



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE CIENCIA E INGENIERÍA EN ALIMENTOS
CARRERA DE INGENIERÍA EN ALIMENTOS

Tema: Determinación experimental y predicción del tiempo de congelación de pulpa de guayaba (*Psidium guajava*) pasteurizada y envasada en cilindros de 200 kg

Proyecto de Trabajo de Titulación, Modalidad: Experiencias prácticas de investigación y/o intervención, previa la obtención del título de Ingeniera en Alimentos, otorgado por la Universidad Técnica de Ambato a través de la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos.

AUTOR: Miguel Ángel Tubón Malusin

TUTORA: Ing. Araceli Alexandra Pilamala Rosales M.Sc

Ambato - Ecuador

Junio-2017

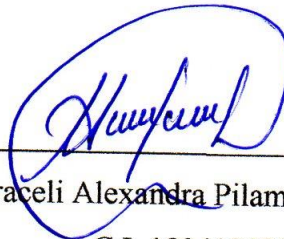
APROBACIÓN DEL TUTOR

Ing. Araceli Alexandra Pilamala Rosales M.Sc

CERTIFICA:

Que el presente trabajo de titulación ha sido prolijamente revisado. Por lo tanto autorizo la presentación de este Trabajo de Titulación modalidad Experiencias prácticas de investigación y/o intervención, el mismo que responde a las normas establecidas en el Reglamento de Títulos y Grados de la Facultad.

Ambato, 14 de Febrero del 2017.



Ing. Araceli Alexandra Pilamala Rosales MSc

C.I. 180415529-7

TUTOR

AUTORÍA DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Yo, Miguel Ángel Tubón Malusin, manifiesto que los resultados obtenidos en el presente Proyecto de Investigación, previo la obtención del Título de Ingeniero en Alimentos son absolutamente originales, auténticos y personales: a excepción de las citas.



Miguel Ángel Tubón Malusin

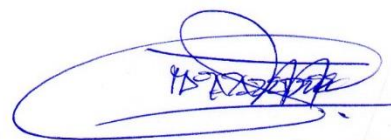
C.I. 180493438-6

AUTOR

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

Los suscritos profesores calificadores, aprueban el presente trabajo de Titulación modalidad Experiencias prácticas de investigación y/o intervención, el mismo que se ha sido elaborado de conformidad con las disposiciones emitidas por la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos de la Universidad Técnica de Ambato.

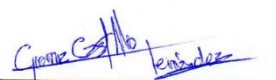
Para en constancia firman.



Presidente del Tribunal



Ing. Liliána Patricia Acurio Arcos MSc
C.I. 180406708-8



Ing. Giovanna Victoria Castillo Fernández MSc
C.I. 180389187-6

Ambato, 16 de Marzo del 2017

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga de éste proyecto de investigación o parte de él un documento disponible para su lectura consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los derechos en línea patrimoniales de mi Proyecto, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de éste Proyecto, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de éste Proyecto, dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando ésta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autora.



Miguel Ángel Tubón Malusin

C.I. 180493438-6

AUTOR

DEDICATORIA

Con cariño,

A Dios.

Por haberme dado salud para llegar a este punto, brindarme el don de la Sabiduría y la Inteligencia, ser mi fortaleza en mis momentos difíciles.

A mi madre (Carmen).

Por todo su amor de madre y esfuerzo desmedido para hacer de mí un gran ser humano y profesional en excelencia.

A mi Abuelo (Alfonso)

Por su amor y carácter de padre, y por todas su enseñanzas

A mi Abuela (Mercedes) y a mis Tías (Delia y Alicia).

Por el amor y apoyo incondicional durante toda mi vida.

A mis hermanos (Álvaro y Vinicio)

Por todo su cariño, apoyo y compañía.

A mi novia (Gabriela)

Por compartir conmigo aciertos y desaciertos, por alegrar mi vida por ser la persona que Amo.

Miguel Ángel

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Técnica de Ambato, Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos por permitirme culminar mi carrera universitaria.

A la empresa Healthy Food Marcalman Ecuador S.A. por permitirme desempeñarme como profesional y desarrollar mi trabajo de titulación en sus instalaciones.

A mi tutora Araceli Pilamala, por ayudarme a culminar este trabajo y todo el apoyo brindado durante todo el proceso de titulación.

A mis profesores Araceli Pilamala, Liliana Acurio, Luis Anda, Dolores Robalino, Diego Salazar, Fernando Álvarez, Sandra Horvitz, Carlos Moreno, María José Andrade, por compartir conmigo su conocimiento y experiencia.

A la Sra. María Teresa Galvis y al CPA. Pablo Peñaherrera, por todas las enseñanzas compartidas durante mi desempeño como profesional en la Empresa Healthy Food Marcalman Ecuador S.A.

Al equipo de Producción de Healthy Food Marcalman Ecuador S.A., Jaime, Javier, Diego, Jorge, Martha, Amparo y Esteban por su apoyo durante el desarrollo de este trabajo.

A mis amigos Carlos, José, Alejandro, Xavier, Estefanía, Johanna y Gabriela, por hacer del paso por la universidad un fase divertida de mi Vida

¡Gracias a ustedes!

