que se muestran en la Figura 16, aunque la tendencia del perfil es la misma que para la forma de placa, se observan puntos eutécticos por debajo de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, los cuales son resultado de la cristalización de sólidos presentes, e.g. lípidos, en equilibrio con el hielo y el agua líquida remanente (Fellows, 2007).

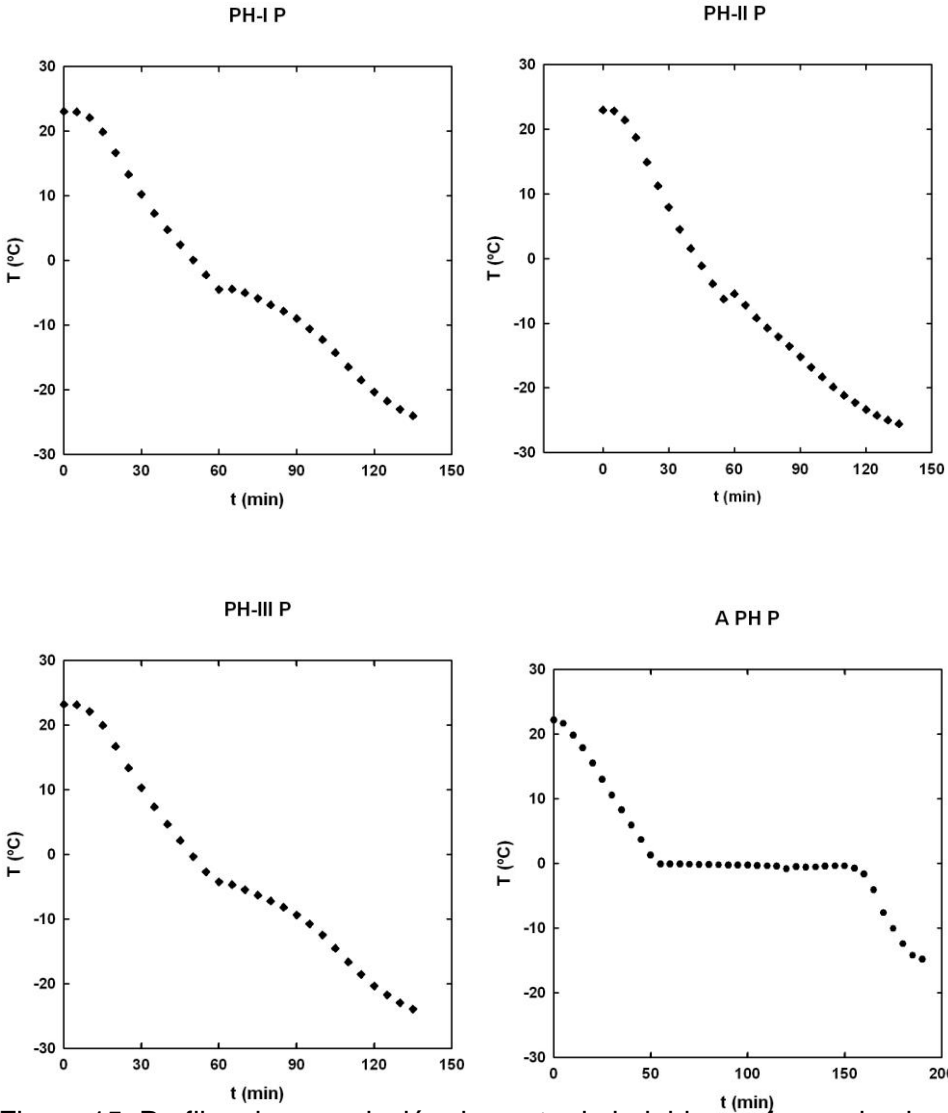


Figura 15. Perfiles de congelación de pasta de hojaldre en forma de placa.

A= agua control; P= forma en placa; PH= pasta de hojaldre; I, II, III= muestras.

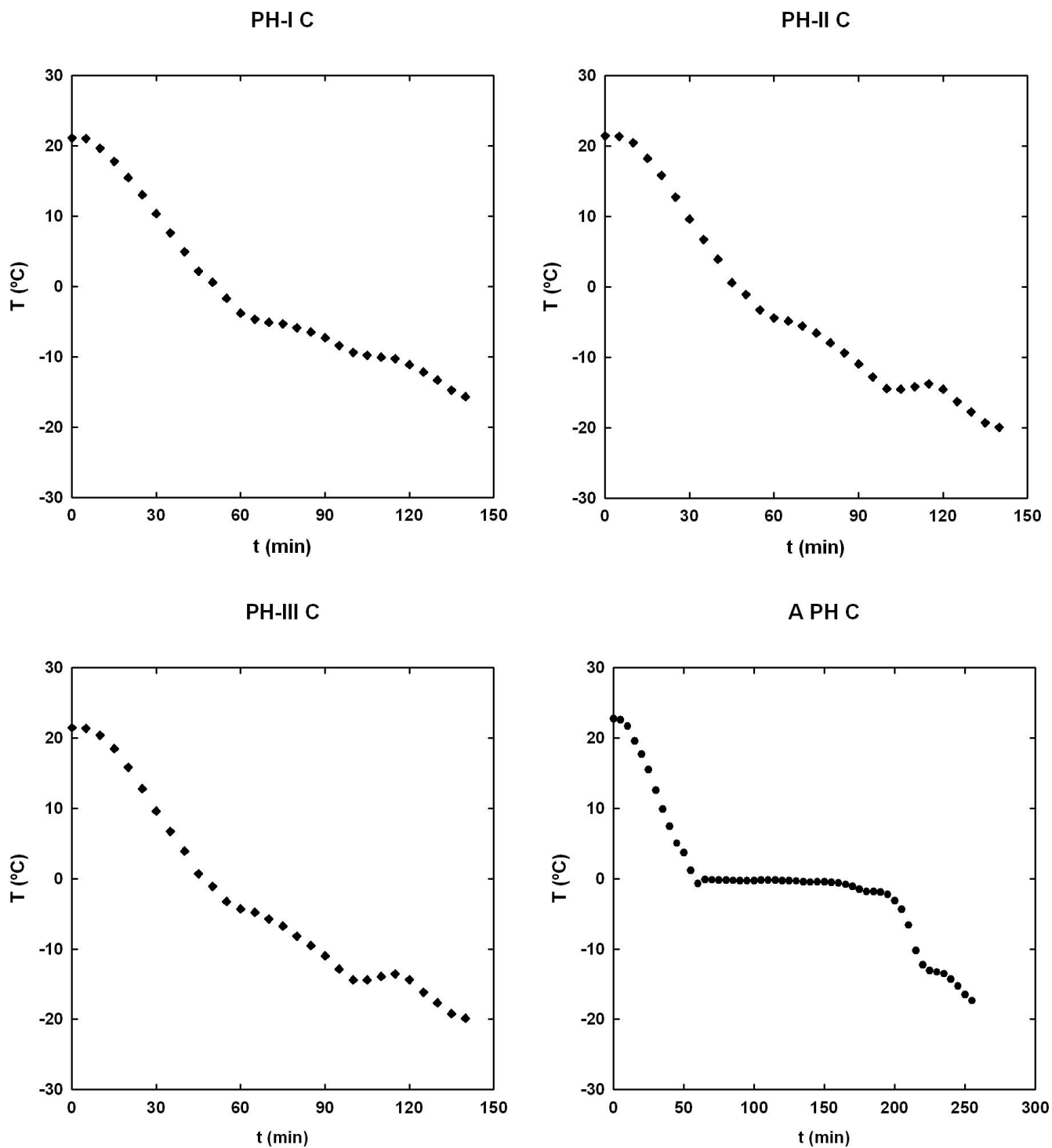


Figura 16. Perfiles de congelación de pasta de hojaldre en forma de cilindro.

A= agua control; C= cilindro; PH= pasta de hojaldre; I, II, III= muestras.

3.3.1.4. Zanahorias

La Figura 17 muestra los perfiles térmicos de las zanahorias congeladas cuando el congelador se encendió previamente, es decir, fue acondicionado hasta alcanzar su temperatura mínima. La T_i del alimento fue inferior a 10 °C lo que redujo el periodo de enfriamiento previo a la congelación y permitió llegar a su T_f en menor tiempo además de reducir el periodo de cambio de fase. Posterior a éste se observa que la temperatura aumentó hasta alcanzar dos puntos eutécticos en todas las muestras. En lo que respecta a la referencia de agua contenida en un vaso de precipitados, T_i se redujo de manera significativa y de la misma manera el proceso completo de congelación. Es importante hacer notar que el periodo de cambio de fase no fue constante como se esperaba debido a ligeros aumentos de temperatura durante este tiempo, lo cual indica la presencia de solutos en el agua destilada empleada para en esta prueba.

La Figura 18 muestra los perfiles de temperatura del mismo alimento sin acondicionar previamente el congelador. La T_i fue mayor y el tiempo de enfriamiento previo a la congelación fue un poco más prolongado. Sólo en las muestras Za y Zc se observaron dos puntos eutécticos, mientras que en la Zb se observó solo uno, Además, el tiempo de congelación para esta muestra fue mayor con respecto a las otras dos. El perfil de la referencia de agua destilada (A ZT A) fue el esperado; los tres periodos del proceso de congelación se observan claramente.

3.3.1.5. Guayabas

Las Figuras 19 y 20 muestran los perfiles térmicos de guayabas congeladas en dos condiciones: sin acondicionamiento del congelador y con el acondicionamiento previo, respectivamente. Los perfiles térmicos de la congelación con el congelador acondicionado muestran que el tiempo del periodo de enfriamiento previo a la congelación y de cambio de fase fueron menores que aquellos con el congelador

sin acondicionar. La T_f no fue afectada por las condiciones en las que se efectuó el proceso.

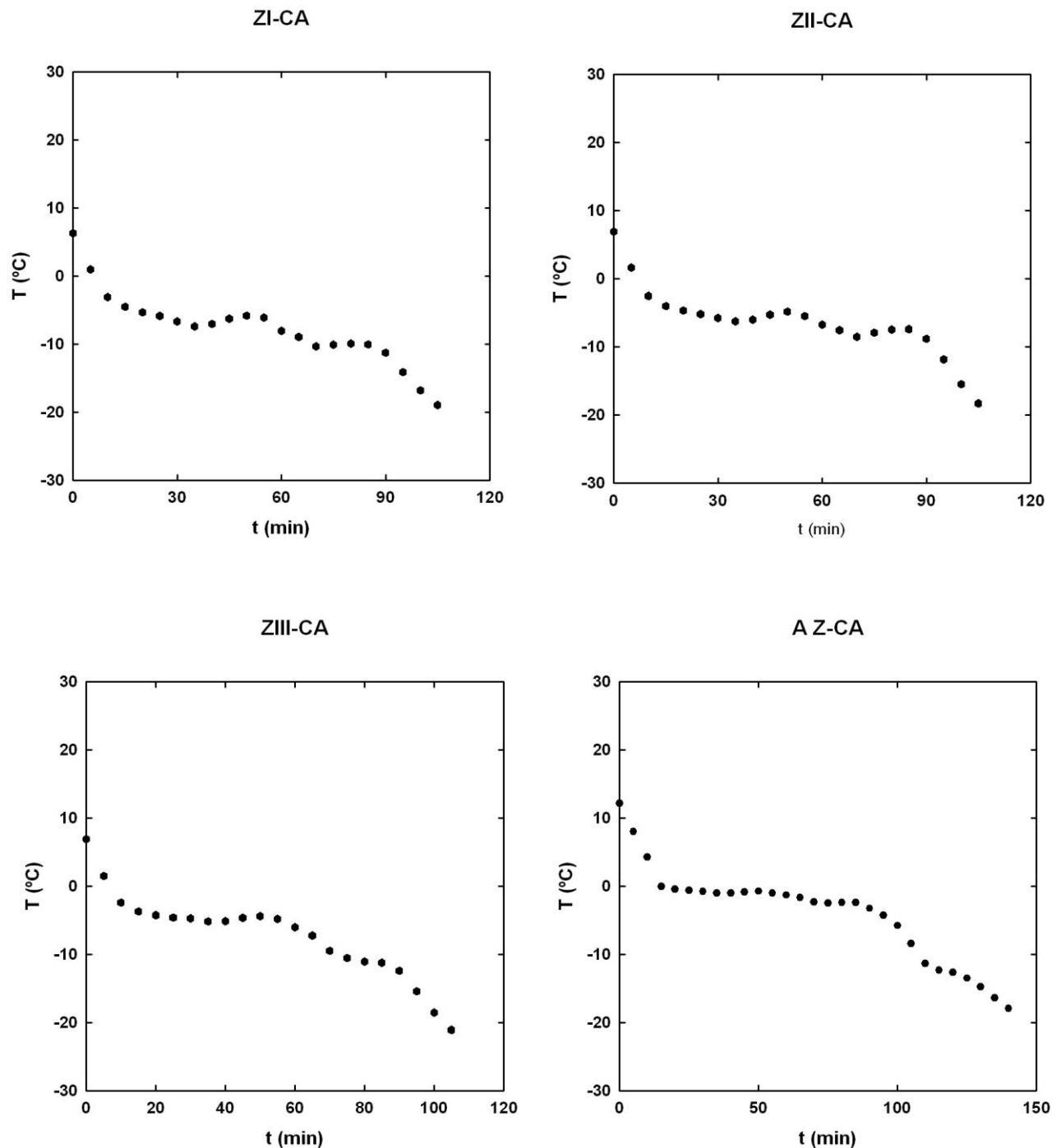


Figura 17. Perfiles de congelación de zanahoria con el medio de enfriamiento acondicionado.

A= agua control; CA= congelador acondicionado (medio de enfriamiento en su temperatura mínima); Z= zanahoria; I, II, III= muestras.

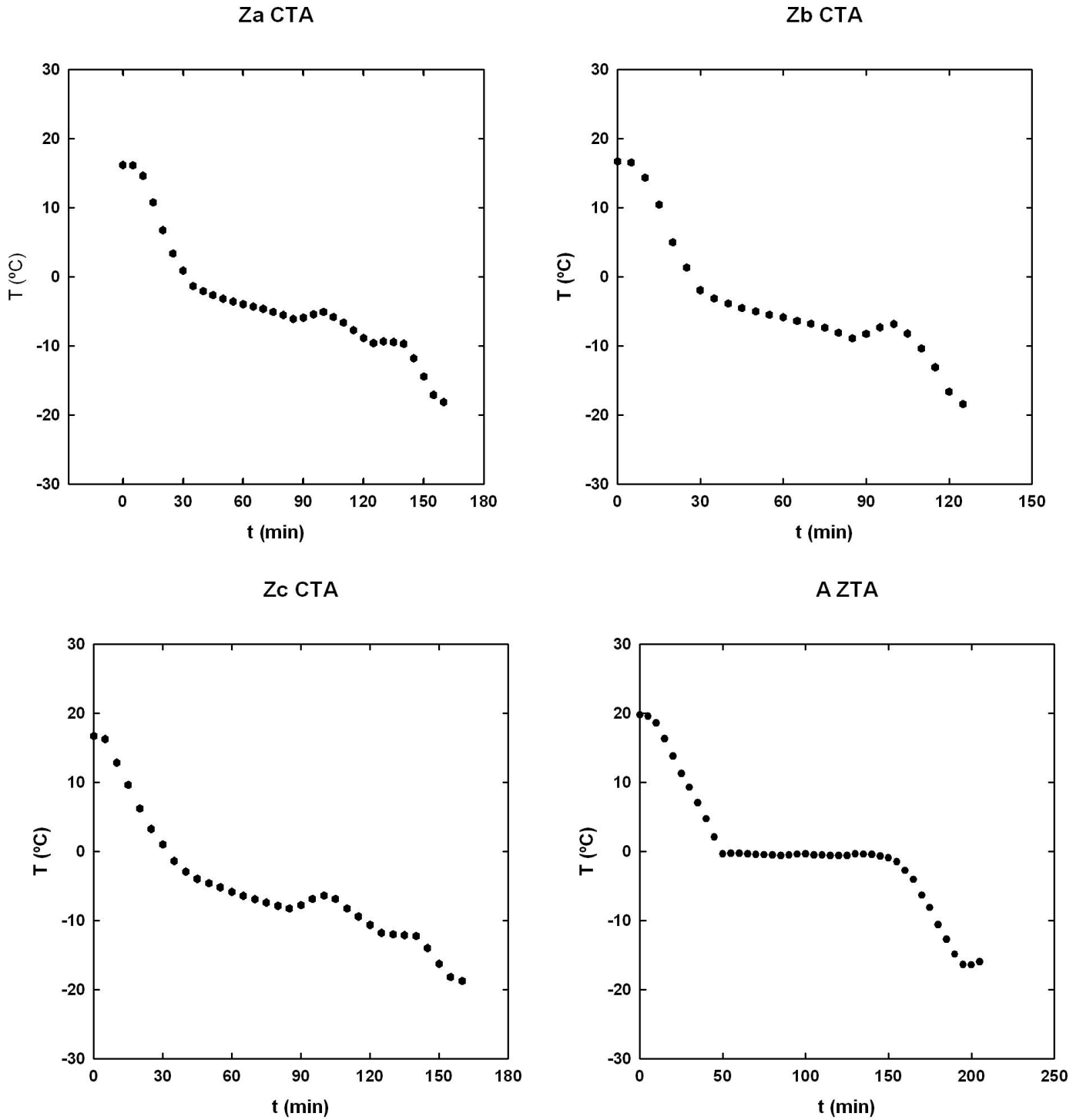


Figura 18. Perfiles de congelación de zanahorias sin el medio de enfriamiento acondicionado.

A= agua control; CTA= congelador a temperatura ambiente (inicio de congelación con el medio de enfriamiento a temperatura ambiente); Z= zanahoria; a, b, c= muestras.

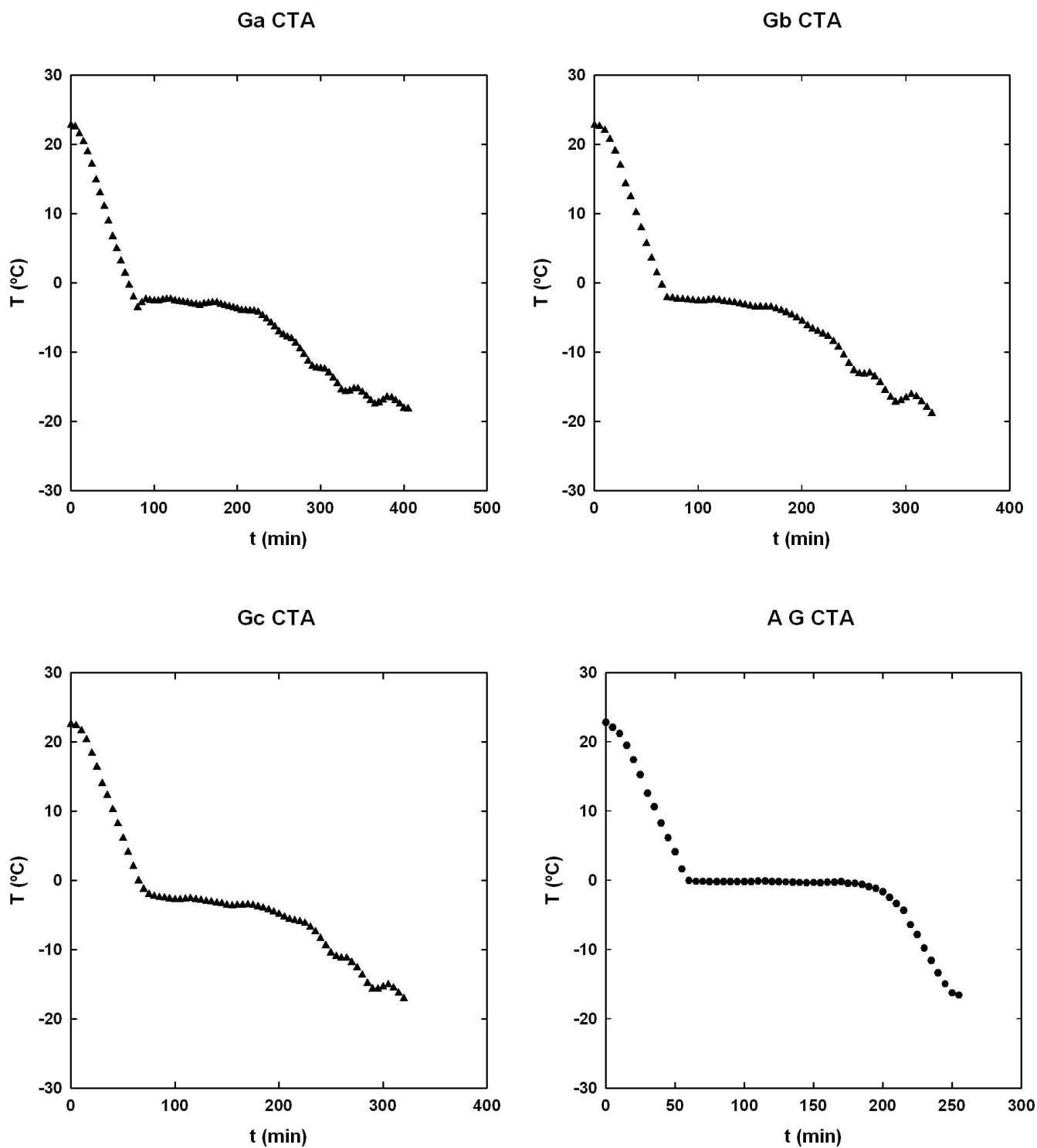


Figura 19. Perfiles de congelación de guayabas sin el medio de enfriamiento acondicionado.