Miguel Ángel

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

PORTADA.....	i
APROBACIÓN DEL TUTOR.....	ii
AUTORÍA DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN	iii
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO	iv
DERECHOS DE AUTOR	v
DEDICATORIA	vi
AGRADECIMIENTO	vii
INDICE GENERAL DE CONTENIDOS.....	viii
ÍNDICE DE TABLAS	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
RESUMEN.....	xii
ABSTRACT.....	xiii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I.....	3
1.1. Tema	3
1.2. Justificación.....	3
1.3. Objetivos	4
1.3.1. Objetivo general.....	4
1.3.2. Objetivos específicos	4
CAPÍTULO II	6
2.1 Antecedentes investigativos en Healthy Food Marcalman Ecuador S.A.	6
2.2 LA CONGELACIÓN	8
2.2.1. Concepto	8
2.2.2. Fases de la congelación.....	8
2.2.3. Tiempo de congelación.....	9
2.2.4. Métodos de predicción de tiempos de congelación	10

2.3. Señalamiento de las variables.....	11
2.3.1. Variable independiente	11
2.3.2. Variable dependiente	11
CAPÍTULO III.....	12
METODOLOGÍA	12
3.1. MATERIALES	12
3.1.1. Muestras	12
3.2. MÉTODOS	12
3.2.1. Determinación experimental del tiempo de congelación.....	12
3.2.2. PREDICCIÓN MATEMÁTICA DEL TIEMPO DE CONGELACIÓN..	14
3.2.3. DETERMINACIÓN DEL ERROR ENTRE TIEMPO DE CONGELACIÓN CALCULADO Y EXPERIMENTAL	17
3.2.4. ANÁLISIS MICROBIOLÓGICOS	18
CAPÍTULO IV	20
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	20
4.1. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	20
4.1.1. Tiempo de congelación y punto de congelación.....	20
4.1.2. PREDICCIÓN MATEMÁTICA DEL TIEMPO DE CONGELACIÓN .	23
4.1.3. RESULTADOS MICROBIOLÓGICOS	23
4.1.3.1. Microorganismos patógenos	24
CAPÍTULO V.....	25
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	25
5.1. CONCLUSIONES	25
5.2. RECOMENDACIONES	26
6. BIBLIOGRAFÍA.....	27
ANEXOS	31

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores de las constantes de la ecuación 2	16
Tabla 2. Pulpa de Guayaba: Composición proximal.....	17
Tabla 3. Ecuaciones para determinar propiedades térmicas de alimentos por componentes ($-40\text{ °C} \leq T \leq 150\text{ °C}$).	34

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Tiempo de congelación de pulpa de guayaba cilindro 200 kg, en contenedor de congelado.....	7
Figura 2. Ubicación de las muestras experimentales en la cámara de congelación..	13
Figura 3. Descenso de temperatura de la pulpa de guayaba durante la congelación en las ubicaciones R ₁ , R ₂ y R ₃ en la cámara de congelación.	21
Figura 4. Pulpa de guayaba: punto de congelación.....	22

RESUMEN

En la presente investigación, se congeló pulpa de guayaba pasteurizada y envasada en cilindros metálicos de 200 kg, en una cámara de congelación a -25 ± 2 °C ubicados en diferentes posiciones. Se determinó el tiempo de congelación experimental mediante las curvas de tiempo-temperatura y se comparó con valores predichos por dos modelos matemáticos. Se estableció que el tiempo de congelación experimental promedio fue de $89,39 \pm 2,47$ horas y el punto de congelación de la pulpa $-0,89$ °C. Los resultados pronosticados matemáticamente identificaron para un coeficiente de transferencia de calor por convección de $13,46$ (W/m^2 °C) que la ecuación de Salvadori-Mascheroni, posee un menor error relativo de $11,07$ %, siendo la más adecuada para realizar aproximaciones del tiempo de congelación en la empresa donde se realizó este estudio. Se verificó que la calidad e inocuidad microbiológica de la pulpa de guayaba se mantiene durante todo el proceso de congelación.

Palabras claves: congelación de alimentos, pulpa de fruta, pulpa congelada, guayaba, tiempo de congelación.

ABSTRACT

In the present investigation, pasteurized guava pulp and packaged in 200 kg metal cylinders were frozen in a freezing chamber at -25 ± 2 ° C located in different positions. The experimental freezing time was determined by the time-temperature curves and compared with values predicted by two mathematical models. It was established that the mean experimental freezing time was $89,39 \pm 2,47$ hours and the freezing point of the pulp $-0,89$ ° C. The results predicted mathematically for a convective heat transfer coefficient of $13,46$ (W / m² ° C) that the Salvadori-Mascheroni equation has a smaller relative error of 11,07%, being the most adequate to perform approximations of the freezing time in the company where this study was carried out. It was verified that the quality and microbiological safety of the guava pulp is maintained throughout the freezing process.

Keywords: freezing, freezing chamber, freezing time, freezing point, guava pulp.

INTRODUCCIÓN

Según la **FAO (2004)**, las frutas como el lichi, el durión, el rambután, la guayaba y la granadilla son designadas como “frutas tropicales secundarias”, y se producen y comercializan en volúmenes más reducidos que las frutas tropicales. Para el año 2000, la producción de estas frutas alcanzó los 15 millones de toneladas, equivalentes al 24 por ciento de la producción mundial de frutas tropicales.

La congelación es una de las técnicas utilizadas para la conservación de los alimentos debido a que permite conservar por largos periodos sin presentar alteraciones en sus características (**Salvadori et al., 1997**). A nivel industrial derivados de frutas como las pulpas se congelan y se envasan en grandes contenedores para su utilización como materia prima en la producción de helados, yogurt, mermeladas, aderezos, confituras y productos de repostería (**Salvadori et al., 1996; Okita et al., 2013**). Esta técnica es implementada en pequeñas agroindustrias y representa un factor importante para el costo de producción (**Okita et al., 2013**). Para el diseño del proceso de congelación un aspecto primario e importante es predecir el tiempo de congelación correctamente porque es un parámetro que determina la calidad del producto, la capacidad de producción del equipo, y el consumo óptimo de energía, factores que contribuyen representativamente en los costos y beneficios del proceso de congelación (**Salvadori et al., 1997**).

Healthy Food Marcalman Ecuador S.A. es una empresa Ecuatoriana, dedicada a la producción y comercialización de pulpas y derivados de frutas, atendiendo requerimientos de la industria nacional y cumpliendo requisitos legales del país y de la Norma FSSC 22000 (**Healthy Food, 2013a**). La creciente demanda del sector industrial de pulpa de fruta congelada en grandes contenedores para la fabricación de bebidas en el 2016, hizo que la empresa realizara una inversión en un sistema de congelación más eficaz para su línea de producción de pulpas, que de acuerdo a su fabricante permite la congelación de 1,6 ton envasadas en cilindros de 200 kg, en tiempo aproximado de 48 horas (**Refryacor S.A. 2016**).

El objetivo de la presente investigación fue determinar el tiempo de congelación experimental y calculado en pulpa de guayaba, que permita a la empresa Healthy Food

Marcalman Ecuador S.A, obtener un tiempo de referencia para la liberación y entrega del producto terminado, evidenciar el funcionamiento óptimo de la cámara de congelación durante la producción de pulpa de fruta pasteurizada, envasada y congelada en presentación de cilindros de 200 kg. Además de obtener evidencia objetiva que valide que el tiempo del proceso de congelación en el nuevo sistema de congelación permite mantener la calidad e inocuidad microbiológica del producto con la que es liberado después de un proceso térmico de pasteurización, sin exponer al producto a temperaturas de crecimiento microbiano por largos periodos.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

1.1 Tema

DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL Y PREDICCIÓN DEL TIEMPO DE CONGELACIÓN DE PULPA DE GUAYABA (*Psidium guajava*) PASTEURIZADA Y ENVASADA EN CILINDROS DE 200 kg

1.2 Justificación

Healthy Food Marcalman Ecuador S.A. es una empresa dedicada a la producción de pulpa de fruta, pasteurizada, envasada en fundas de polietileno de alta densidad contenidas en cilindros metálicos y congelada para su comercialización en el mercado nacional (**Healthy Food, 2013b**).

La congelación es considerada una tecnología para la conservación de los alimentos, por que detiene la actividad de los microorganismos contaminantes **Archer, (2004)** y **Fellows, (2009)**, por tal motivo la empresa ha implementado esta tecnología en su línea de producción de pulpas de frutas para su conservación.

Todos los procesos de la organización están certificados por el Sistema Gestión de Seguridad Alimentaria FSSC 22000 (Food Safety System Certification), dentro del cual ha establecido un análisis de peligros y puntos críticos de control HACCP para dar cumplimiento a los requerimientos de la Norma ISO 22000:2005 literal (7.6), en este análisis se ha determinado la congelación como una fase que permite la conservación de la calidad e inocuidad microbiológica del producto (**Healthy Food, 2016a**).

Según **Microorganisms y Handbook, (2005)**, la temperatura es un factor que estimula, detiene o limita el crecimiento microbiano. En condiciones favorables una población microbiana puede crecer rápidamente en muy poco tiempo, en 10 horas una única célula podría producir más de un millón de células (**Brady, 2002**). El proceso

térmico de pasteurización previo a la congelación que se da al producto garantiza su inocuidad microbiológica y su calidad comestible (**Holdsworth et al., 2008**). Sin embargo, la presentación industrial de pulpa de fruta pasteurizada y envasada en cilindros metálicos con peso neto de 200 kg y congelada, es considerada la más crítica dentro del análisis HACCP, para la organización por lo siguiente: el producto no posee conservantes químicos, las dimensiones del envase, la cantidad de producto a congelar y el tiempo requerido para congelar totalmente al producto y alcanzar los -18 °C, que respecto a otras presentaciones que tiene la empresa (10 kg y 20 kg) es más alto y puede representar un tiempo adecuado para el crecimiento microbiano que provoque alteraciones en el producto final.

Por lo tanto al considerar la fase de congelación una medida que conserva la calidad microbiológica del producto y una fase importante del proceso de producción de pulpas de frutas pasteurizadas, envasadas y congeladas en cilindros de 200 kg, este estudio prevé determinar el tiempo requerido para congelar el producto dando cumplimiento al literal 8.2 de la Norma ISO 22000:2005, que menciona que una medida de control debe ser medida y validada. Además fundamentará la operación de la cámara de congelación construida para este proceso, el tiempo de estadía del producto en su interior antes de ser liberado y el tiempo de respuesta de la empresa al cliente.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Determinar experimentalmente y predecir matemáticamente el tiempo de congelación de pulpa de guayaba (*Psidium guajava*) pasteurizada y envasada en cilindros de 200 kg.

1.3.2 Objetivos específicos

- Establecer curvas de congelación de la pulpa de guayaba en función del tiempo y temperatura, mediante registradores de temperatura.

- Aplicar modelos matemáticos para la predicción del tiempo de congelación de pulpa de guayaba pasteurizada y envasada en cilindros de 200 kg.
- Comparar los tiempos de congelación calculados y experimentales determinando el error del valor calculado.
- Valorar la calidad microbiológica de la pulpa de fruta pasteurizada después del proceso de congelación mediante análisis microbiológico.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes investigativos en Healthy Food Marcalman Ecuador S.A.

El sistema de congelación en la empresa Healthy Food Marcalman Ecuador S.A., se realizaba en un contenedor de congelado programado a $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, de las siguientes características: (Marca Hyundai, Genstar Container Corporation, San Francisco, U.S.A), dimensiones internas: 2,55 m x 2,43 m x 12,19 m (**Healthy Food, 2013b**). Este equipo resultaba eficiente para la congelación de productos “pulpa de fruta pasteurizada”, en presentaciones de 1 kg.