A= agua control; CTA= congelador a temperatura ambiente (inicio de congelación con el medio de enfriamiento a temperatura ambiente); G= guayaba; a, b, c= muestras.

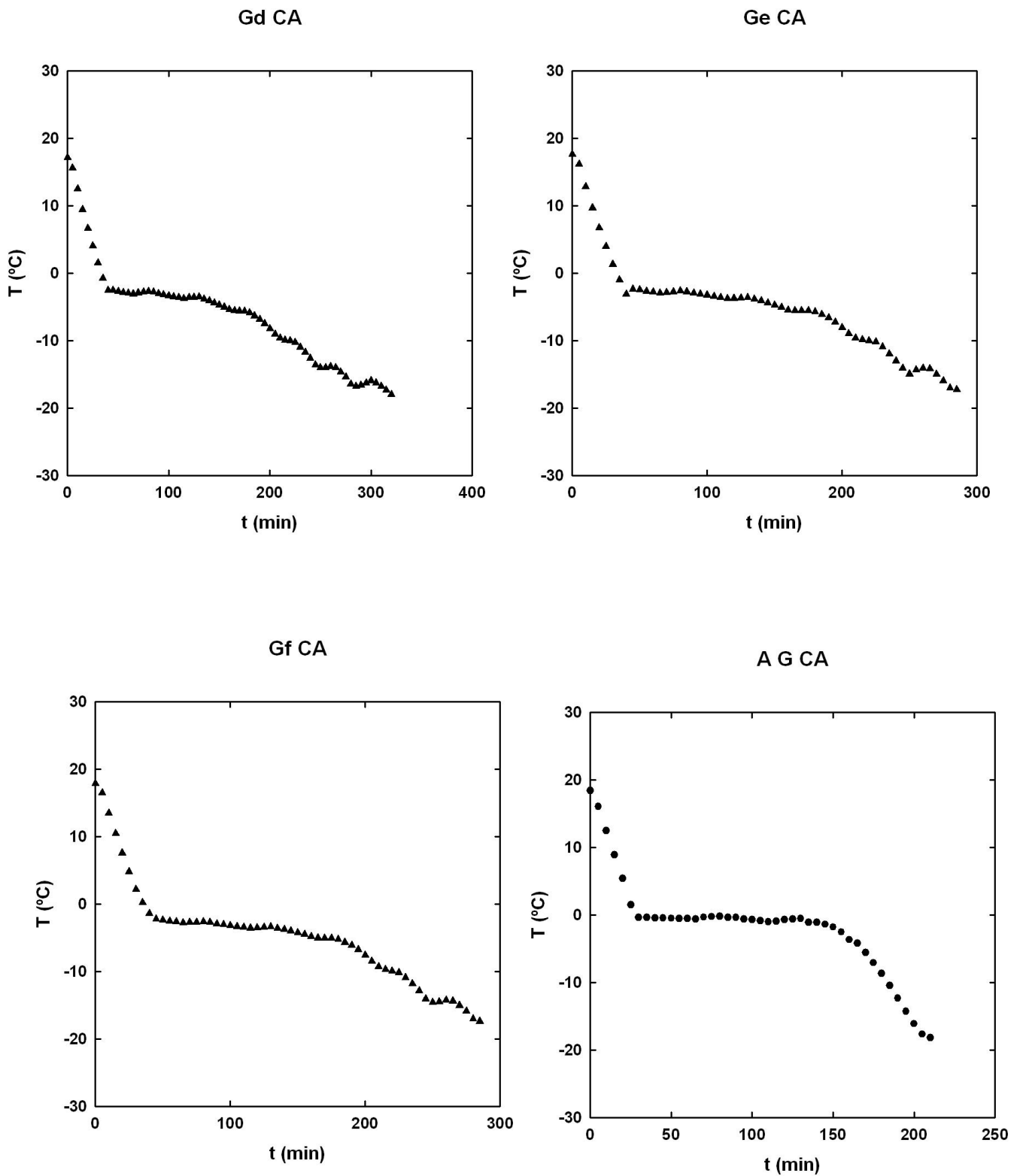


Figura 20. Perfiles de congelación de guayabas con el medio de enfriamiento acondicionado.

A= agua control; CA= congelador acondicionado (medio de enfriamiento en su temperatura mínima); G= guayaba; a, b, c= muestras.

Debido al mayor espesor entre el centro térmico y la superficie, el tiempo de todo el proceso fue mayor que el de la referencia de agua contenida en un vaso de precipitados (A G CTA y A G CA). En todas las muestras se observan con claridad los distintos periodos del proceso de congelación con ligeros aumentos de temperatura durante el periodo de cambio de fase y posterior a éste, lo cual indica la cristalización durante ambos periodos. Sólo en la muestra Ga CTA se apreció subenfriamiento antes del cambio de fase (Ibarz 1999, Mittal 2006).

3.3.2. Tiempo de congelación experimental

Para determinar de manera más precisa el tiempo de congelación de las referencias de agua destilada y de todos los alimentos usados en las pruebas de congelación, se hizo una regresión lineal sobre aquellos datos que mostraran una mejor correlación. Las Figuras 21 a 30 muestran el procedimiento para todos los materiales.

3.4. Tiempos experimentales

La Tabla 11 muestra los tiempos de cambio de fase, i.e. congelación, y del proceso completo de congelación de todos los alimentos examinados. De los alimentos congelados en este trabajo, las muestras de agua destilada, además de las referencias empleadas en cada proceso de congelación requirieron mayor tiempo para el cambio de fase, de la misma manera que las guayabas. La pasta de hojaldre y las zanahorias requirieron menor tiempo para congelar. Para la carne molida de res, los tiempos de congelación fueron diferentes debido al efecto del envase en el que fue colocada. De los cinco alimentos congelados la pasta de hojaldre y las zanahorias requirieron menor tiempo para el cambio de fase y para el tiempo completo de proceso. Las guayabas requirieron mayor tiempo completo de proceso.

3.3.2.1. Agua

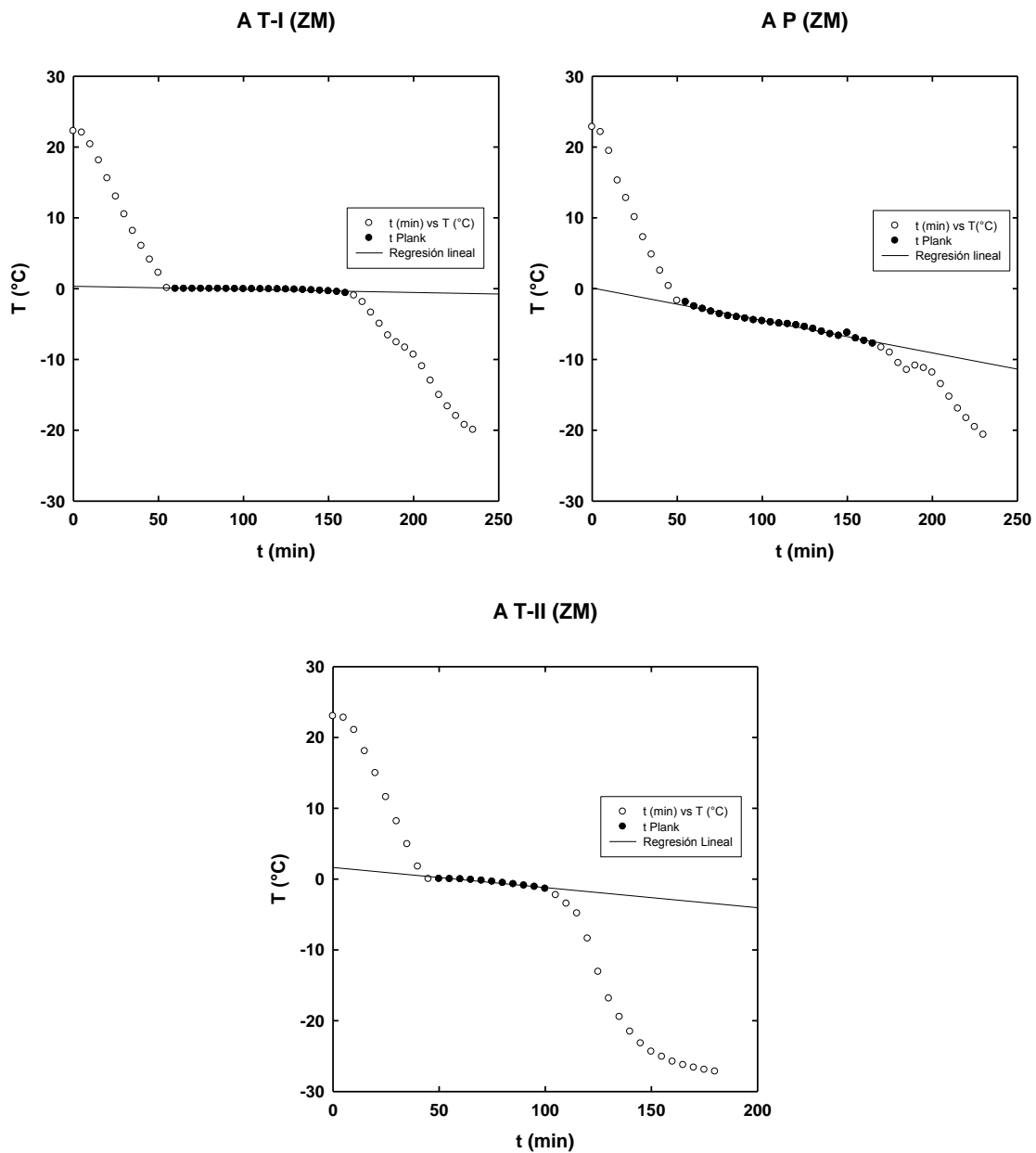


Figura 21. Perfiles de congelación de agua destilada en placa con regresión lineal para delimitar el periodo de cambio de fase.

A= agua control; T= termopar en posición transversal; P= termopar en posición perpendicular; ZM= zona central del congelador; I, II= muestras.

3.3.2.2. Carne molida

CM-BR-1

CM-AI-1

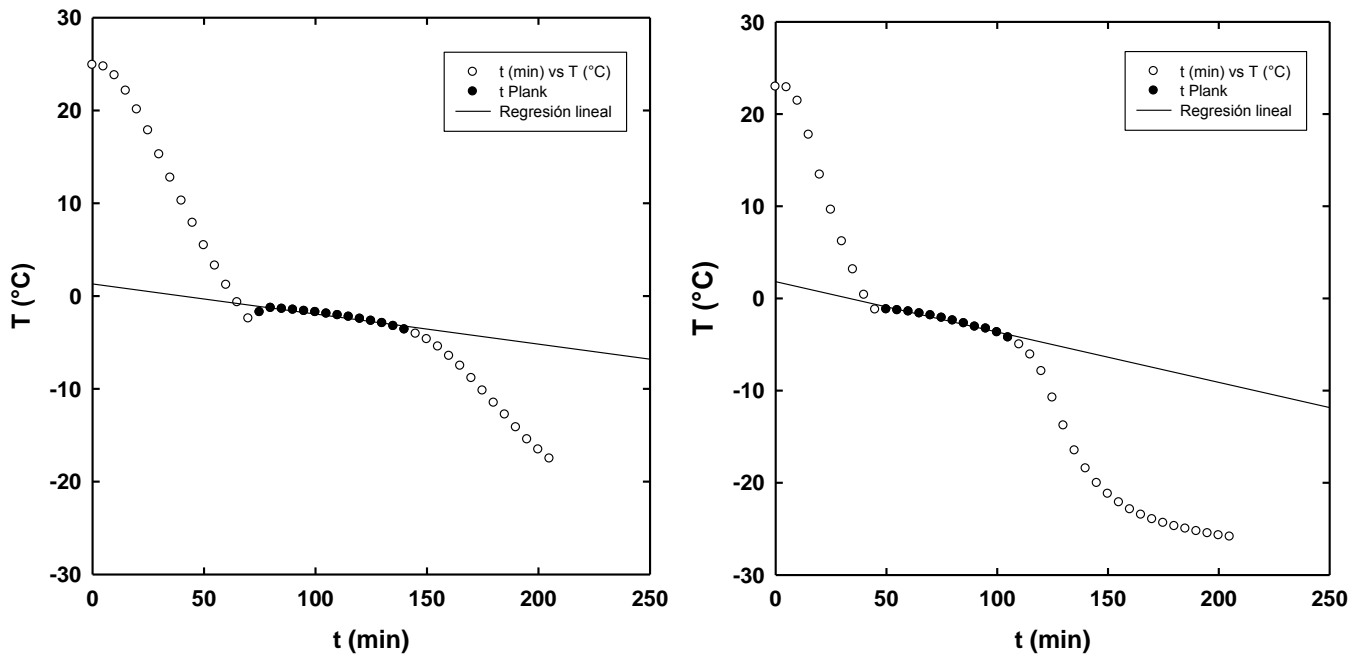


Figura 22. Perfiles de congelación de la prueba 1 para carne molida de res en placa con regresión lineal para identificar el periodo de congelación.

Al= aluminio; BR= bolsa resellable; CM= carne molida; 1, 2 = muestras.

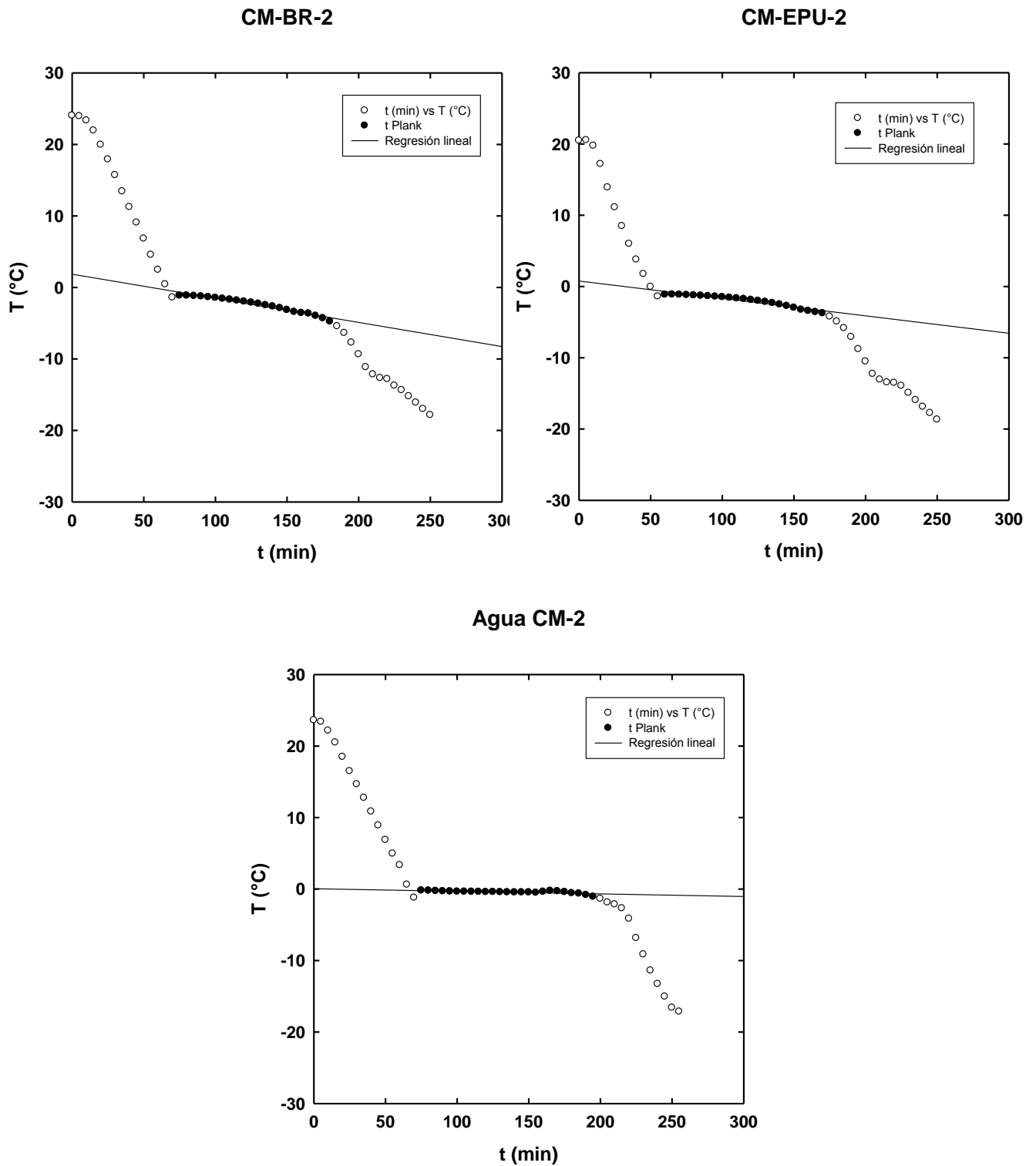


Figura 23. Perfiles de congelación de la prueba 2 para carne molida de res en placa con regresión lineal para delimitar el periodo de cambio de fase.

BR= bolsa resellable; CM= carne molida; EPU= espuma de poliuretano.