Sin embargo, ante el requerimiento comercial de pulpa de fruta pasteurizada, congelada y envasada en cilindros de 200 kg, se evaluó el uso de este equipo desde tres aspectos: operación, calidad, y costos, encontrándose que existían las siguientes dificultades:

- Operativamente por las características del equipo, congelar un cilindro de pulpa de fruta pasteurizada y envasada en presentaciones de 200 kg, requería de movimientos complejos del producto dentro del contenedor para lograr el mayor contacto con el aire frío, lo que dificultaba el mantenimiento de un sistema FIFO (*first in –first out*).
- El tiempo requerido para congelar un cilindro de 200 kg en este equipo fue de 321 horas y la temperatura no alcanzaba los $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ requeridos, el tiempo fue determinado por el mismo método experimental aplicado en este estudio Figura 1. Uno de los factores que determinó este tiempo fue la temperatura inicial aproximadamente de $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ del producto debido al proceso de envasado en caliente. El tiempo y el consumo de energía requerida para la congelación incremento el costo del producto, lo que provocó que no se ajuste al precio de oferta del cliente.
- Además, por el tiempo de proceso de congelación, el tiempo total de producción representó un tiempo tardío de respuesta al requerimiento del cliente.

- Referente a calidad, el análisis de HACCP identificó que el producto se mantiene a temperaturas óptimas de crecimiento microbiano durante un largo periodo lo que podría provocar un incumplimiento en los parámetros microbiológicos y pérdida de la calidad del producto por proliferación de microorganismos termoresistentes. Se detectó que el sistema de muestreo y liberación microbiológica no podría evidenciar este crecimiento, por la fase del proceso en la cual se toma la muestra.

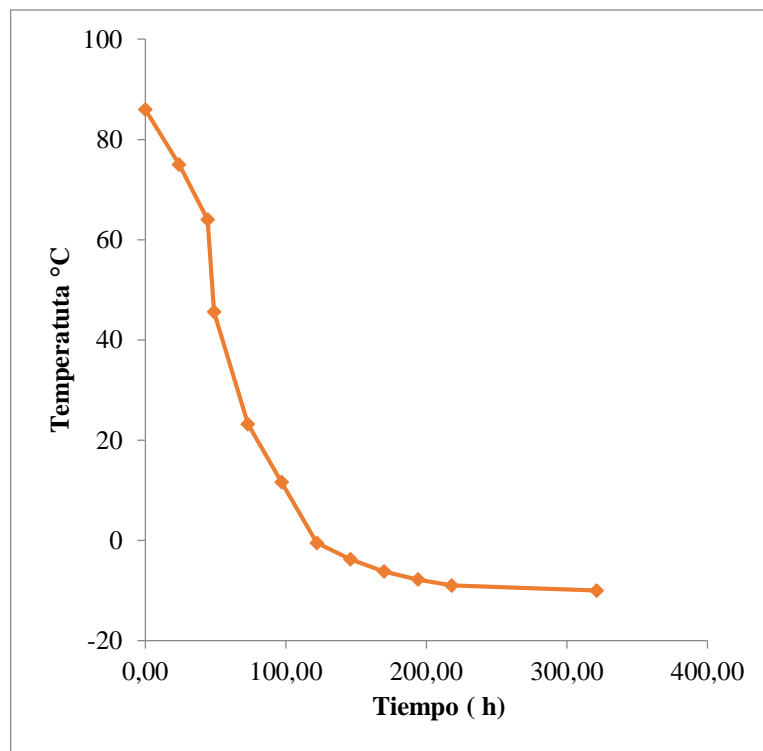


Figura 1. Tiempo de congelación de pulpa de guayaba cilindro 200 kg, en contenedor de congelado a $-18\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Posterior a este análisis la organización invirtió en la construcción de un sistema de enfriamiento de la pulpa después del proceso térmico de pasteurización y en un sistema de congelación, el mismo que fue puesto a prueba en este estudio (Healthy Food, 2016b).

Como se había mencionado anteriormente la fase de congelación es una de las etapas del proceso de fabricación de pulpa de fruta pasteurizada, envasada y congelada, de gran importancia por lo tanto, es definida a continuación mediante literatura.

2.2 LA CONGELACIÓN

2.2.1. Concepto

La congelación es una de las técnicas de conservación que se aplica a una amplia gama de productos perecederos, dentro de los cuales están las frutas congeladas como: fresa, frambuesas, cerezas y otras bayas, las que pueden ser envasadas a granel en grandes contenedores, que también son utilizados para el envasado de jugos concentrados de fruta (Salvadori, Mascheroni & De Michelis, 1996).

Esta técnica detiene la actividad de los microorganismos contaminantes en los alimentos, preserva algunos por largos periodos e igualmente los elimina por efectos físicos, químicos y, posiblemente, a través de cambios genéticos inducidos (Archer, 2004).

La congelación y el posterior almacenamiento de los alimentos representan operaciones importantes en su conservación (Campañone, Salvadori, & Mascheroni, 2005).

2.2.2. Fases de la congelación

El proceso de congelación está compuesto principalmente de factores termodinámicos y cinéticos durante el cual el material a congelar primero se enfría hasta la temperatura de congelación del alimento T_c , en la que inicia la congelación (Barbosa, Altunakar & Mejía, 2005), este proceso termodinámico se halla compuesto de tres fases que son: pre enfriamiento, cambio de fase y atemperado (Salvadori, 1994).

Fase de Pre enfriamiento: en este período, el alimento se enfría desde su temperatura inicial T_i , que generalmente es mayor a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, hasta la temperatura de comienzo de cambio de fase o congelación T_c (Salvadori, 1994).

Cambio de Fase: en este periodo se da el proceso de nucleación durante el cual se forma el primer cristal conocido también como semilla, una vez que el primer cristal

aparece en la solución inicia el cambio de fase con un incremento de cristales (**Barbosa, Altunakar, & Mejía, 2005**), el tamaño de los cristales dependerá de la velocidad de transferencia de calor (**Salvadori, 1994**).

Además, como la matriz alimenticia se halla formada por sólidos insolubles y una parte acuosa que contiene sólidos solubles, esta fase se da a una temperatura inferior a los 0 °C y corresponde a T_c , durante la congelación la fase sin congelar aumenta su concentración de sólidos, razón por la cual la temperatura del cambio de fase continúa disminuyendo (**Salvadori, 1994; Pham, 1996**).

Al final del proceso de congelación existirá una parte de agua sin congelar que corresponde al agua ligada del alimento; sin embargo, en un matriz con alto contenido acuoso la mayor parte del cambio de fase ocurrirá entre T_c y los -5 °C (**Salvadori, 1994**).

Atemperado: esta es la última fase en la cual el alimento congelado es llevado a temperaturas de mantenimiento que pueden oscilar entre -10 a -18 °C (**Salvadori, 1994**).

2.2.3. Tiempo de congelación

El tiempo de congelación se define como el tiempo requerido para disminuir la temperatura de un alimento desde su temperatura inicial a una temperatura dada en el centro térmico (**Barbosa, Altunakar & Mejía, 2005**), este valor establecerá la velocidad de movimiento del producto a través del sistema y por tanto su eficacia.

El tiempo de congelación depende de varios factores como:

- temperatura inicial y final del producto,
- cantidad de calor eliminado,
- dimensiones (especialmente espesor) y forma del producto,
- el proceso de transferencia de calor y temperatura (**Persson & Lohndal, 1993**).

2.2.4. Métodos de predicción de tiempos de congelación

El cálculo de los tiempos de congelación de los alimentos implica un problema complejo de transferencia de calor, cambios de fases y propiedades variables, estos cálculos se pueden realizar por métodos analíticos empleando ecuaciones simples o resolución por ordenadores (**Mascheroni & Calvelo, 1982**).

Los diferentes métodos numéricos para determinar el tiempo de congelación se han desarrollado basándose en la ecuación de Plank (**López-Leiva & Hallström, 2003; Campañone, Salvadori & Mascheroni, 2005**).

En la literatura, se mencionan diferentes modelos matemáticos como el de **Nagaoka et al. (1955)**, utilizado en la congelación de pescado que implica una modificación de la ecuación de Plank, estos autores proponen que las propiedades sean calculadas de forma similar que en la ecuación de Plank a excepción de la entalpía que debe ser calculada entre la temperatura inicial y la temperatura final en el centro del producto a congelar.

Cleland y Earle (1997), en su estudio de comparación de métodos analíticos y numéricos para la predicción del tiempo de congelación plantean otra modificación de la ecuación de Plank, en la cual los autores recomiendan que el calor específico y la densidad sean evaluados a la temperatura final en el centro del producto, este trabajo consideró $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ como temperatura final, sin embargo, mencionan que es aplicable para otro valor de la temperatura final, considerando el valor de la entalpía.

Mascheroni y Calvelo (1982), desarrollaron un método analítico para placa plana, que calcula el tiempo total de congelación sumando el tiempo en cada una de las fases de la congelación: un tiempo de la fase de preenfriamiento, un tiempo en el cambio de fase y un tiempo en el atemperado, el tiempo en el cambio de fase es determinado por la ecuación de Plank, mientras que los tiempos restantes se calculan mediante un análisis de transferencia de calor sin cambio de fase.

Bazán y Mascheroni (1984), estudiaron la congelación de carne ovina, determinando las propiedades termofísicas experimentalmente y resolviendo el balance de energía

por diferencias finitas para una placa plana, de la cual mediante regresión lineal obtuvieron una ecuación sencilla para el cálculo de tiempo de congelación.

Machado y Vélez (2008), en su estudio aplicado en alimentos mexicanos utilizaron las ecuaciones de Plank y Salvadori & Mascheroni (1991), determinando que la ecuación de Plank presenta menor error, respecto a los tiempo de congelación obtenidos experimentalmente.

Delgado y Sun (2001), en su revisión bibliográfica de modelos de transferencia de calor y masa para determinar el tiempo de congelación, mencionan que para fines industriales la ecuación de Salvadori y Mascheroni (1991), presenta una buena precisión.

2.3. Señalamiento de las variables

2.3.1. Variable independiente

Pulpa de guayaba (*Psidium guajava*) pasteurizada y envasada en cilindros de 200 kg

2.3.2. Variable dependiente

Tiempo de congelación

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1. MATERIALES

3.1.1. Muestras

Para el desarrollo de la investigación se trabajó con pulpa de guayaba (*Psidium guajava*), variedad roja obtenida del proceso estandarizado de pulpeado y pasteurizado de la empresa Healthy Food Marcalman Ecuador S.A (Quito, Ecuador) (**Anexo A**).

Para la medición experimental del tiempo de congelación se destinaron 600 kg de pulpa de guayaba obtenida desde diferentes batches (días de proceso), la pulpa pasó por un proceso de enfriado antes de su envasado en un sistema de intercambiadores de calor concéntricos hasta que alcanzó una temperatura de $12,5 \pm 2,5$ °C y fue envasada en fundas de polietileno de alta densidad de 40" x 74" y 100 micras de espesor, contenidas en cilindros metálicos de acero laminado en frío recubierto internamente con pintura epóxica grado alimenticio.