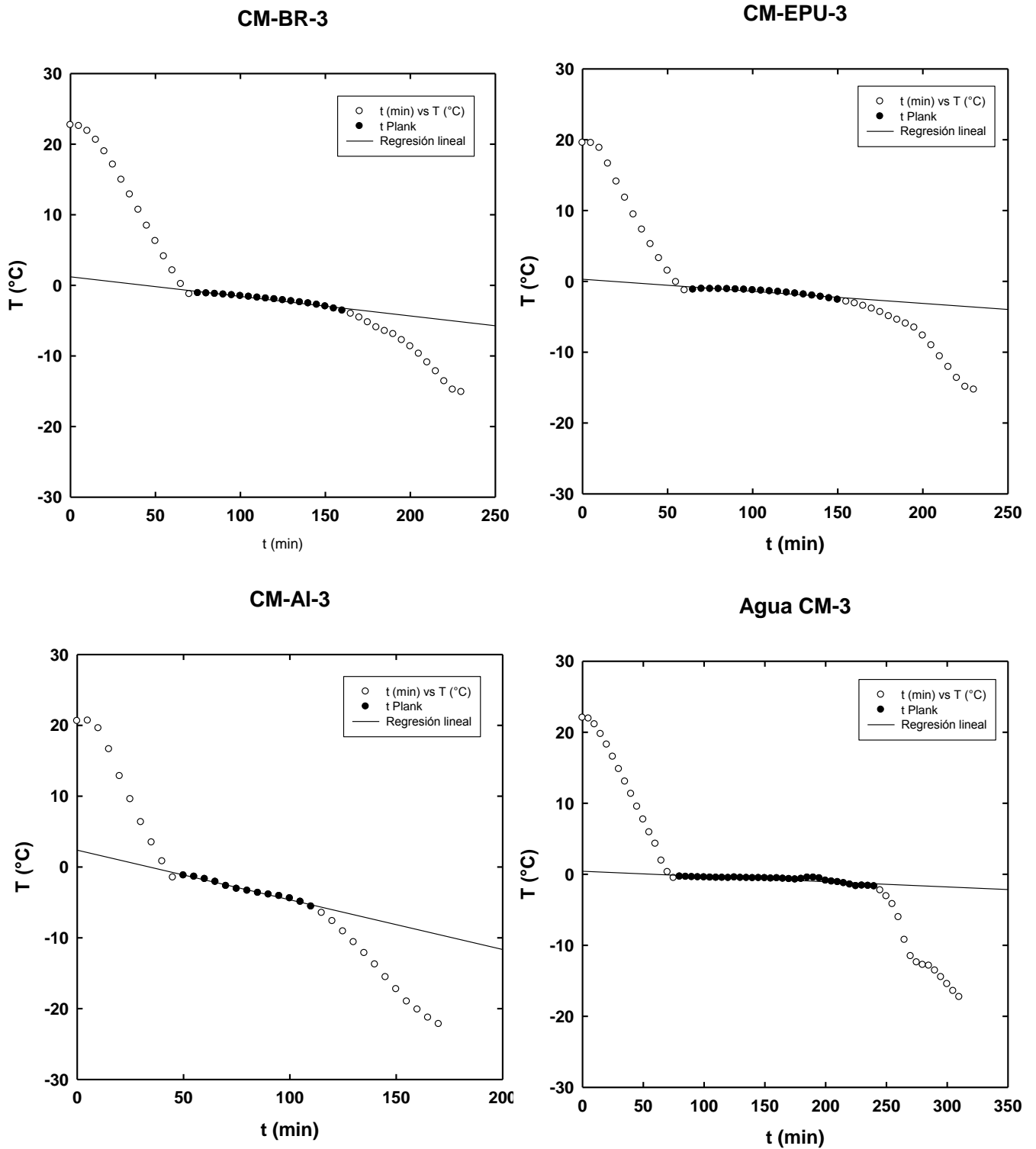


Figura 24. Perfiles de congelación de la prueba 3 para carne molida de res en placa para delimitar el periodo de cambio de fase.

Al= aluminio; BR= bolsa resellable; CM= carne molida; EPU= espuma de poliuretano.

3.3.2.3. Pasta de hojaldre

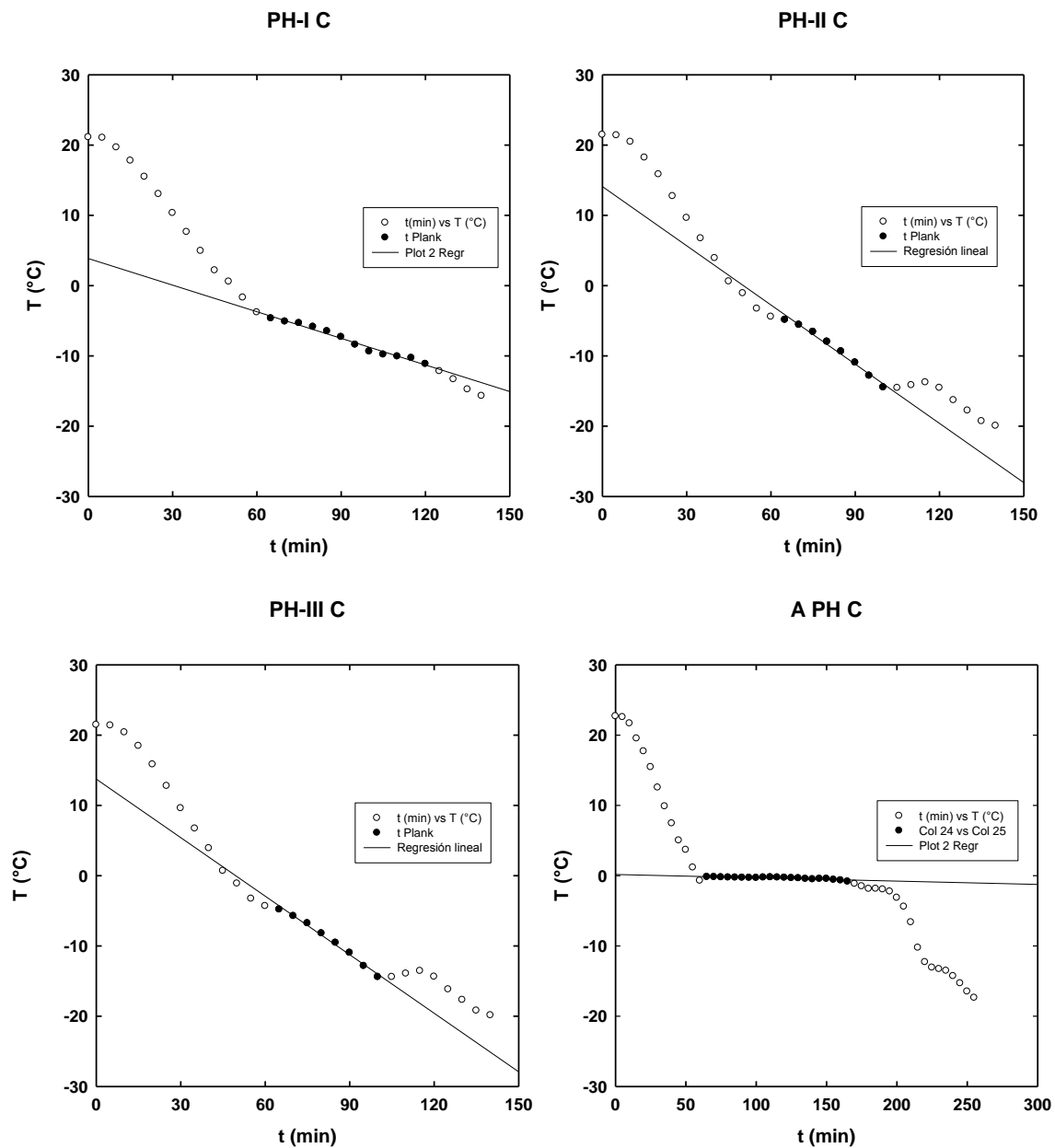


Figura 25. Perfiles de congelación de pasta de hojaldre en cilindro con regresión lineal para delimitar el periodo de cambio de fase.

A= agua control; C= cilindro; PH= pasta de hojaldre; I, II, III = muestras.

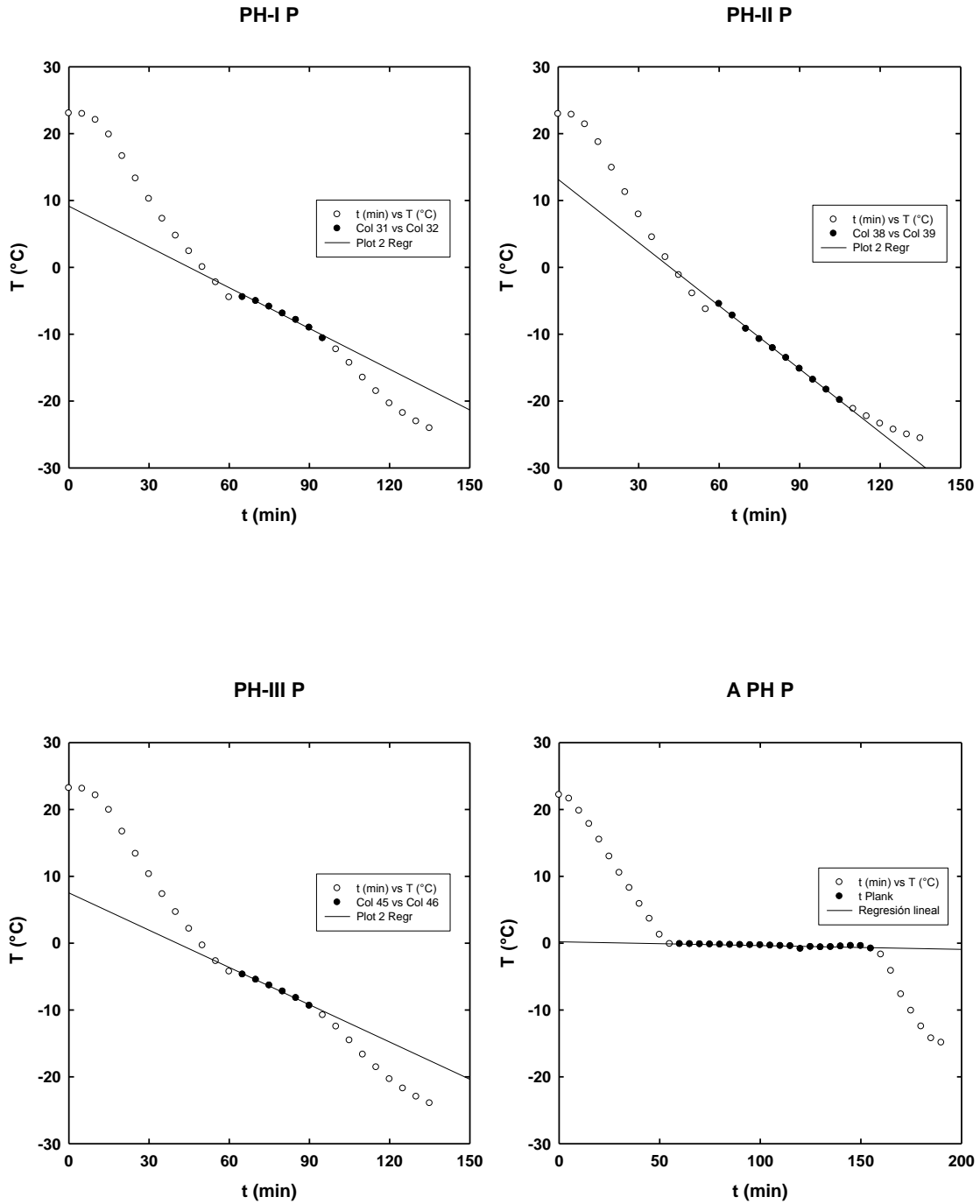


Figura 26. Perfiles de congelación de pasta de hojaldre en placa con regresión lineal para delimitar el periodo de cambio de fase.

A= agua control; P= forma en placa; PH= pasta de hojaldre; I, II, III = muestras.

3.3.2.4. Zanahorias

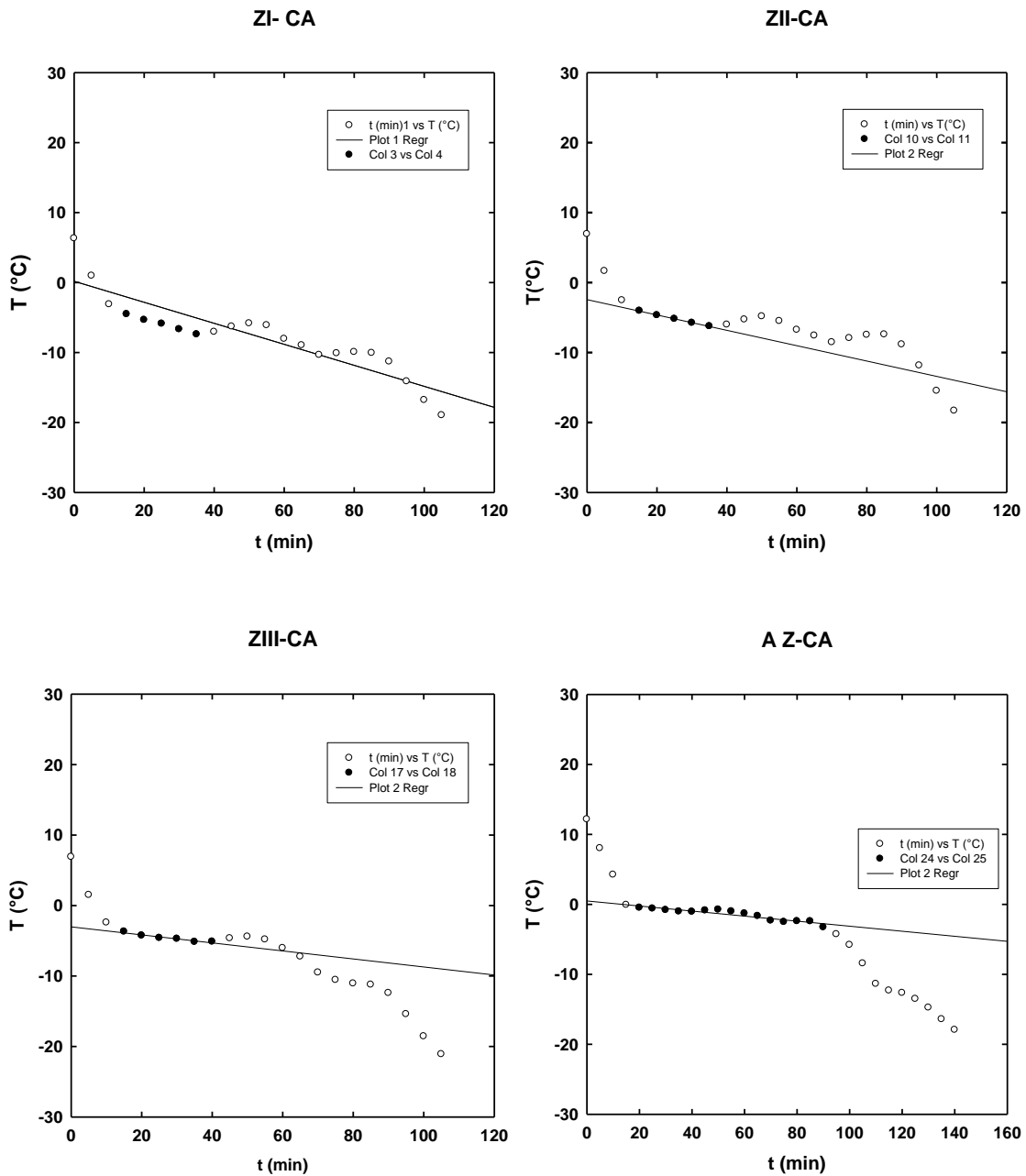


Figura 27. Perfiles de congelación de zanahoria con regresión lineal (el medio de enfriamiento acondicionado) para delimitar el periodo de cambio de fase.

A= agua control; CA= congelador acondicionado (medio de enfriamiento en su temperatura mínima); Z= zanahoria; I, II, III= muestras.

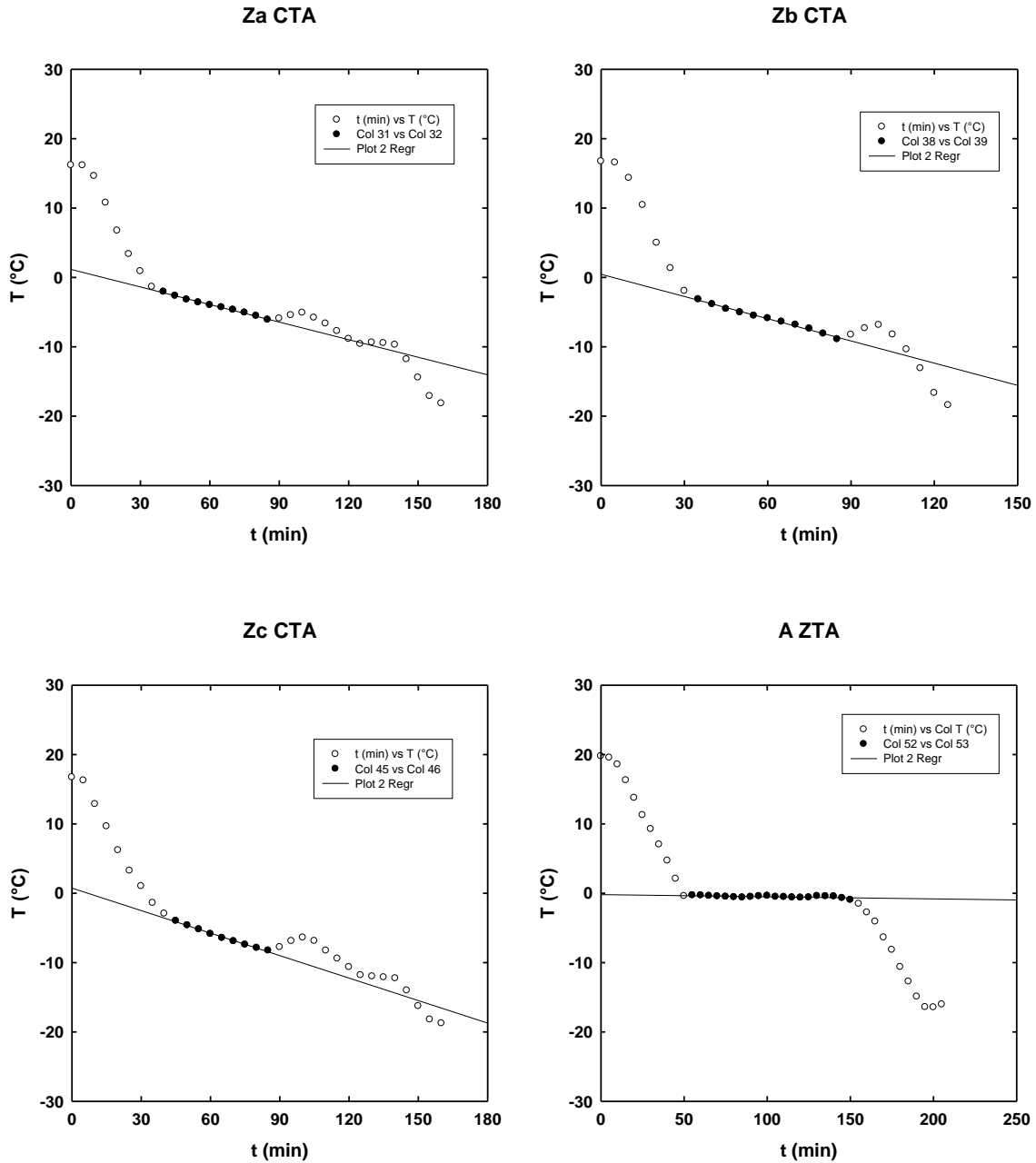


Figura 28. Perfiles de congelación de zanahoria con regresión lineal (sin el medio de enfriamiento acondicionado) para delimitar el periodo de cambio de fase.

A= agua control; CTA= congelador a temperatura ambiente (inicio de congelación con el medio de enfriamiento a temperatura ambiente); Z= zanahoria; a, b, c= muestras.