Dimensiones del envase metálico

Diámetro interno: $0,572 \text{ m} \pm 0,005 \text{ m}$; diámetro sobre rodones: $0,572 \text{ m} \pm 0,005 \text{ m}$; espesor: $0,000762 \text{ m} \pm 0,000076 \text{ m}$; altura exterior sin tapa: $0,869 \text{ m} \pm 0,015 \text{ m}$; altura exterior con tapa: $0,877 \text{ m} \pm 0,015 \text{ m}$; peso total: $14 \text{ kg} \pm 0,5 \text{ kg}$

3.2. MÉTODOS

3.2.1. Determinación experimental del tiempo de congelación

El proceso de congelación se efectuó en una cámara de congelación modular fabricada con paneles de poliuretano inyectado 40 kg/m^3 de densidad y 0,1 m de espesor, aislada térmicamente del suelo con el mismo material y una capa de concreto de 10 cm.

La unidad cuenta con 2 compresores (Maneurop) de 10 HP cargados con refrigerante 404 A, dos evaporadores (Hispania, 4502 41 4 D) con 4 ventiladores que circulan aire dentro de la cámara a una temperatura de $-25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (set point) (**Anexo B**).

Para determinar el tiempo de congelación experimental ($t_{c_{exp}}$), cada cilindro de 200 kg fue considerado como una muestra experimental denominados como R₁, R₂ y R₃.

Las muestras de pulpa de guayaba pasteurizada, ingresaron al proceso de congelación a diferentes temperaturas iniciales (T_i) debido al proceso de enfriamiento previo realizado después de la pasteurización. Para mantener condiciones reales de estudio la cámara se cargó al máximo de su capacidad 1,6 ton, con producto “pulpa de fruta pasteurizada” en presentación 200 kg, parte de la cual no fue considerada en esta investigación.

Las muestras fueron dispuestas en pallets plásticos de 1,2 x 1,2 x 0,15 m, con 3 cilindros más de pulpa de fruta pasteurizada no considerada en este estudio y en diferentes posiciones de la cámara (lado derecho R₁, lado izquierdo R₂ y al centro R₃) respecto al lado frontal de la cámara y al medio respecto a la profundidad (Figura 2).

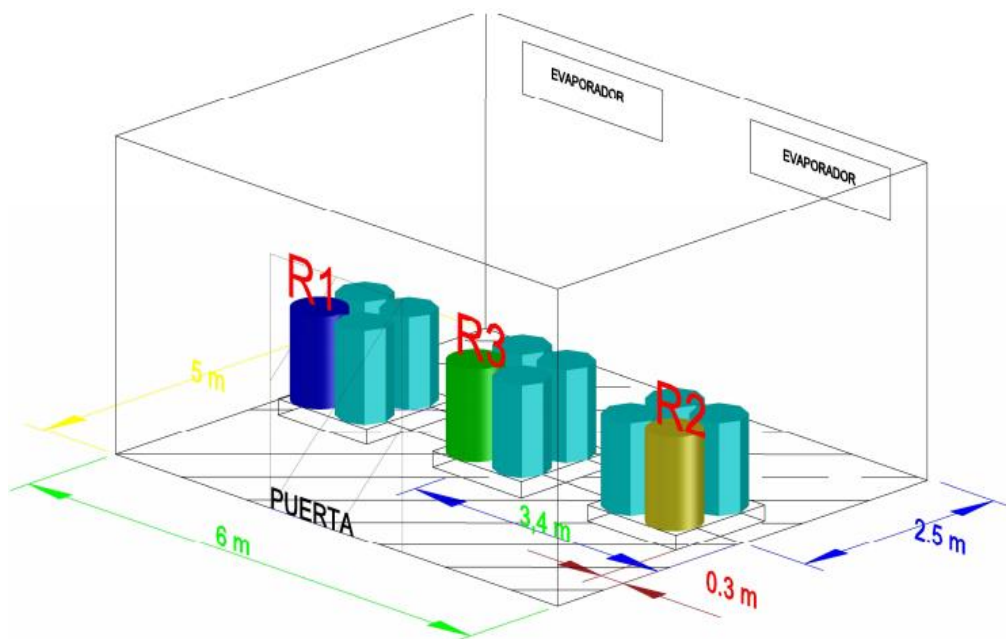


Figura 2. Ubicación de las muestras experimentales en la cámara de congelación.

El registro de la temperatura se realizó instalando una termocupla tipo K, protegida en su extremo con un vástago de acero inoxidable, en el centro térmico de la muestra (cilindro 200 kg) y conectada a un registrador de temperatura (Supco, SL 500 TC; USA) metodología similar a la utilizada por **Salvadori et al. (1996)** y **Góral et al. (2002)**. Las mediciones de temperatura se realizaron automáticamente a intervalos de 10 minutos y fueron recolectadas en la memoria del datalogger.

La temperatura se registró en este punto porque es considerado el último punto en sufrir cambios durante la congelación. Además, se escogió como temperatura final (T_c) $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, porque es la temperatura utilizada para conservar comercialmente este tipo de productos, donde la actividad enzimática y microbiológica disminuye (**Okita et al., 2013**).

Se determinó el punto de congelación (P_c) de la pulpa de guayaba mediante un análisis de la gráfica en la sección donde la pendiente tiende a cero, utilizando el método de las tangentes (**Góral, & Kluza, F. 2002**) graficadas en Auto CAD 2016.

3.2.2. PREDICCIÓN MATEMÁTICA DEL TIEMPO DE CONGELACIÓN

El cálculo del tiempo de congelación se realizó aplicando las siguientes ecuaciones.