3.3.2.5. Guayabas

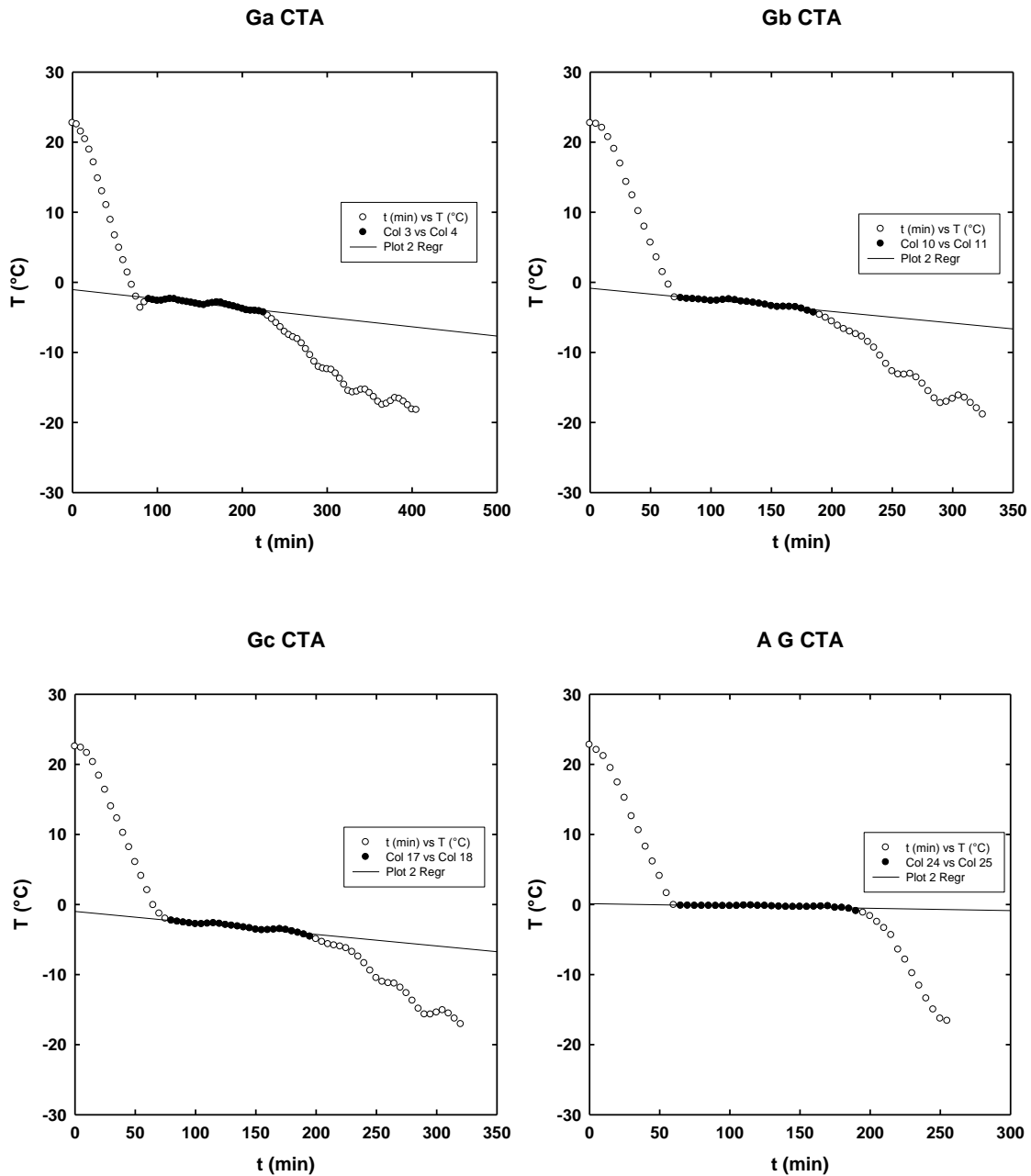


Figura 29. Perfiles de congelación de guayabas con regresión lineal (sin el medio de enfriamiento acondicionado) para delimitar el periodo de cambio de fase.

A= agua control; CTA= congelador a temperatura ambiente (inicio de congelación con el medio de enfriamiento a temperatura ambiente); G= guayaba; a, b, c= muestras.

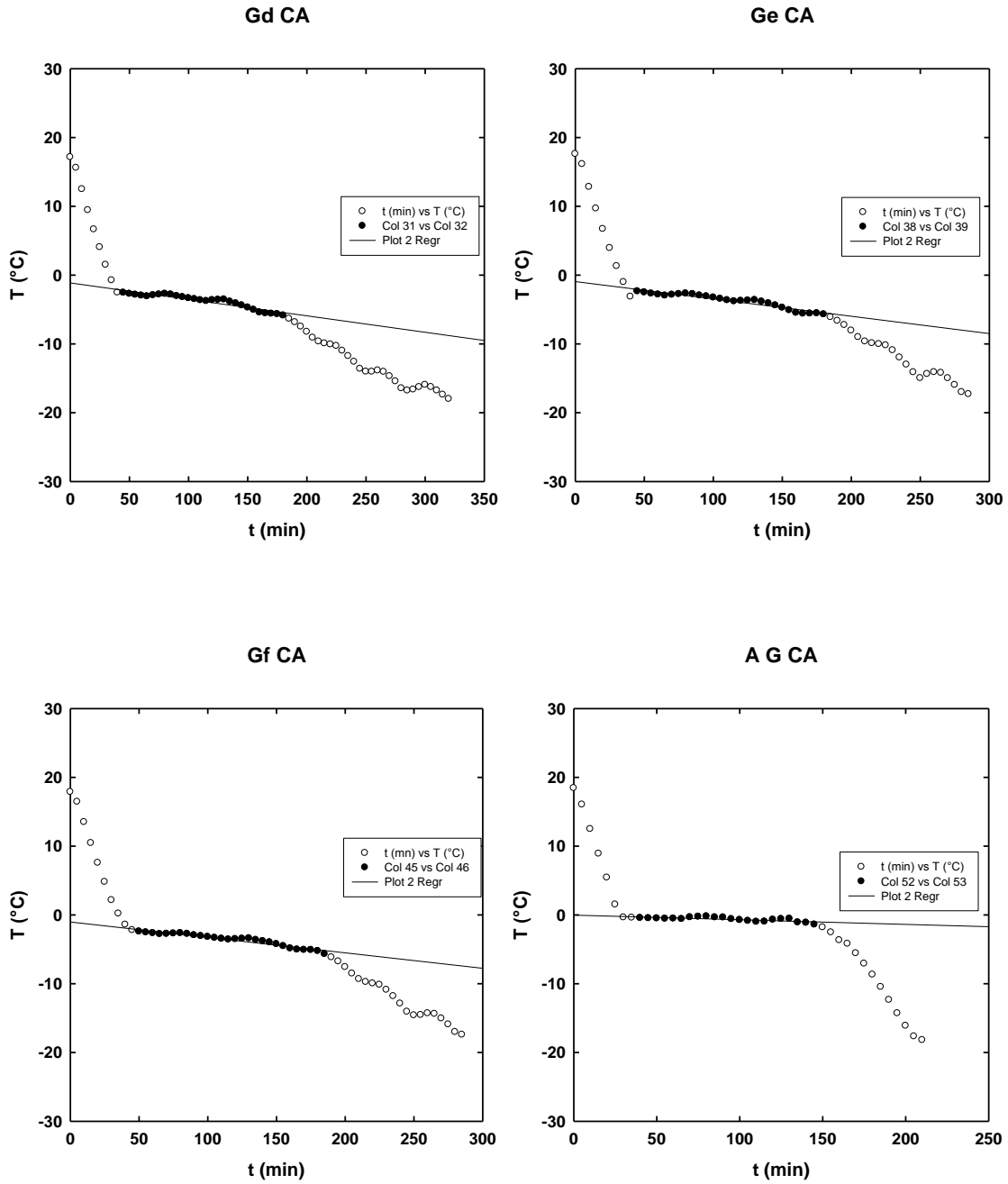


Figura 30. Perfiles de congelación de guayabas con regresión lineal (con el medio de enfriamiento acondicionado) para delimitar el periodo de cambio de fase.

A= agua control; CA= congelador acondicionado (medio de enfriamiento en su temperatura mínima); G= guayaba; a, b, c= muestras.

En las muestras de carne molida el tiempo fue también afectado por el material de empaque o soporte; aquellas muestras colocadas en charolas de aluminio requirieron menor tiempo de congelación y mostraron diferencia significativa con las muestras en bolsa resellable y charola de poliuretano.

En las muestras de pasta de hojaldre en placa en las cuales se empleó mayor cantidad de masa que en la forma cilíndrica, los tiempos de congelación fueron menores, por lo tanto hubo un efecto del empaque.

En las zanahorias se puede observar que al acondicionar el congelador antes de introducir las muestras, se redujo el tiempo de congelación y del proceso completo, el mismo resultado se obtuvo en la congelación de las guayabas.

Tabla 11 Tiempos experimentales de cambio de fase y del proceso completo de congelación.

Alimento	Muestra	F (min)	F_{eff} (min)
Agua destilada	AT I	110	235
	AP	115	230
	AT II	65	180
Carne molida de res	BR-1	75	205
	Al-1	65	205
	BR-2	115	255
	EPU-2	125	250
	A-2	140	255
	BR-3	120	270
	EPU-3	130	270
	Al-3	70	180
	A-3	175	315
	Pasta de hojaldre	C I	50
C II		25	140
C III		25	140
A-C		140	255
P I		30	135
P II		45	135
P III		30	135
A-P		100	230
Guayabas	G a	140	365
	G b	110	325
	G c	115	330
	A	145	255
	G d	135	320
	G e	140	320
	G f	135	320
	A	130	215
Zanahorias	Z I	40	105
	Z II	35	105
	Z III	40	105
	A	80	140
	Z a	60	160
	Z b	65	125
	Z c	60	160
	A	110	200

A= agua control; Al=aluminio; BR= bolsa resellable; EPU= espuma de poliuretano; G= guayaba; T= termopar en posición transversal; P= termopar en posición perpendicular; PH= pasta de hojaldre; Z= zanahoria; a, b, c, d, e, f, I, II, III, 1, 2, 3= muestras.

La Tabla 12 muestra los valores de conductividad térmica y densidad calculadas a partir de las ecuaciones de Choi y Okos para usarlos en la ecuación de Plank. Dado que la conductividad térmica es una propiedad que depende del material, los alimentos con mayor contenido de humedad resultaron con valores mayores. Las placas de agua destilada, en las cuales se considera una humedad de 100%, se obtuvo un valor de 2.30 W/m·K, el cual es cercano al reportado en la literatura (Nevadba, 2008). Por otra parte, en las zanahorias con 91.07% de humedad la

conductividad térmica promedio fue 2.06 W/m·K. En orden descendente, la conductividad térmica del resto de los alimentos fue; 1.91 W/m·K para las guayabas con 80.87%, 1.66 W/m·K para la carne molida de res con 73.30% de humedad y 0.89 W/m·K para la pasta de hojaldre con 32.96%.

Los valores de densidad calculados con las mismas ecuaciones a la temperatura final de congelación (T_e en °C, aproximadamente -18 °C) para las muestras de agua destilada en placa y las que se usaron como controles en forma cilíndrica fueron 919 kg/m³, el cual es menor al reportado a 0 °C de 999 kg/m³ como es de esperarse. Sin embargo, debido a la falta de referencias para los valores de la densidad de los alimentos congelados en este trabajo a 0 °C y -18 °C, se consideró que los valores de densidad calculados en estas temperaturas son confiables.

El calor latente para el agua es 333,500 J/kg y el calculado (Ibarz y Barbosa-Cánovas, 1996) para el resto de los alimentos es menor y en orden descendente se obtuvo que las zanahorias tienen un calor latente de 254,502 J/kg ± 12,195, la carne molida de res de 233,290 J/kg ± 5,041, las guayabas 232,302 J/kg ± 1,343 y la pasta de hojaldre de 88,009 J/kg ± 2,448, aunque no existe gran diferencia entre la carne molida de res y las guayabas es evidente una relación directa con el contenido de humedad de cada alimento, por lo tanto el valor del calor latente también es una propiedad que depende del material durante el proceso de congelación. No obstante, los valores de la desviación estándar son significativos y afectan el tiempo de cambio de fase calculado con la ecuación de Plank.

Dado que los valores empleados en las variables para calcular el coeficiente de transferencia convectiva de energía térmica (h) a partir de la ecuación de Plank son los mismos con sus diversas consideraciones e incertidumbres, causan diferencias en los valores calculados mostrados en la Tabla 15. Sin embargo, en la mayoría de las muestras por alimento sí hay aproximaciones lo cual indica que el cálculo de h a partir del tiempo de congelación experimental y el método de Ramaswamy y Tung 1981 con la ecuación de Plank es factible para estimar el tiempo de congelación.

3.5. Propiedades térmicas para la ecuación de Plank

Tabla 12. Propiedades térmicas calculadas y densidad de todas las muestras para usar en la ecuación de Plank.

Alimento	Muestra	K (W/m·°C)	ρ a T_e (kg/m ³)	ΔH_f (J/kg)	h_{exp} (W/m ² °C) *	h (W/m ² ·°C) **
Agua destilada	AT I	2.30	919	333500	13.02	10.05
	AP	2.30	919	333500	13.90	12.99
	AT II	2.31	920	333500	22.19	20.27
Carne molida de res	BR-1	1.65	1027	224672	18.08	11.76
	Al-1	1.66	1027	230840	21.37	15.76
	BR-2	1.66	1027	231948	10.87	8.96
	EPU-2	1.66	1027	231725	10.37	8.30
	A-2	2.30	919	333500	25.21	18.78
	BR-3	1.66	1027	231856	13.78	8.48
	EPU-3	1.66	1027	231168	13.78	7.54
	Al-3	1.66	1027	230824	17.63	13.49
	A-3	2.30	919	333500	23.35	19.87
Pasta de hojaldre	C I	0.89	1126	84165	26.79	28.25
	C II	0.89	1126	87611	59.61	52.95
	C III	0.89	1126	87987	72.64	67.87
	A-C	2.30	919	333500	17.87	16.60
	P I	0.90	1127	91222	25.60	22.68
	P II	0.90	1127	87094	14.19	20.27
	P III	0.90	1127	89975	25.68	24.63
	A-P	2.30	919	333500	13.91	12.63
Guayabas	G a	1.91	1065	232118	15.70	11.45
	G b	1.91	1065	234021	21.37	13.75
	G c	1.91	1065	233189	19.41	12.84
	A	2.30	919	333500	18.26	17.04
	G d	1.91	986	230097	14.36	11.06
	G e	1.91	986	232611	14.19	11.29
	G f	1.91	986	231774	15.87	12.18
	A	2.30	919	333500	22.41	20.20
Zanahorias	Z I	2.06	987	241157	33.13	24.09
	ZII	2.06	987	247907	42.10	18.13
	ZIII	2.06	987	252756	33.92	23.71
	A	2.30	919	333500	37.95	34.46
	Z a	2.06	987	275745	29.37	17.03
	Z b	2.06	987	260539	24.16	21.06
	Z c	2.06	987	248908	24.75	20.41
	A	2.29	919	333500	23.41	22.59

*Calculado usando la ecuación de Plank **Calculado usando el método de Ramaswamy & Tung (1981).

A= agua control; Al=aluminio; BR= bolsa resellable; EPU= espuma de poliuretano; G= guayaba; T= termopar en posición transversal; P= termopar en posición perpendicular; PH= pasta de hojaldre; Z= zanahoria; a, b, c, d, e, f, I, II, III, 1, 2, 3= muestras.

La Tabla 13 muestra los valores de las propiedades térmicas empleadas en la ecuación de Rjutov. Los valores del espesor, el tiempo de congelación y las temperaturas empleadas se muestran en las Tablas 1 y 12. Los valores calculados de la difusividad térmica empleando las ecuaciones Choi y Okos corresponden a los esperados para alimentos y para agua, siendo mayores los valores para agua y para zanahorias. Se reportan dos valores de número de Biot, Bi , el primero calculado a partir del valor de h obtenido con el tiempo de congelación experimental usando la ecuación de Plank, mientras que el segundo corresponde al método de Ramaswamy y Tung con las respectivas consideraciones de dicha ecuación. Ambos valores de Bi en cada alimento y de los controles empleados en cada prueba son muy aproximados y bajos en cada muestra. Dada la definición de Bi , en la literatura los resultados indican que la resistencia interna de la transmisión de energía térmica por conducción en el alimento es menor por lo que el efecto de la transferencia convectiva de energía térmica sobre la superficie del alimento es mayor.

3.6. Propiedades térmicas para la ecuación de Rjutov

Tabla 13. Propiedades térmicas de todas las muestras calculadas para la ecuación de Rjutov.

Alimento	Muestra	α (m ² /s)	Bi (h_{exp}) *	Bi (h_{cal}) **
Agua destilada	AT I	1.29×10^{-6}	0.03	0.02
	AP	1.29×10^{-6}	0.03	0.03
	AT II	1.31×10^{-6}	0.05	0.04
Carne molida de res	BR-1	8.15×10^{-7}	0.05	0.03
	AI-1	8.27×10^{-7}	0.06	0.05
	BR-2	8.14×10^{-7}	0.03	0.03
	EPU-2	8.17×10^{-7}	0.31	0.24
	A-2	1.28×10^{-6}	0.22	0.16
	BR-3	8.14×10^{-7}	0.04	0.03
	EPU-3	8.18×10^{-7}	0.04	0.02
	AI-3	8.29×10^{-7}	0.05	0.04
	A-3	1.28×10^{-6}	0.24	0.20
Pasta de hojaldre	C I	4.24×10^{-7}	0.60	0.63
	C II	4.27×10^{-7}	1.14	1.02
	C III	4.26×10^{-7}	1.52	1.42
	A-C	1.27×10^{-6}	0.14	0.13
	P I	4.32×10^{-7}	0.14	0.13
	P II	4.32×10^{-7}	0.08	0.11
	P III	4.32×10^{-7}	0.14	0.14
	A-P	1.29×10^{-6}	0.03	0.03
Guayabas	G a	9.43×10^{-7}	0.21	0.16
	G b	9.43×10^{-7}	0.30	0.19
	G c	9.42×10^{-7}	0.26	0.17
	A	1.18×10^{-6}	0.15	0.14
	G d	9.91×10^{-7}	0.18	0.13
	G e	9.93×10^{-7}	0.18	0.14
	G f	9.93×10^{-7}	0.21	0.16
	A	1.28×10^{-6}	0.19	0.17
Zanahorias	Z I	1.06×10^{-6}	0.15	0.11
	ZII	1.06×10^{-6}	0.20	0.09
	ZIII	1.07×10^{-6}	0.15	0.11
	A	1.28×10^{-6}	0.32	0.29
	Z a	1.06×10^{-6}	0.17	0.10
	Z b	1.06×10^{-6}	0.13	0.11
	Z c	1.06×10^{-6}	0.12	0.10
	A	1.27×10^{-6}	0.19	0.19

*Calculado con h de la ecuación de Plank; **Calculado con h de la ecuación de Ramaswamy y Tung (1981).

A= agua control; AI=aluminio; BR= bolsa resellable; EPU= espuma de poliuretano; G= guayaba; T= termopar en posición transversal; P= termopar en posición perpendicular; PH= pasta de hojaldre; Z= zanahoria; a, b, c, d, e, f, I, II, III, 1, 2, 3= muestras.

La Tabla 14 contiene los resultados del cambio de entalpía en el proceso completo de congelación para todas las muestras, por orden descendente las placas de agua destilada y los controles en cada prueba requieren de mayor cambio de entalpía, seguido de las zanahorias, carne molida de res, guayabas y por último la pasta de hojaldre; el valor del porcentaje de humedad en cada alimento determina la entalpía necesaria para el proceso de congelación, siendo mayor en alimentos con alto contenido de agua.

3.7. Propiedades térmicas para la ecuación de Levy

Tabla 14. Resultados del cálculo del cambio de entalpía durante el proceso completo de todas las muestras para la ecuación de Levy.

Alimento	Muestra	ΔH_{PR} (J/kg)*
Agua destilada	AT I	469131
	AP	477121
	AT II	479911
Carne molida de res	BR-1	361192
	Al-1	362606
	BR-2	363011
	EPU-2	348221
	A-2	474014
	BR-3	356758
	EPU-3	344236
	Al-3	353148
	A-3	466277
Pasta de hojaldre	C I	178009
	C II	184776
	C III	184951
	A-C	468224
	P I	198867
	P II	195835
	P III	198011
	A-P	470810
Guayabas	G a	357683
	G b	360429
	G c	359023
	A	470761
	G d	331036
	G e	335761
	G f	336215
	A	448495
Zanahorias	Z I	354341
	ZII	363348
	ZIII	368450
	A	418608
	Z a	380384
	Z b	370754
	Z c	359829
	A	452788

*Calculado Ibarz y Barbosa-Cánovas (1999)

A= agua control; Al=aluminio; BR= bolsa resellable; EPU= espuma de poliuretano; G= guayaba; T= termopar en posición transversal; P= termopar en posición perpendicular; PH= pasta de hojaldre; Z= zanahoria; a, b, c, d, e, f, I, II, III, 1, 2, 3= muestras.

La Tabla 15 los resultados calculados del cambio de entalpía volumétrica, en todas las muestras son menores para el periodo de preenfriamiento y mayores para el resto del proceso de congelación, lo mismo ocurre con los gradientes de temperatura. Ambos resultados corresponden a las consideraciones de Pham. Los valores de Bi se discutieron en la Tabla 13.

3.8. Propiedades térmicas para la ecuación de Q.T. Pham

Tabla 15. Cambio de entalpía volumétrica y del gradiente de temperatura de acuerdo con las consideraciones de la ecuación de Q.T. Pham con los valores de Bi calculados con los diferentes valores de h .

		ΔH_1 (J/m ³)	ΔT_1 (°C)	ΔH_2 (J/m ³)	ΔT_2 (°C)	h_{exp}	h_{cal}
						Bi S	Bi S
Agua	AT-I	121490924	31.75	331078240	13.10	0.03	0.02
	AP	124787700	32.05	331220216	13.08	0.03	0.03
	AT-II	130183380	32.63	335902362	12.11	0.05	0.04
Carne Molida de res	BR-1	124695900	33.42	257799095	13.70	0.05	0.03
	Al-1	117834076	32.82	268215889	12.96	0.06	0.05
	BR-2	120217106	33.24	265031631	13.96	0.03	0.03
	EPU-2	103454883	31.56	265893466	13.76	0.31	0.24
	Agua-2	126951986	32.94	328842555	14.13	0.22	0.16
	BR-3	113329519	32.15	265024155	13.60	0.04	0.03
	EPU-3	99246570	30.71	265757731	13.34	0.04	0.02
	Al-3	106866148	31.56	269012312	12.68	0.05	0.04
	Agua-3	118334958	31.76	329257198	13.70	0.24	0.20
Pasta de hojaldre	C I	80010449	32.28	121661056	14.42	0.60	0.63
	C II	82305346	32.64	127617703	14.06	1.14	1.02
	C III	82248575	32.63	127935971	14.08	1.52	1.42
	A-C	121603930	32.95	328271556	14.67	0.14	0.13
	P I	87236855	32.83	130889996	13.75	0.14	0.13
	P II	86702655	32.75	125889952	13.80	0.08	0.11
	P III	87846025	32.91	129567152	13.73	0.14	0.14
	A-P	120721804	32.41	330601254	13.74	0.03	0.03
Zanahorias	Z I	185062318	24.97	263976487	14.23	0.15	0.11
	Z II	195466623	25.29	270666906	14.23	0.20	0.09
	Z III	200838590	25.45	274962892	13.87	0.15	0.11
	Agua	70061610	27.73	328724805	14.58	0.32	0.29
	Z a	89240851	29.70	297780019	14.16	0.17	0.10
	Z b	92410230	30.04	283410687	14.04	0.13	0.11
	Z c	91805221	29.97	271258587	14.17	0.12	0.10
	Agua	105791409	31.28	327973843	14.60	0.19	0.19
Guayabas	G a	118643048	32.88	272070625	14.33	0.21	0.16
	G b	119316156	32.96	275072800	14.17	0.30	0.19
	G c	118427229	32.87	274306227	14.15	0.26	0.17
	Agua	123276121	32.96	329747746	14.22	0.15	0.14
	G d	90649025	29.99	270299864	14.34	0.18	0.13
	G e	93246028	30.27	273485643	14.24	0.18	0.14
	G f	94523838	30.41	272656058	14.23	0.21	0.16
	Agua	100014517	30.69	329421013	14.23	0.19	0.17

A= agua control; Al=aluminio; BR= bolsa resellable; EPU= espuma de poliuretano; G= guayaba; T= termopar en posición transversal; P= termopar en posición perpendicular; PH= pasta de hojaldre; Z= zanahoria; a, b, c, d, e, f, I, II, III, 1, 2, 3= muestras.

La Tabla 16 contiene los valores de las propiedades térmicas empleadas para la ecuación de López-Leyva y Hallström, principalmente los resultados obtenidos para el coeficiente de transferencia convectiva de energía térmica obtenidos por dos métodos y los resultados del número de Biot empleando ambos valores de h , los cuales ya fueron discutidos en las Tablas 12 y 13.

3.9. Propiedades térmicas para la ecuación de López-Leyva y Hallström

Tabla 16. Propiedades térmicas calculadas para la ecuación de López-Leyva y Hallström.

Alimento	Muestra	h_{exp} (W/m ² ·°C) ⁺	h_{cal} (W/m ² ·°C) ⁺⁺	Bi*	Bi**
Agua destilada	AT I	13.02	10.05	0.03	0.02
	AP	13.90	12.99	0.03	0.03
	AT II	22.19	20.27	0.05	0.04
Carne molida de res	BR-1	18.08	11.76	0.05	0.03
	Al-1	21.37	15.76	0.06	0.05
	BR-2	10.87	8.96	0.03	0.03
	EPU-2	10.37	8.30	0.31	0.24
	A-2	25.21	18.78	0.22	0.16
	BR-3	13.78	8.48	0.04	0.03
	EPU-3	13.78	7.54	0.04	0.02
	Al-3	17.63	13.49	0.05	0.04
	A-3	23.35	19.87	0.24	0.20
Pasta de hojaldre	C I	26.79	28.25	0.60	0.63
	C II	59.61	52.95	1.14	1.02
	C III	72.64	67.87	1.52	1.42
	A-C	17.87	16.60	0.14	0.13
	P I	25.60	22.68	0.14	0.13
	P II	14.19	20.27	0.08	0.11
	P III	25.68	24.63	0.14	0.14
	A-P	13.91	12.63	0.03	0.03
Zanahorias	Z I	15.70	11.45	0.15	0.11
	ZII	21.37	13.75	0.20	0.09
	ZIII	19.41	12.84	0.15	0.11
	A	18.26	17.04	0.32	0.29
	Z a	14.36	11.06	0.17	0.10
	Z b	14.19	11.29	0.13	0.11
	Z c	15.87	12.18	0.12	0.10
	A	22.41	20.20	0.19	0.19
Guayabas	G a	33.13	24.09	0.21	0.16
	G b	42.10	18.13	0.30	0.19
	G c	33.92	23.71	0.26	0.17
	A	37.95	34.46	0.15	0.14
	G d	29.37	17.03	0.18	0.13
	G e	24.16	21.06	0.18	0.14
	G f	24.75	20.41	0.21	0.16
	A	23.41	22.59	0.19	0.17

+Calculado con la ecuación de Plank; ++Calculado con la ecuación de Ramaswamy y Tung (1981) *Calculado con h de la ecuación de Plank; **Calculado con h de la ecuación de Ramaswamy y Tung (1981).

A= agua control; Al=aluminio; BR= bolsa resellable; EPU= espuma de poliuretano; G= guayaba; T= termopar en posición transversal; P= termopar en posición perpendicular; PH= pasta de hojaldre; Z= zanahoria; a, b, c, d, e, f, I, II, III, 1, 2, 3= muestras.

La Tabla 17 presenta los resultados de la estimación del tiempo de cambio de fase empleando la ecuación de Plank y la ecuación de López-Leyva y Hallström. En relación con los resultados obtenidos con la ecuación de Plank en todas las muestras sin considerar su geometría se obtuvieron buenos porcentajes de error en relación con los tiempos experimentales, sin embargo, un muestra tiene porcentaje de error mayor de 100% como es el caso de Z II, el valor elevado corresponde a las incertidumbres de las propiedades térmicas y el resto de las variables de la ecuación de Plank.

Para la ecuación de López-Leyva y Hallström los porcentajes de error son mayores excepto para las guayabas, las zanahorias y la pasta de hojaldre en cilindro, lo cual indica que la ecuación es más útil para geometrías esféricas y en segundo lugar para cilindros, por lo tanto, para muestras en placa no es conveniente emplearla.

3.10. Tiempo calculado del cambio de fase

Tabla 17 Tiempo de congelación calculado con la ecuación de Plank y la ecuación de López-Leyva y Hallström.

		Plank			López-Leiva y Hallström			
		$F_{exp} (min)$	$F_{cal} (min)$	Error (%)	h_{exp}		h_{cal}	
					$F_{cal} (min)$	% error	$F_{cal} (min)$	% error
A	T-I	110	142.00	29.09	218.59	98.72	282.59	156.90
	P	115	123.00	6.96	228.43	98.63	244.43	112.55
	T-II	65	71.00	9.23	128.60	97.84	140.60	116.31
C M	BR-1	75	99.05	32.06	129.75	73.00	198.45	164.59
	Al-1	65	74.05	13.92	108.89	67.52	147.04	126.22
	BR-2	115	127.03	10.46	293.57	155.27	355.53	209.15
	EPU-2	125	137.04	9.63	218.48	74.78	272.48	117.98
	Agua-2	140	157.00	12.14	114.37	-18.31	151.30	8.07
	BR-3	120	137.03	14.19	168.92	40.77	273.22	127.68
	EPU-3	130	154.03	18.49	168.17	29.36	305.94	135.34
	Al-3	70	78.04	11.48	131.72	88.17	171.66	145.22
	Agua-3	175	185.00	5.71	152.30	-12.97	177.32	1.33
P H	C I	50	48.00	-4.00	45.04	-9.93	43.04	-13.93
	C II	25	27.00	8.00	20.82	-16.72	22.82	-8.73
	C III	25	26.00	4.00	20.04	-19.84	21.04	-15.84
	A-C	140	150.00	7.14	135.89	-2.94	145.89	4.21
	P I	30	28.00	-6.67	48.47	61.58	54.47	81.58
	P II	45	32.00	-28.89	88.43	96.52	62.43	38.74
	P III	30	26.00	-13.33	48.47	61.57	50.47	68.23
	A-P	100	110.00	10.00	198.63	98.63	218.63	118.63
Z	Z I	40	53.42	33.54	38.32	-4.19	52.17	30.43
	Z II	35	76.19	117.69	33.17	-5.24	74.72	113.49
	Z III	40	55.43	38.56	42.92	7.31	60.68	51.69
	Agua	80	86.25	7.81	74.37	-7.04	81.31	1.64
	Z a	60	100.00	66.67	57.80	-3.67	97.80	63.00
	Z b	65	74.00	13.85	63.18	-2.79	72.18	11.05
	Z c	60	72.00	20.00	58.38	-2.69	70.38	17.31
	Agua	110	123.99	12.72	115.13	4.66	119.13	8.30
G	G a	140	201.96	44.25	183.49	31.07	180.78	29.13
	G b	110	175.96	59.96	160.72	46.10	156.41	42.19
	G c	115	180.31	56.79	164.56	43.10	160.86	39.88
	Agua	145	159.96	10.32	155.56	3.70	155.15	7.00
	G d	135	172.00	27.41	168.06	24.49	166.31	23.20
	G e	140	173.00	23.57	169.33	20.95	167.75	19.82
	G f	135	172.00	27.41	168.20	24.59	166.09	23.03
	Agua	130	143.00	10.00	138.49	6.53	137.82	6.02

*Calculado usando la ecuación de Plank; **Calculado usando la ecuación de Ramaswamy y Tung (1981).

A= agua control; Al=aluminio; BR= bolsa resellable; EPU= espuma de poliuretano; G= guayaba; T= termopar en posición transversal; P= termopar en posición perpendicular; PH= pasta de hojaldre; Z= zanahoria; a, b, c, d, e, f, I, II, III, 1, 2, 3= muestras.

La Tabla 18 muestra los resultados de la estimación del tiempo del proceso completo de congelación con las ecuaciones de Rjutov, Levy y Pham usando como valor de h el obtenido a partir del tiempo experimental de cambio de fase de acuerdo con la ecuación de Plank. De acuerdo con la ecuación de Rjutov, los porcentajes de error en todas las muestras son grandes, siendo menores en la pasta de hojaldre y en las zanahorias; lo anterior se atribuye a que esta ecuación no es adecuada para estimar el tiempo del proceso completo de congelación. El porcentaje de error se calculó con la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Error} = \left[\frac{(F_{cal} - F_{exp})}{F_{exp}} \right] 100$$

Aunque los porcentajes de error difieren en la ecuación de Levy, ésta proporciona los mejores resultados en los tiempos estimados; debe mencionarse que este modelo es el más sencillo de aplicar para fines de cálculo, considerando sólo como propiedades térmicas el cambio de entalpía en el proceso completo y para el cambio de fase, por lo anterior la incertidumbre en la estimación es menor.

Por último, la ecuación de Pham es la más complicada de emplear por las consideraciones que implica, sin embargo, proporciona menores porcentajes de error que la ecuación de Rjutov, pero mayores que la ecuación de Levy.

En esta tesis la ecuación más adecuada para estimar el tiempo del proceso completo de congelación fue la de Levy, después la de Q.T.Pham y por último la ecuación de Rjutov.

3.11. Tiempo calculado del proceso completo de congelación

Tabla 18. Tiempo (min) del proceso completo congelación calculado con h_{exp} obtenida de la ecuación de Plank.

		Rjutov			Levy		Pham	
		$F_{eff\ exp}$	$F_{eff\ cal}$	Error (%)	$F_{eff\ cal}$	Error (%)	$F_{eff\ cal}$	Error (%)
A	T-I	225	457.48	103.32	170.47	-27.46	374.98	59.56
	P	215	327.27	52.22	174.23	-24.25	352.94	53.45
	T-II	130	189.48	45.75	107.60	-40.22	241.16	33.98
C M	BR-1	205	277.33	35.28	146.27	-28.65	212.85	3.83
	Al-1	140	311.79	122.70	121.84	-40.57	193.16	-5.77
	BR-2	255	412.80	61.88	216.21	-15.21	492.06	92.97
	EPU-2	250	536.93	114.77	220.33	-11.87	366.07	46.43
	Agua-2	255	489.30	91.88	236.91	-7.10	187.35	-26.53
	BR-3	270	397.64	47.28	219.82	-18.59	282.11	4.48
	EPU-3	260	402.39	54.76	225.69	-16.41	282.41	4.60
	Al-3	150	224.32	49.55	125.78	-30.12	234.80	30.45
	Agua-3	315	682.39	116.63	288.44	-8.43	248.03	-21.26
P H	C I	180	340.65	89.25	150.22	-16.54	75.09	-58.28
	C II	140	258.03	84.31	114.14	-18.47	35.75	-74.47
	C III	140	234.43	67.45	144.43	3.17	34.35	-75.46
	A-C	255	497.23	94.99	153.30	-39.88	220.27	-13.62
	P I	115	179.34	55.95	175.09	29.70	82.12	-39.17
	P II	100	271.81	171.81	157.91	16.97	140.98	4.43
	P III	115	185.45	61.26	143.60	6.37	81.35	-39.74
	A-P	225	393.37	74.83	93.55	-59.33	335.57	45.90
Z	Z I	105	167.38	59.41	63.86	-39.18	61.58	-41.35
	Z II	105	146.10	39.14	55.80	-46.86	55.08	-47.55
	Z III	100	179.14	79.14	63.25	-39.76	74.11	-29.42
	Agua	140	256.93	83.52	110.56	-21.03	113.85	-18.68
	Z a	160	265.31	65.82	94.85	-40.72	86.79	-45.76
	Z b	125	332.57	166.05	107.21	-14.23	91.10	-27.12
	Z c	160	262.12	63.82	101.09	-36.82	79.80	-50.13
	Agua	200	385.85	92.93	173.31	-13.34	182.29	-8.85
G A	G a	365	827.88	126.82	259.11	-29.01	219.79	-39.78
	G b	325	732.98	125.53	203.25	-37.46	173.25	-46.69
	G c	330	784.07	137.60	212.26	-35.68	181.96	-44.86
	Agua	255	666.83	161.50	250.59	-1.73	241.05	-5.47
	G d	320	734.13	129.41	224.83	-29.74	205.24	-35.86
	G e	320	820.08	156.28	234.35	-26.77	217.93	-31.90
	G f	320	787.99	146.25	227.62	-28.87	208.38	-34.88
	T-I	215	501.26	133.15	201.16	-6.44	199.46	-5.02

A= agua control; Al=aluminio; BR= bolsa resellable; EPU= espuma de poliuretano; G= guayaba; T= termopar en posición transversal; P= termopar en posición perpendicular; PH= pasta de hojaldre; Z= zanahoria; a, b, c, d, e, f, I, II, III, 1, 2, 3= muestras.

Tabla 19. Tiempo (min) del proceso completo congelación calculado con h obtenida de acuerdo al método de Ramaswamy y Tung (1981).

		Rjutov			Levy		Pham	
		$F_{eff\ exp}$	$F_{eff\ cal}$ (min)	Error (%)	$F_{eff\ cal}$	Error (%)	$F_{eff\ cal}$	Error (%)
A	T-I	225	545.38	142.39	170.47	-27.46	484.83	106.31
	P	215	337.47	56.96	174.23	-24.25	377.68	64.21
	T-II	130	197.90	52.23	107.60	-40.22	263.69	46.49
C M	BR-1	205	362.06	76.62	170.47	-27.46	325.65	58.86
	Al-1	140	388.31	177.36	174.23	-24.25	260.92	27.28
	BR-2	255	462.42	81.34	107.60	-40.22	595.98	133.72
	EPU-2	250	626.19	150.48	146.27	-28.65	456.60	82.64
	Agua-2	255	579.59	127.29	121.84	-40.57	248.11	-2.70
	BR-3	270	531.38	96.81	216.21	-15.21	456.43	69.05
	EPU-3	260	579.55	122.91	220.33	-11.87	513.97	90.36
	Al-3	150	261.12	74.08	236.91	-7.10	306.06	70.03
	Agua-3	315	753.19	139.11	219.82	-18.59	288.98	-8.26
P H	C I	180	328.46	82.48	150.22	-16.54	71.72	-60.16
	C II	140	280.58	100.42	114.14	-18.47	39.24	-71.97
	C III	140	244.95	74.96	144.43	3.17	36.11	-74.21
	A-C	255	518.53	103.34	153.30	-39.88	236.52	-7.25
	P I	115	196.09	70.51	175.09	29.70	92.31	-31.62
	P II	100	212.39	112.39	157.91	16.97	99.47	-26.32
	P III	115	191.27	66.32	143.60	6.37	84.71	-37.25
	A-P	225	418.33	85.93	93.55	-59.33	369.38	60.60
Z	Z I	105	212.01	101.91	63.86	-39.18	83.89	-20.10
	Z II	105	283.10	169.62	55.80	-46.86	124.35	18.43
	Z III	100	235.55	135.55	63.25	-39.76	104.85	-0.14
	Agua	140	271.88	94.20	110.56	-21.03	124.55	-11.04
	Z a	160	396.42	147.76	94.85	-40.72	147.06	-8.09
	Z b	125	367.82	194.26	107.21	-14.23	104.10	-16.72
	Z c	160	299.09	86.93	101.09	-36.82	96.24	-39.85
	Agua	200	393.88	96.94	173.31	-13.34	188.65	-5.68
G	G a	365	1051.13	187.98	259.11	-29.01	297.33	-18.54
	G b	325	1035.94	218.75	203.25	-37.46	262.55	-19.21
	G c	330	1088.01	229.70	212.26	-35.68	269.32	-18.39
	Agua	255	697.94	173.70	250.59	-1.73	257.70	1.06
	G d	320	894.41	179.50	224.83	-29.74	263.84	-17.55
	G e	320	978.03	205.63	234.35	-26.77	271.47	-15.16
	G f	320	965.40	201.69	227.62	-28.87	268.34	-16.14
	T-I	215	535.17	148.92	201.16	-6.44	220.31	2.47

A= agua control; Al=aluminio; BR= bolsa resellable; EPU= espuma de poliuretano; G= guayaba; T= termopar en posición transversal; P= termopar en posición perpendicular; PH= pasta de hojaldre; Z= zanahoria; a, b, c, d, e, f, I, II, III, 1, 2, 3= muestras.