- **Ecuación de Plank**

La ecuación de Plank es utilizada para estimar el tiempo de congelación; sin embargo, debido a los supuestos implicados para su cálculo el tiempo obtenido es una aproximación (**Plank, 1963**). Uno de los primeros supuestos es que el producto a ser congelado se halla inicialmente a temperatura de congelación, por lo tanto el tiempo calculado únicamente representa el periodo de congelación (**Barbosa, Altunakar & Mejía, 2005**).

Supuestos de la ecuación de Plank

- La temperatura inicial (T_i) del producto es uniforme e igual a la de cambio de fases,

- El cambio de fase ocurre a una temperatura constante,
- La diferencia de entalpía solo involucra calor latente, no existe subenfriamiento del producto posterior al cambio de fases,
- El producto entre la densidad y el calor específico de la fase congelada tiende a cero, con lo que se obtiene un estado pseudo estacionario que origina un perfil lineal de las temperaturas,
- Las propiedades térmicas son constantes en cada fase,
- Considera que el flujo de calor en la superficie se puede expresar por la ley de enfriamiento de Newton (**Salvadori, 1994**).

La fórmula de Plank ha sido utilizada ampliamente para el cálculo del tiempo de congelación en pescado (**Johnston, 1994**).

$$t_{cal} = \frac{\lambda_a \rho_o}{(T_c - T_a)} \left(\frac{Pa'}{h} + \frac{Ra'^2}{k_c} \right) \quad \text{Ec. 1}$$

Donde t_{cal} es el tiempo de congelación calculado, λ_a es el calor latente de congelación del alimento (se puede obtener como $\lambda_{ag} * X_{ag}$), λ_{ag} es el calor latente de congelación del agua, X_{ag} es la fracción másica de agua, ρ_o es la densidad del alimento antes de congelar, P y R son las constantes de Plank (1/2 y 1/8 para placas infinitas; 1/6 y 1/24 para esferas; 1/4 y 1/16 para cilindros infinitos), a' es la dimensión característica, (espesor de una placa, radio para una esfera y un cilindro, mitad de espesor para una placa que se congela por ambos lados), T_c es la temperatura de congelación del alimento -2,09 °C según **Reno et al. (2011)**, T_a es la temperatura del medio de enfriamiento, h es el coeficiente convectivo de transferencia de calor para el fluido de enfriamiento, k_c es la conductividad térmica del alimento congelado (**Machado & Vélez, 2008**).

- **Ecuación de Salvadori & Mascheroni (1991)**

Esta ecuación fue desarrollada por **Salvadori y Mascheroni (1991)**, como un método analítico para el cálculo del tiempo de congelación y descongelación en alimentos con alto contenido de agua. El método relaciona el centro térmico del alimento, los parámetros de proceso, las propiedades termo físicas y el tamaño del producto

(Salvadori & Mascheroni, 1991).

La ecuación fue desarrollada para geometrías regulares comúnmente encontradas como placa, cilindro y esfera infinita. Los autores validaron el método mediante la comparación con tiempos de congelación y descongelación experimentales correspondientes a diferentes tipos de carnes, pescado, puré de papa, tilosa encontrando un error del 5 % para tiempo de congelación y 4,2% para tiempo de descongelado (Salvadori & Mascheroni, 1991).

$$tc_{cal} = \frac{L^2}{\alpha_o} (aT_{cf} + b) \left(\frac{1}{Bi} + c \right) (1 + T_i)^n (-T_a - 1)^{-m} \quad \text{Ec. 2}$$

Dónde tc_{cal} es el tiempo de congelación, L es la longitud característica (espesor de una placa o radio para un cilindro), a , b , c , n y m son constantes empíricas de la ecuación definidas en la Tabla 1, T_{cf} es la temperatura en el centro térmico, Bi es el número de Biot definido como (hL/k_o) ; h coeficiente de transferencia calórica ($\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$); k_o conductividad térmica del alimento fresco, T_i es la temperatura inicial del alimento, T_a temperatura del medio de enfriamiento, α_o difusividad del alimento fresco (Salvadori, 1994).

Tabla 1. Valores de las constantes de la ecuación 2

Geometría	N	M	a	b	C
Placa*	0,09	1,04	-1,08125	62,9375	0,18
Placa**	0,10	1,03	-0,94250	62,4250	0,16
Cilindro	0,09	1,00	-0,46875	28,7625	0,17
Esfera	0,06	0,90	-0,16875	15,3625	0,18

* Transferencia de calor en fibras perpendiculares, ** Transferencia de calor en fibras paralelas, Fuente: Salvadori & Mascheroni (1991).

Para aplicar las ecuaciones 1 y 2, se realizó el cálculo de las propiedades termo físicas de la pulpa de guayaba: densidad (ρ_o) 1064,92 (kg/m^3), conductividad térmica de pulpa de guayaba fresca (k_o) 0,563 (W/mK), conductividad térmica de pulpa de guayaba congelada (k_c) 0,498 (W/mK), difusividad térmica (α_o) $1,376 \cdot 10^{-7}$ (m^2/s), mediante las ecuaciones propuestas por Choi Okos, (1986) utilizadas por Alvis, Caicedo & Peña (2012), y sus ecuaciones parciales mencionadas por Fricke & Becker, (2001) (Anexo C).

Los valores de la composición proximal de la pulpa de guayaba utilizada para este estudio fueron obtenidos del análisis reportado por el laboratorio externo LABOLAB, acreditado según OAE LE 1C 06-001, que fueron realizados para la obtención de la Notificación Sanitaria de acuerdo a la Resolución ARCSA-DE-067-2015-GGG con fecha de emisión 18 de marzo del 2016 y número de referencia 160657.