3.12. Análisis de sensibilidad de las ecuaciones

3.12.1. Ecuación de Plank

Una vez conocidos el porcentaje de reducción y el porcentaje de diferencia de tiempos, se construyeron las gráficas que se muestran en las Figuras 31 a 36 para cada uno de los parámetros.

a) Efecto del coeficiente de transferencia convectiva de energía térmica (h)

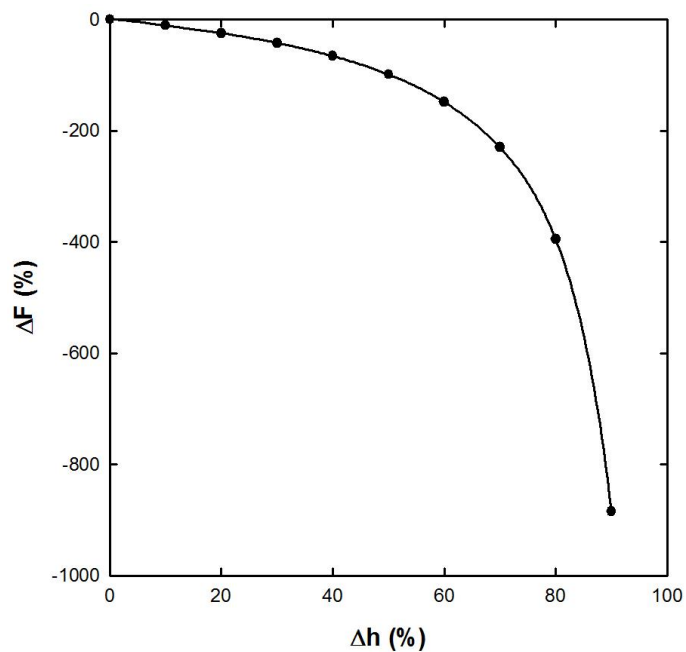


Figura 31. Efecto de la reducción de h en el cálculo del tiempo de congelación al usar la ecuación de Plank.

b) Efecto de la conductividad térmica (k)

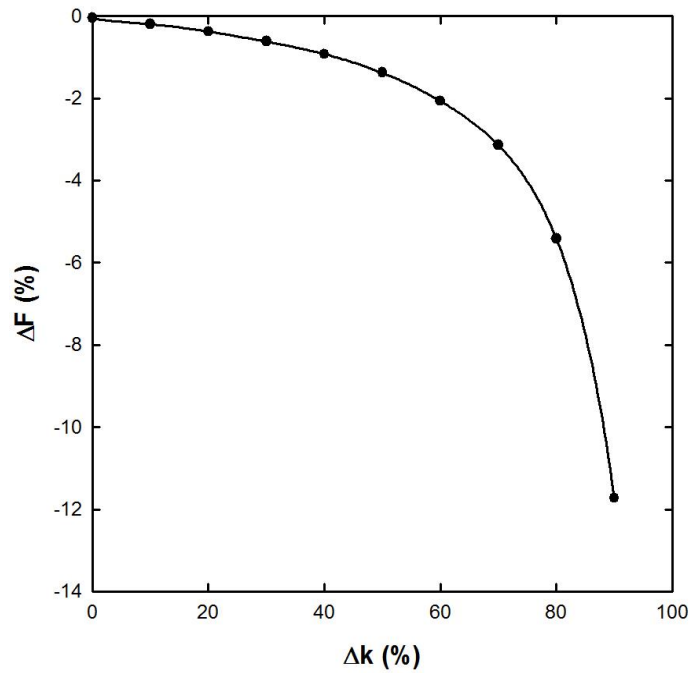


Figura 32. Efecto de la reducción de k en el cálculo del tiempo de congelación al usar la ecuación de Plank.

c) Efecto de la temperatura del medio de enfriamiento (T_a)

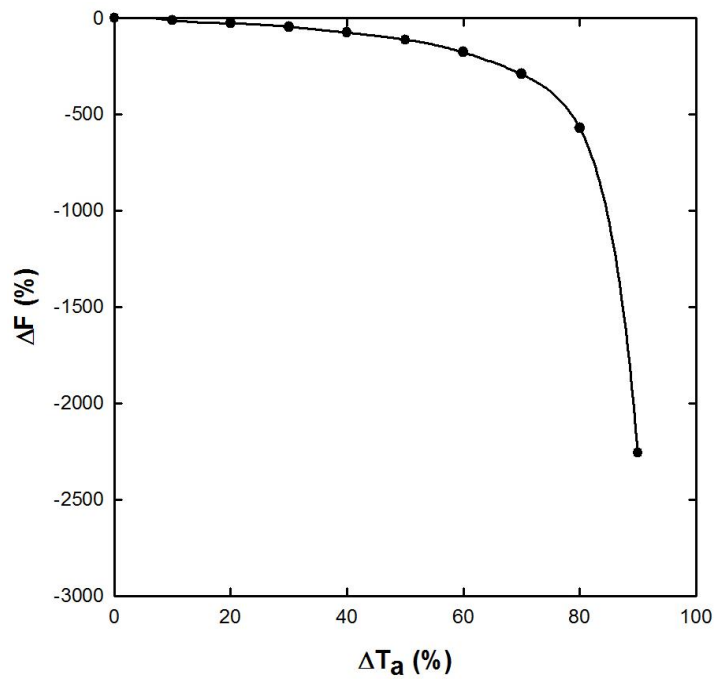


Figura 33. Efecto de la reducción de T_a en el cálculo del tiempo de congelación al usar la ecuación de Plank.

d) Efecto del calor latente de congelación (ΔH_f)

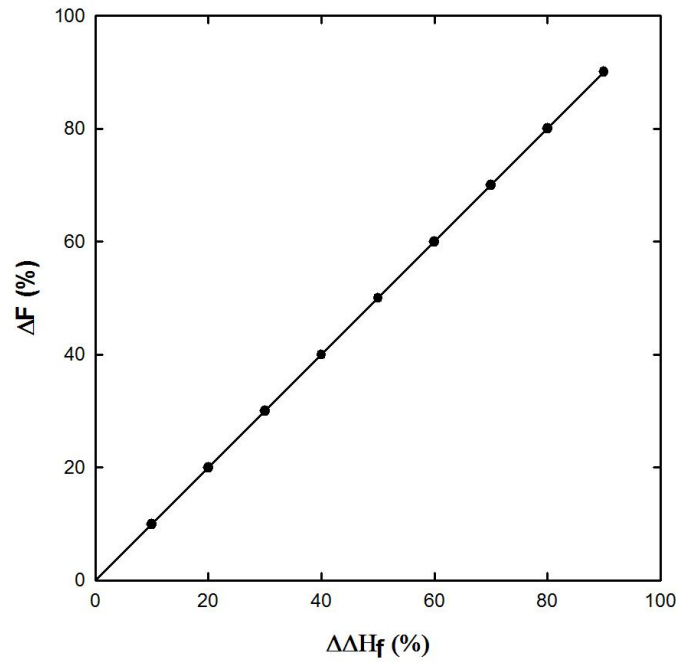


Figura 34. Efecto de la reducción de ΔH_f en el cálculo del tiempo de congelación al usar la ecuación de Plank

e) Efecto de la densidad (ρ)

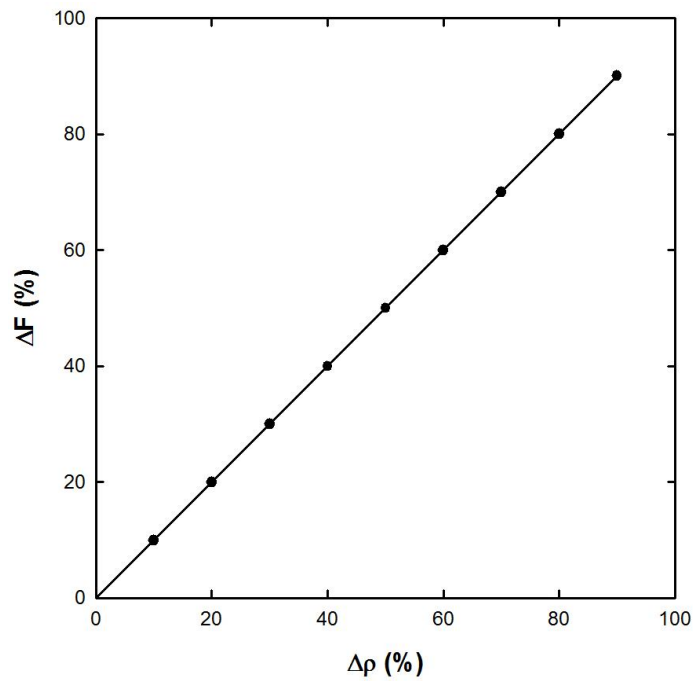


Figura 35. Efecto de la reducción de ρ en el cálculo del tiempo de congelación al usar la ecuación de Plank.

f) Efecto de la temperatura inicial de congelación (T_f)

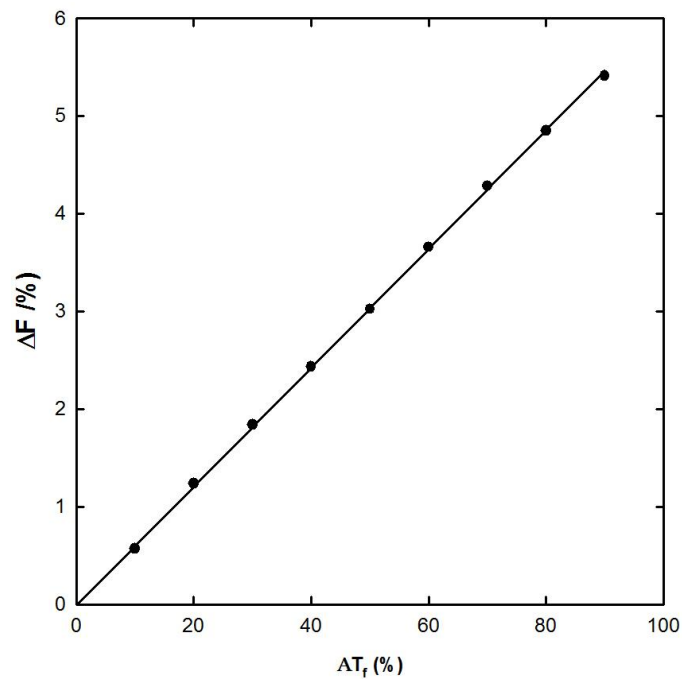


Figura 36. Efecto de la reducción de T_f en el cálculo del tiempo de congelación al usar la ecuación de Plank

Tabla 20. Efecto de la reducción de los parámetros de la ecuación de Plank sobre el porcentaje de la diferencia de tiempos de congelación al reducir 10% los valores de cada parámetro.

Parámetro	ΔF (%)
h	-11.07
ΔH_f	9.96
ρ	9.94
k	-0.20
T_f	0.57
T_a	-11.96

3.12.2. Ecuación de López- Leyva y Hallström

a) Efecto de la reducción de h_{exp}

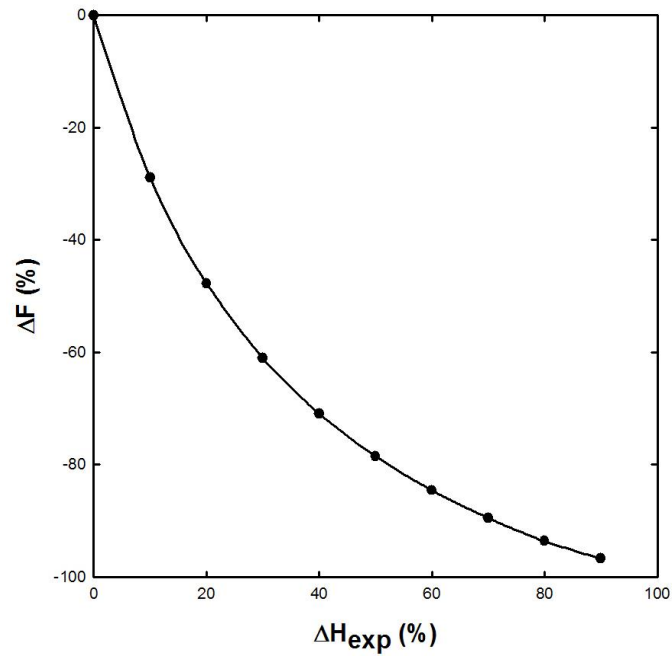


Figura 37. Efecto de la reducción de h_{exp} en el cálculo del tiempo de congelación al usar la ecuación de López-Leyva y Hallström.

b) Efecto de la densidad (ρ)

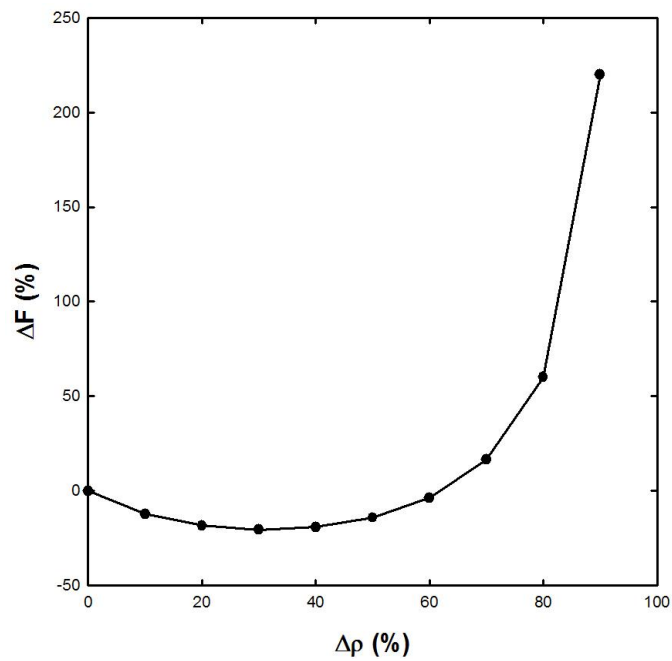


Figura 38. Efecto de la reducción de ρ en el cálculo del tiempo de congelación al usar la ecuación de López-Leyva y Hallström.

c) Efecto del calor latente (ΔH_f)

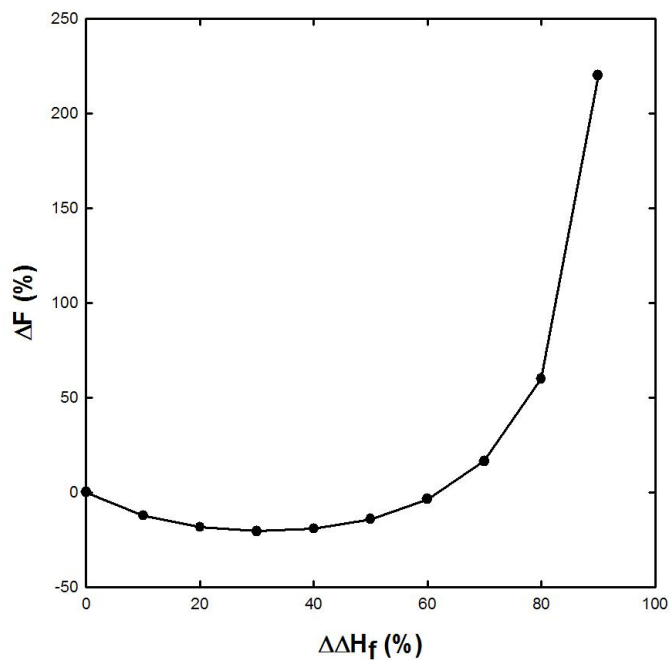


Figura 39. Efecto de la reducción de ΔH_f en el cálculo del tiempo de congelación al usar la ecuación de López-Leyva y Hallström.

d) Efecto de la temperatura inicial de congelación T_f

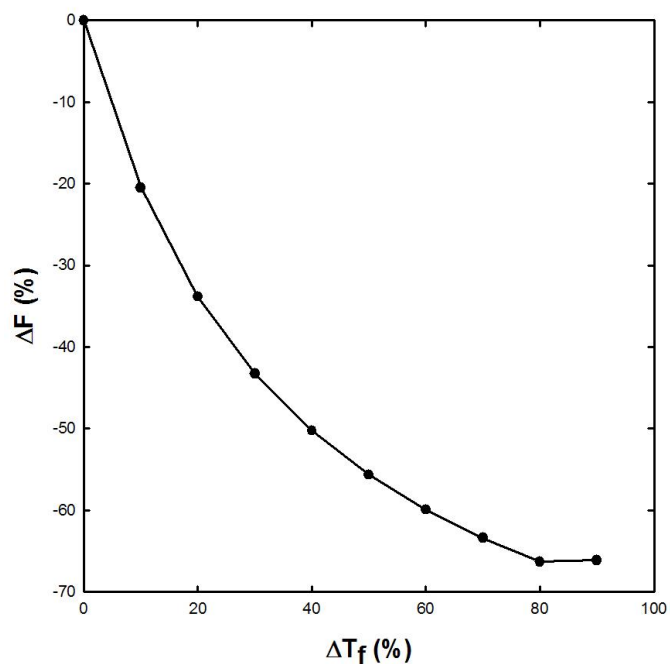


Figura 40. Efecto de la reducción de T_f en el cálculo del tiempo de congelación al usar la ecuación de López-Leyva y Hallström.

e) Efecto de la temperatura del medio de enfriamiento T_a

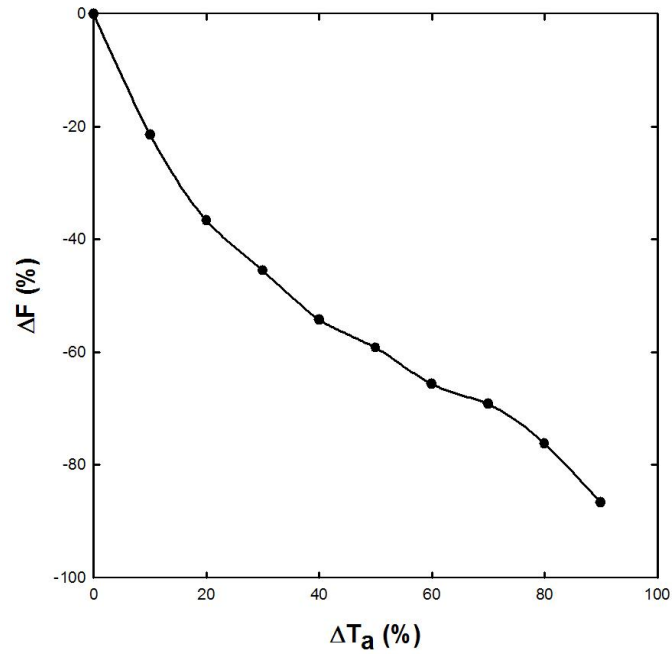


Figura 41. Efecto de la reducción de T_a en el cálculo del tiempo de congelación al usar la ecuación de López-Leyva y Hallström.

f) Efecto del número de Bi

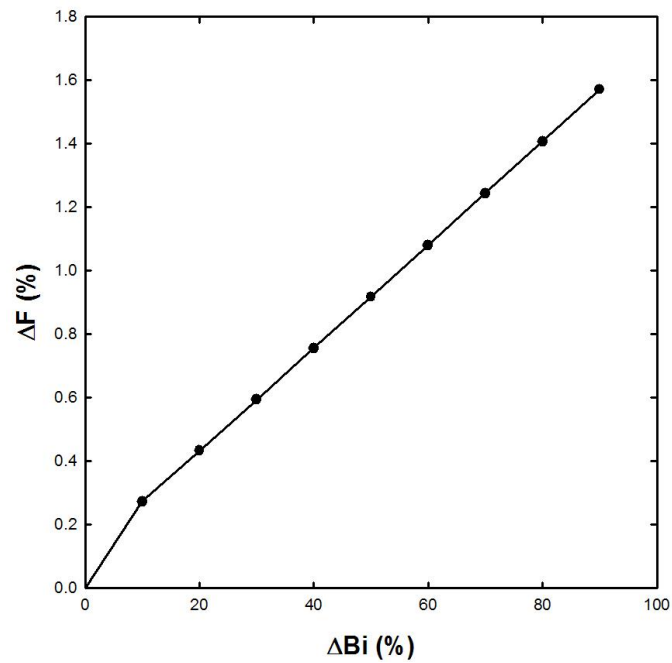


Figura 42. Efecto de la reducción de Bi en el cálculo del tiempo de congelación al usar la ecuación de López-Leyva y Hallström.

g) Efecto de P

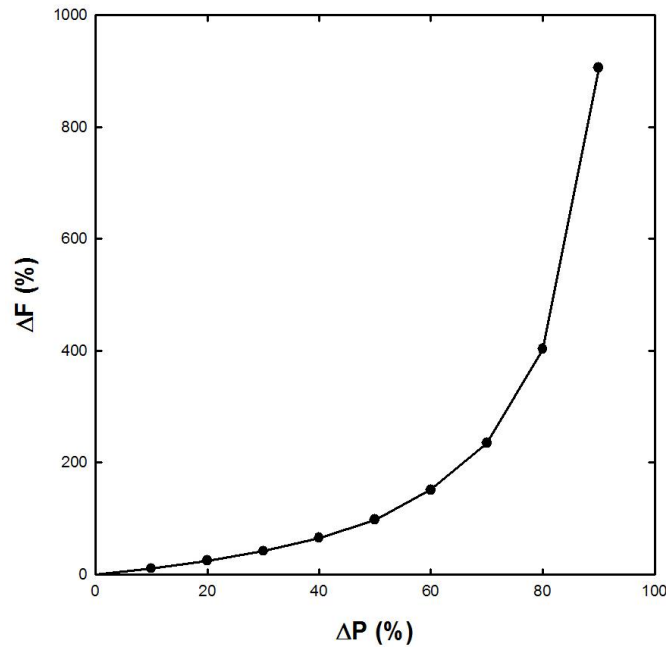


Figura 43. Efecto de la reducción de P en el cálculo del tiempo de congelación al usar la ecuación de López-Leyva y Hallström.

Tabla 21. Efecto de la reducción de los parámetros de la ecuación de López-Leyva y Hallström sobre el porcentaje de la diferencia de tiempos de congelación al reducir 10% los valores de cada parámetro.

Parámetro	ΔF (%)
ρ	-12.22
ΔH_f	-12.21
h_{exp}	-28.91
T_f	-20.50
T_a	-21.43
Bi	0.27
P	10.88

3.12.3. Ecuación de Rjutov

a) Efecto del número de biot Bi

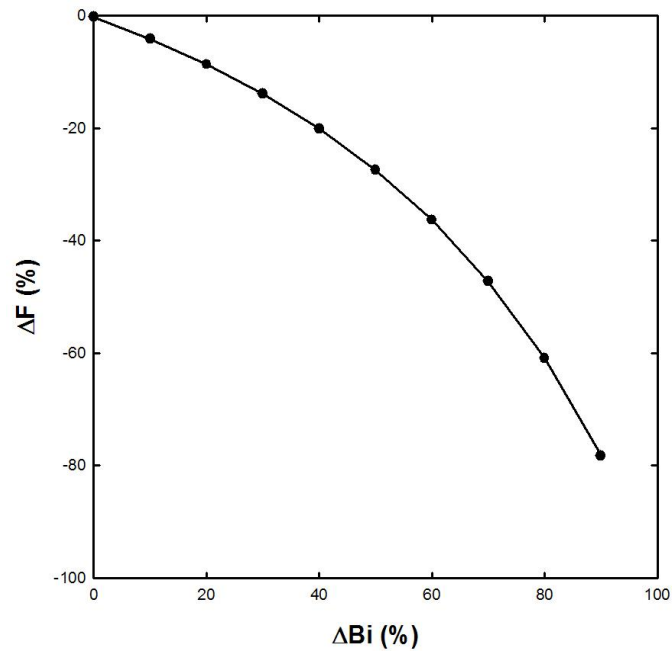


Figura 44. Efecto de la reducción de Bi en el cálculo del tiempo del proceso completo de congelación con la ecuación de Rjutov

b) Efecto de la difusividad térmica α

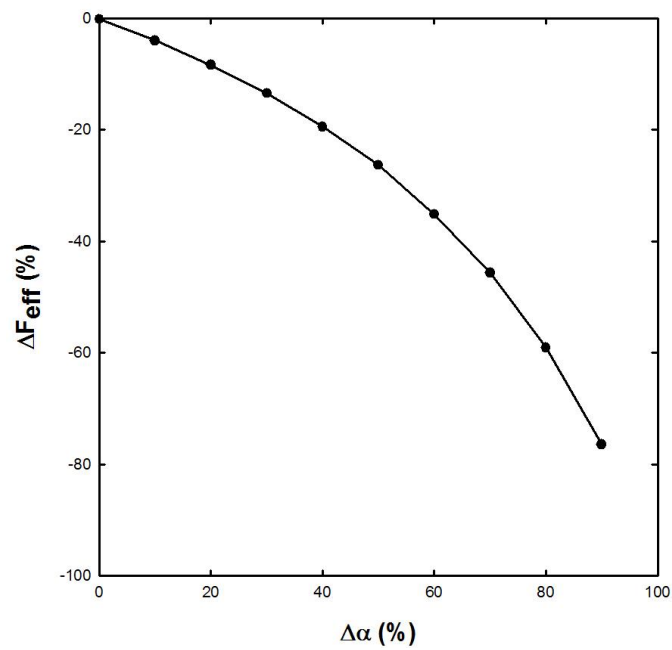


Figura 45. Efecto de la reducción de α en el cálculo del tiempo del proceso completo de congelación con la ecuación de Rjutov.

c) Efecto de la temperatura inicial del alimento T_i

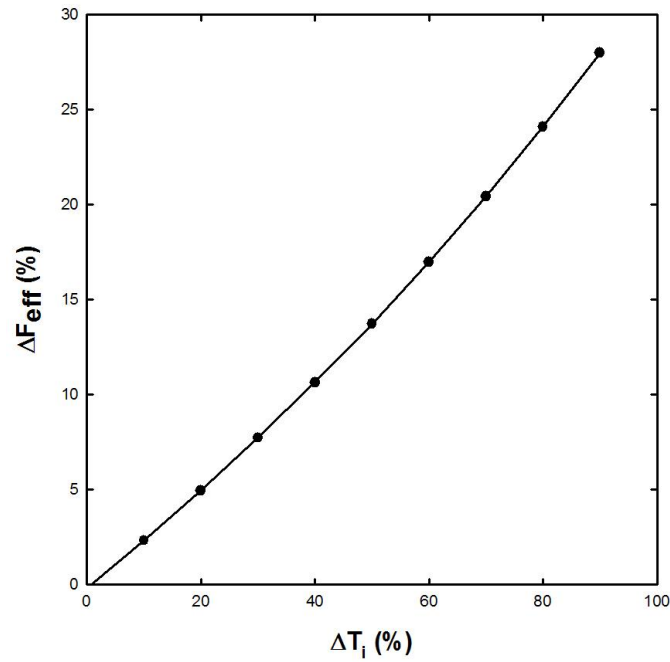


Figura 46. Efecto de la reducción de T_i en el cálculo del tiempo del proceso completo de congelación con la ecuación de Rjutov

d) Efecto de la temperatura inicial de congelación T_f

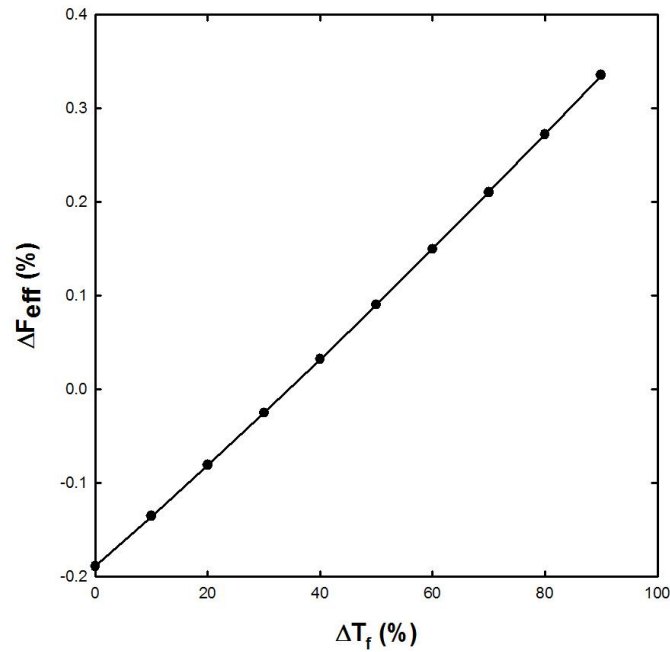


Figura 47. Efecto de la reducción de T_f en el cálculo del tiempo del proceso completo de congelación con la ecuación de Rjutov

e) Efecto de la temperatura final de la muestra T_e

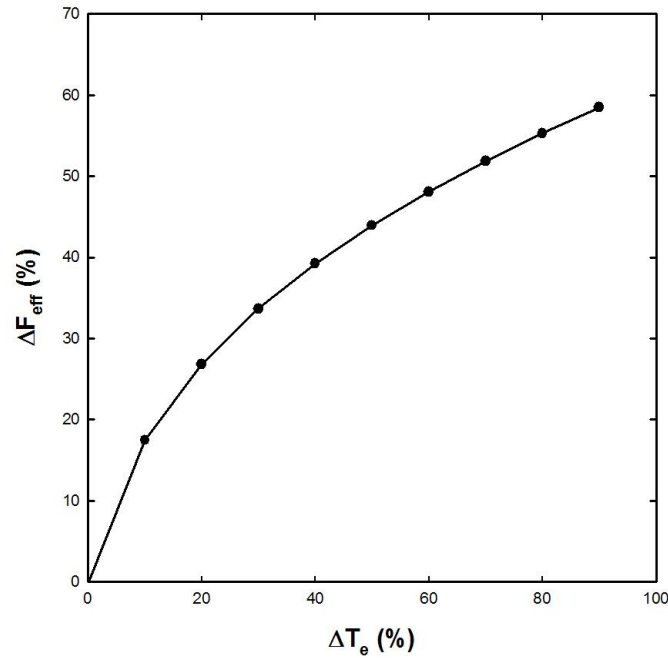


Figura 48. Efecto de la reducción de T_e en el cálculo del tiempo del proceso completo de congelación con la ecuación de Rjutov

f) Efecto del tiempo de congelación de acuerdo a F_{Plank}

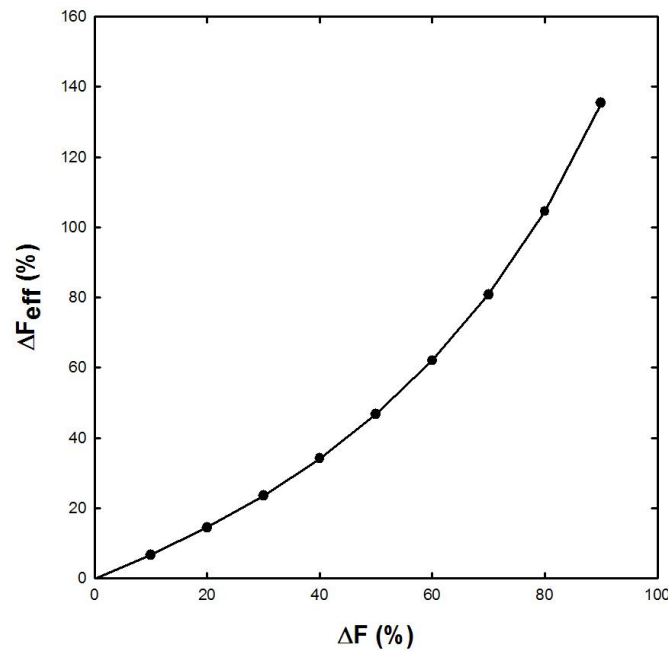


Figura 49. Efecto de la reducción de F en el cálculo del tiempo del proceso completo de congelación con la ecuación de Rjutov.

g) Efecto de la temperatura del medio de enfriamiento T_a

No es posible reducir la temperatura del medio de enfriamiento debido a que T_a no puede alcanzar temperaturas menores a la temperatura final del alimento (T_e).

Tabla 22. Efecto de la reducción de los parámetros de la ecuación de Rjutov sobre el porcentaje de la diferencia de tiempos de congelación al reducir 10% los valores de cada parámetro.

Parámetro	ΔF_{eff} (%)
Bi	-4.12
α	-4.01
T_i	2.32
T_f	-0.14
T_a	---
T_e	17.44
F	6.64

3.12.4. Ecuación de Levy

a) Efecto del tiempo de congelación experimental F_{exp}

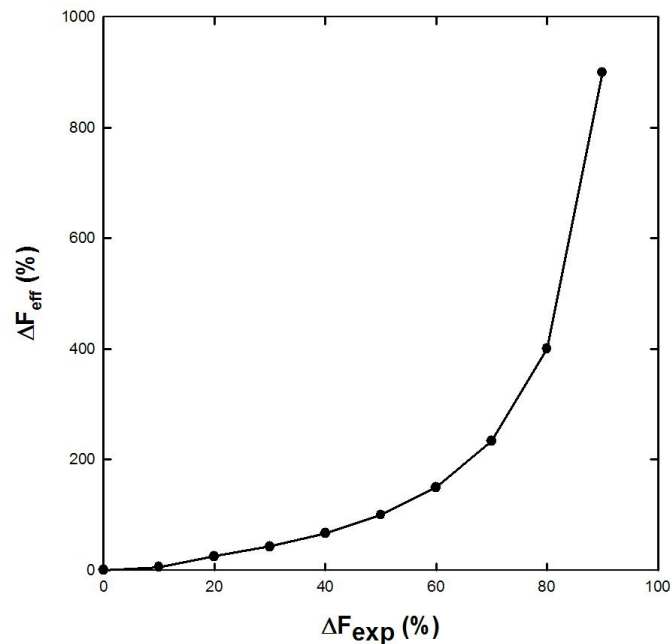


Figura 50. Efecto de la reducción de F_{exp} en el cálculo del tiempo del proceso completo de congelación al usar la ecuación de Levy.

b) Efecto del cambio de entalpía del proceso completo ΔH_{PR}

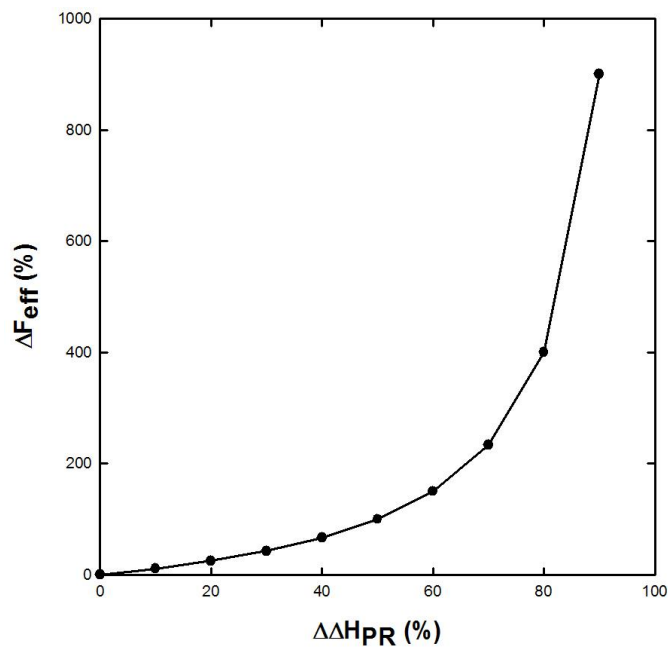


Figura 51. Efecto de la reducción de ΔH_{PR} en el cálculo del tiempo del proceso completo de congelación al usar la ecuación de Levy.

c) Efecto del calor latente ΔH_f

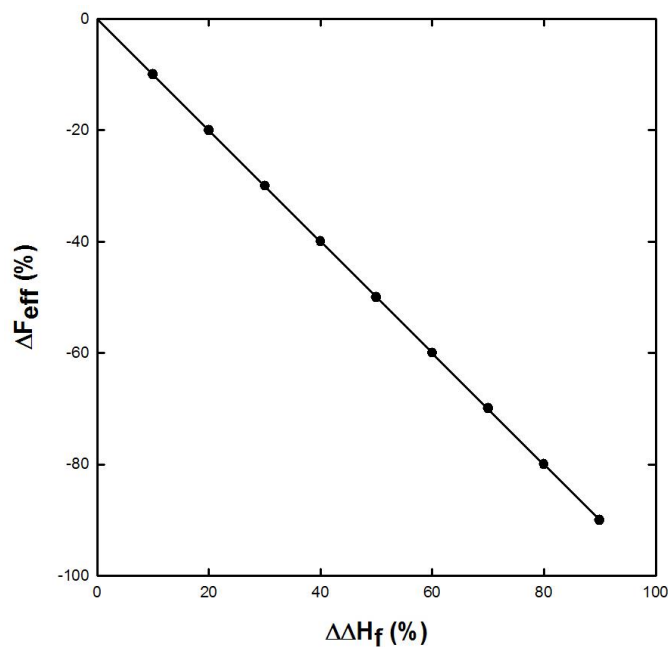


Figura 52. Efecto de la reducción de ΔH_f en el cálculo del tiempo del proceso completo de congelación al usar la ecuación de Levy.

f) Efecto de ΔT_1

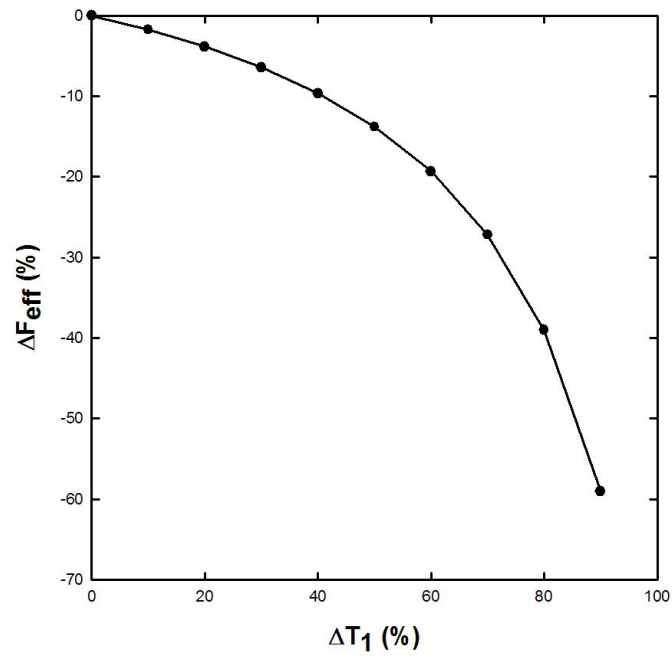


Figura 60. Efecto de la reducción de ΔT_1 en el cálculo del tiempo del proceso completo de congelación al usar la ecuación de Q. T. Pham.

g) Efecto de ΔT_2

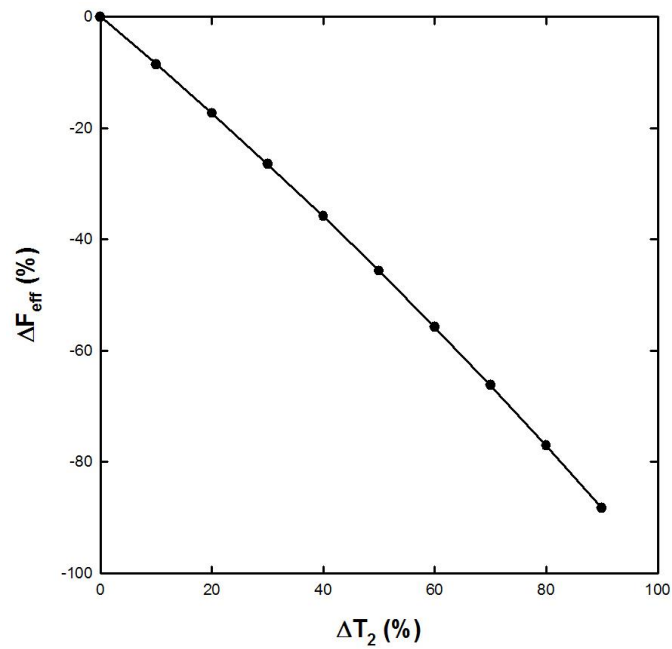


Figura 61. Efecto de la reducción de ΔT_2 en el cálculo del tiempo del proceso completo de congelación al usar la ecuación de Q. T. Pham.

d) Efecto de la temperatura inicial T_i

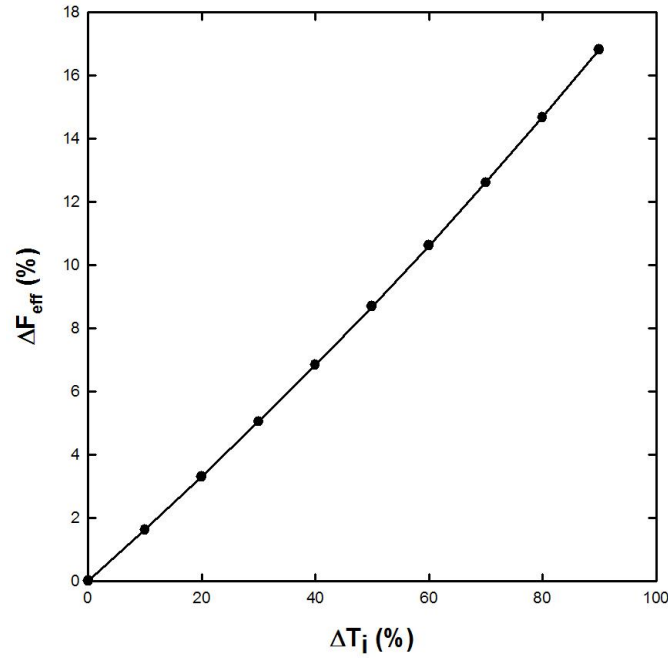


Figura 53. Efecto de la reducci3n de T_i en el c3lculo del tiempo del proceso completo de congelaci3n al usar la ecuaci3n de Levy.

e) Efecto de la temperatura inicial de congelaci3n T_f

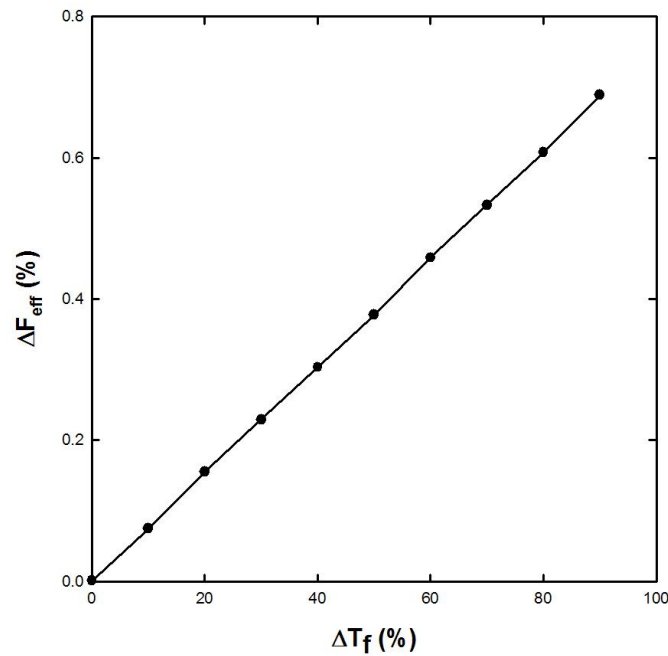


Figura 54. Efecto de la reducci3n de T_f en el c3lculo del tiempo del proceso completo de congelaci3n al usar la ecuaci3n de Levy.

Tabla 23. Efecto de la reducción de los parámetros de la ecuación de Levy sobre el porcentaje de la diferencia de tiempos de congelación al reducir 10% los valores de cada parámetro.

Parámetro	ΔF (%)
F	9.62
ΔH_{PR}	10
ΔH_f	-11
T_i	2
T_f	0.1

3.12.5. Ecuación de Q. T. Pham

a) Efecto de h_{exp}

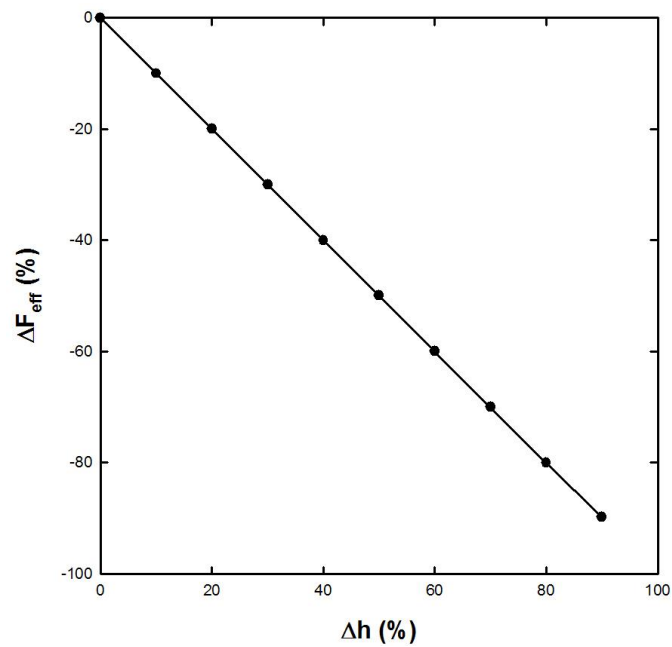


Figura 55. Efecto de la reducción de h_{exp} en el cálculo del tiempo del proceso completo de congelación al usar la ecuación de Q. T. Pham.

b) Efecto de V

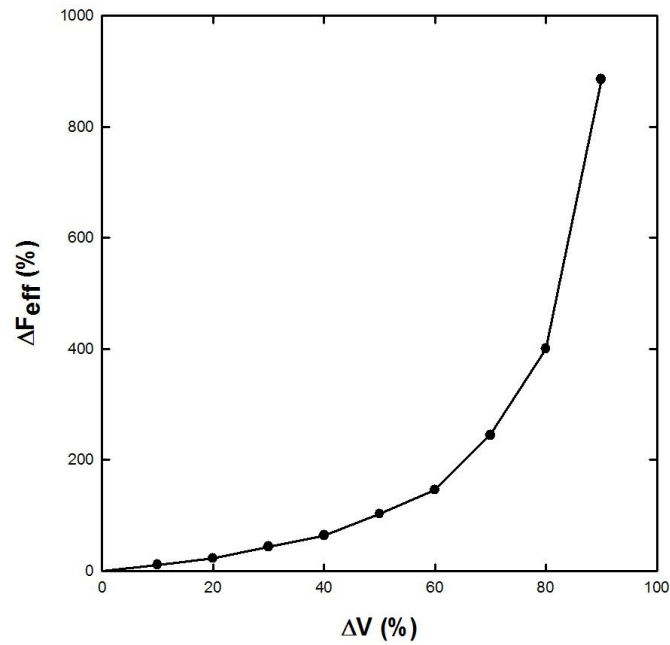


Figura 56. Efecto de la reducción de V en el cálculo del tiempo del proceso completo de congelación al usar la ecuación de Q. T. Pham.

c) Efecto de f_o

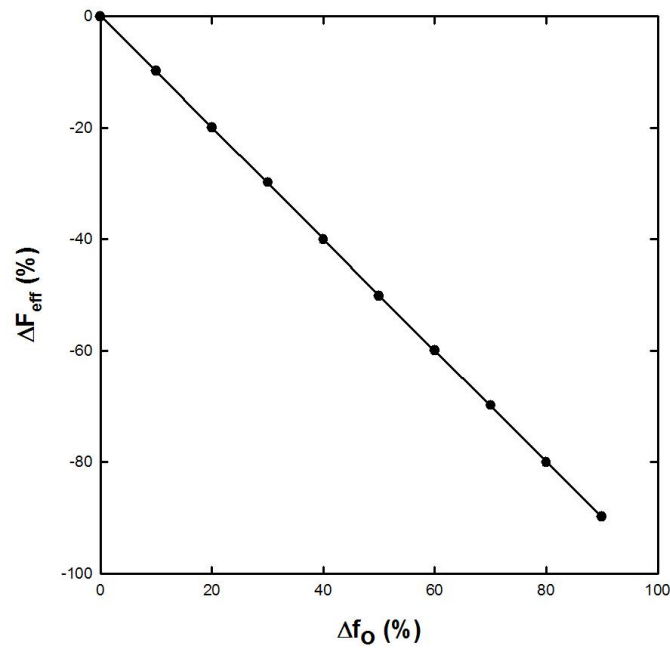


Figura 57. Efecto de la reducción de f_o en el cálculo del tiempo del proceso completo de congelación al usar la ecuación de Q. T. Pham.

d) Efecto de ΔH_1

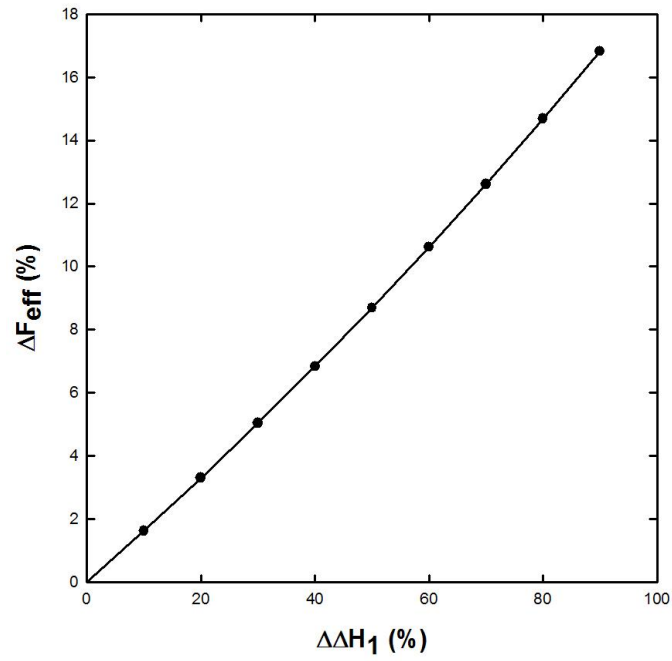


Figura 58. Efecto de la reducción de ΔH_1 en el cálculo del tiempo del proceso completo de congelación al usar la ecuación de Q. T. Pham.

e) Efecto de ΔH_2

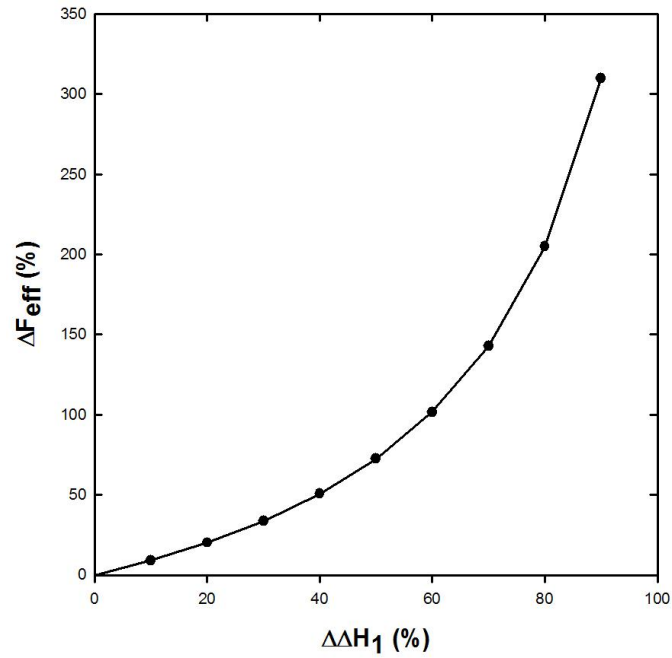


Figura 59. Efecto de la reducción de ΔH_2 en el cálculo del tiempo del proceso completo de congelación al usar la ecuación de Q. T. Pham.

h) Efecto de Bi

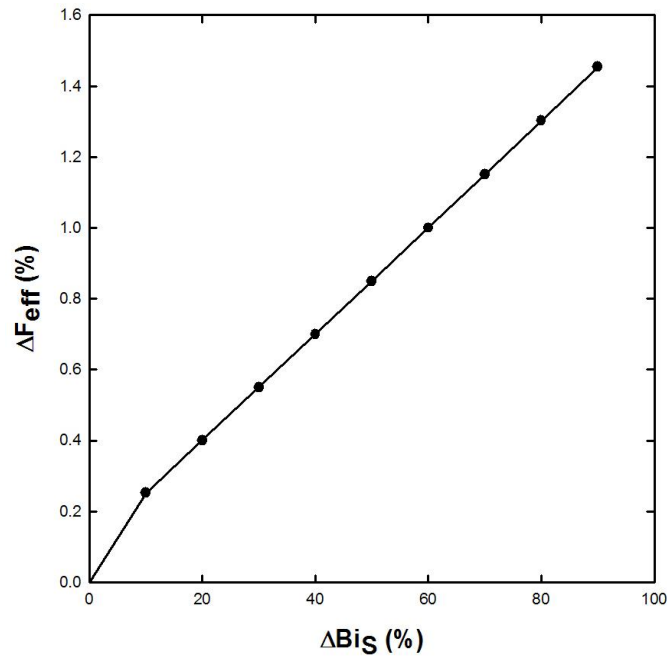


Figura 62. Efecto de la reducción de Bi_s en el cálculo del tiempo del proceso completo de congelación al usar la ecuación de Q. T. Pham.

Tabla 24. Efecto de la reducción de los parámetros de la ecuación de Q. T. Pham sobre el porcentaje de la diferencia de tiempos del proceso completo de congelación al reducir 10% los valores de cada parámetro.

Parámetro	ΔF (%)
h	-10.03
V	11.29
f_0	-9.80
ΔH_1	1.62
ΔH_2	9.17
ΔT_1	-1.74
ΔT_2	-8.54
Bi	0.25

Conclusiones

La incertidumbre en los cálculos comienza desde la experimentación, se propaga el error a partir de la medición de las temperaturas, y va en aumento junto con el resto de los valores calculados.

La composición del alimento afecta el valor de T_f , éste es inferior al del agua (0 °C). Sin importar la cantidad de muestra por congelar T_f es constante para cada alimento y no es afectada por las condiciones en las que se efectúa el proceso.

Los perfiles térmicos de la carne molida de res y de las guayabas son similares a los de agua destilada.

De acuerdo con las pruebas realizadas con las guayabas y las zanahorias, la temperatura inicial de las muestras disminuye y también el tiempo del proceso completo al acondicionar previamente el congelador a la temperatura mínima que éste alcanza.

Un alimento con forma aproximadamente esférica, como las guayabas, tarda en congelar debido a que el espesor es mayor que el de una placa o de un cilindro.

El contenido de humedad, la forma, el espesor, la masa y el tamaño son factores que determinan el tiempo de cambio de fase y el tiempo del proceso de congelación, además de las condiciones de enfriamiento del equipo. Mayor humedad implica mayor tiempo de proceso.

Las ecuaciones de Choi y Okos son útiles para calcular la conductividad térmica, el calor específico, la densidad y la difusividad térmica cuando no hay literatura disponible.

La ecuación de López-Leyva y Hallström es más útil para geometrías esféricas y cilíndricas para estimar el tiempo de cambio de fase.

La ecuación de Plank es útil para las geometrías empleadas en este trabajo.

De las tres ecuaciones empleadas para estimar el tiempo del proceso completo de congelación la ecuación de Levy es la más sencilla de usar y la que mejores resultados proporciona debido a que las incertidumbres corresponden principalmente al cambio de entalpía durante el proceso completo y al calor latente.

Referencias

- AOAC (2006). Animal Feed, en Official Methods of Analysis of AOAC International, ed. Nancy J. Wendt Thiex, AOAC International, (USA).
- Berk, Z. (2009). Refrigeration, chilling and freezing. En Food Process Engineering and Technology. Food Science and Technology, International Series Elsevier, pp. 578-579.
- Cleland, D.J. y Valentas, K. J. (1997). Prediction of freezing time and design of food freezers. En Handbook of Food Engineering Practice, Valentas, K. J., Rotstein, E. y Singh, R. P. CRC Pres LLC, USA, pp. 81,82.
- Pardo, J. M. y Niranjana, K. (2006) Freezing. En Food Processing Handbook, Brennan, J. G. Wiley-VCH, pp. 141, 142.
- Delgado, A. E. y Sun, Da-Wen. (2011). Physicochemical changes of foods during freezing and thawing. En *Physicochemical Aspects of Food Engineering and Processing*, Devahastin, S. (ed). CRC Press, USA, pp. 222-224.
- Fellows, P. (2007). Tecnología del Procesado de los Alimentos: *Principios y Prácticas*, Acribia, (España), pp. 391-396.
- George, R.M. (1993). Freezing processes used in the food industry, *Trends in Food Science & Technology* 4, 134-137.
- Heldman, D. R. (1982). Food Properties During Freezing. *Food Technology* 36 (2), 92-95.
- Heldman, D. R. y Lund, D. B. (2007). *Handbook of Food Engineering*, CRC Press Taylor & Francis Group, USA, pp. 434
- Hung, Yen-Con. (1990). Prediction of cooling and freezing times. *Food Technology* 44 (5), 137- 144.

Ibarz, A. y Barbosa-Cánovas, G.V. (1999). Operaciones Unitarias en la Ingeniería de Alimentos. Technomic Publishing Company, Inc. EUA, pp. 547- 550, 556.

López-Leyva, M. y Hallström, B. (2003). The original Plank equation and its use in the development of food freezing rate predictions. *Journal of Food Engineering* 58, 267-275.

Mittal, G. S. (2006). Freezing loads and freezing time calculation. En *Handbook of Frozen Food Processing and Packaging*, Da-Wen Sun (ed.). CRC Press/Taylor & Francis Group, USA, pp 127, 129.

Nesvadba, P. (2008). Thermal properties and ice crystal development in frozen foods. En *Frozen Food Science and Technology*, Evans, J. A.(ed). Blackwell Publishing, UK, pp. 1,16, 17.

Pardo, J. M. y Niranjana, K. (2006) Freezing. En *Food Processing Handbook*, Brennan, J. G. Wiley-VCH, pp. 142.

Rahman, M. S., Guizani, N., Al-Khaseibi, Al-Hinai, S. A., Al-Maskri, S.S. y Al-Hamhami, K. (2002). Analysis of cooling curve to determine the end point of freezing. *Food Hydrocolloids* 16 (6), 653-659.

Ramaswamy, H. S. y Tung M.A. (1981). Thermophysical properties of apples in relation to freezing. *Journal of Food Science* 46, 724–728.

Singh, R. P. y Heldman, D. R. (2009). Introduction to Food Engineering, Elsevier, China, pp. 501, 510- 522.

Singh, R. P. (2007). Heating and cooling. En *Handbook of Food Engineering*, Heldman, D. R. y Lund, D. B. CRC Press Taylor & Francis Group, USA, pp. 412

Wang, L y Weller, C. L. (2006). Thermophysical properties of frozen foods. En *Handbook of Frozen Food Processing and Packaging*, Da-Wen Sun (ed.). CRC Press/Taylor & Francis Group, USA, pp. 102- 104, 107, 111, 113, 115, 120-121.