Tabla 2. Pulpa de Guayaba: Composición proximal

Parámetro	Método	Resultado
Proteína (%)	INEN 383	0,54
Ceniza (%)	PEE/LA/01	0,77
Grasa (%)	PEE/LA/03	0,00
Fibra (%)	PEE/LA/05	0,52
Carbohidratos totales (%)	INEN 522	9,19

Fuente: Tubón, M; 2016. Los resultados fueron reportados por el Laboratorio de Análisis de Alimentos, Aguas y Afines LABOLAB, N° Referencia: 160658.

Para efectos de la predicción del tiempo de congelación se emplearon valores bibliográficos tales como:

- calor latente de fusión del agua (λ_{ag}) 333,7 (kJ/kg) (Cengel & Ghajar, 2007),
- dos coeficientes de transferencia de calor por convección del aire (h) determinados en estudios similares por otros autores (h_1) 7,8 (W/m² °C) valor reportado por Salvadori et al. (1996) y (h_2) 13,46 (W/m² °C) valor encontrado por Okita et al. (2013).

3.2.3. DETERMINACIÓN DEL ERROR ENTRE TIEMPO DE CONGELACIÓN CALCULADO Y EXPERIMENTAL

El porcentaje de error entre los resultados calculados y experimentales se determinó según la ecuación (3) propuesta por Ilicali & Icier (2010) y Salvadori & Mascheroni (1991).

$$\% \text{ Error} = \left(\frac{t_{\text{calculado}} - t_{\text{experimental}}}{t_{\text{experimental}}} \right) * 100 \text{ Ec. 3}$$

3.2.4. ANÁLISIS MICROBIOLÓGICOS

La valoración de la calidad microbiológica de la pulpa de guayaba, se realizó mediante análisis microbiológico de la pulpa de fruta pasteurizada al inicio y al final de la etapa de congelación, de acuerdo a los métodos que a continuación se detallan.

Muestreo

Las muestras para el análisis microbiológico fueron recolectadas durante el proceso de envasado y después del proceso de congelación.

Mohos y Levaduras

La determinación del contenido de mohos y levaduras se realizó siguiendo la metodología de recuento en placa Petrifilm 3M para Levaduras y Mohos 3M, establecido como método de análisis en el departamento de Aseguramiento de Calidad de Healthy Food. La inoculación se realizó siguiendo la guía de uso 3M, 1 ml de la dilución. La incubación se realizó a $25\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ por 72 h en una incubadora (LAB LINE, 120; USA). Al finalizar el proceso de incubación se procedió al conteo de colonias (**Healthy Food, 2013c**).

***Escherichia coli* – Coliformes Totales**

La determinación del contenido de *Escherichia coli* – Coliformes Totales se realizó siguiendo la metodología de recuento en placa Petrifilm 3M para *Escherichia coli* – Coliformes Totales 3M, establecido como método de análisis en el departamento de Aseguramiento de Calidad de Healthy Food. La inoculación se realizó siguiendo la guía de uso 3M, 1 ml de la dilución. La incubación se realizó a $25\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ por 72 h en una incubadora (LAB LINE, 120; USA). Al finalizar el proceso de incubación se procedió al conteo de colonias (**Healthy Food, 2013d**).

Salmonella

La determinación de la presencia del patógeno *Salmonella*, se realizó en placas Petrifilm de recuento rápido *Salmonella* Express (3M) siguiendo el método de 3M, establecido como método de análisis en el Departamento de Aseguramiento de Calidad de Healthy Food. La muestra enriquecida se incubó a $41,5\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ por 24 horas en

una incubadora (LAB LINE, 120; USA), posterior se inoculo las placas mediante la realización de estrías simples y se incubaron a $41,5^{\circ} \pm 1$ °C durante 24 ± 2 horas. Al finalizar el proceso de incubación se realizó la identificación de colonias presuntivas positivas (**Healthy Food, 2015**).

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

4.1.1. Tiempo de congelación y punto de congelación

Tiempo de congelación

En la Figura 3 se identificó la forma de una curva de congelación típica de un alimento de acuerdo a lo ilustrado por **Ibarz (2005)**, observándose un descenso de temperatura desde T_i hasta $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ que corresponde a la fase de pre enfriamiento, el cambio de fase donde la pendiente de la curva se acerca a cero y el atemperado en el descenso de temperatura hasta alcanzar los $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$.

De las curvas presentadas en la Figura 3 se determinaron las ecuaciones de cada una (Ec. 4, Ec. 5 y Ec. 6), y se obtuvo el coeficiente de determinación R^2 encontrando que los valores del coeficiente del R^2 son mejores para los datos recolectados en las posiciones R_1 y R_2 dentro de la cámara de congelación. Mediante el análisis de las pendientes de estas ecuaciones se determinó que entre las ubicaciones R_1 y R_2 el tiempo de congelación es similar, mientras que R_3 alcanza los $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, 4 horas antes, esto puede deberse al comportamiento de flujo del aire al interior de la cámara.

Sin embargo, por la operación y flujo de materiales, equipos y producto dentro de la cámara R_3 , no es considerada como una ubicación para colocar producto para su congelación.

$$R_1 \quad t_c = 36,04 - 3,80 T \quad R^2 = 0,963 \quad \text{EC. 4}$$

$$R_2 \quad t_c = 34,50 - 3,86 T \quad R^2 = 0,963 \quad \text{EC. 5}$$

$$R_3 \quad t_c = 30,64 - 5,31 T \quad R^2 = 0,808 \quad \text{EC. 6}$$

Se determinó que el tiempo de congelación experimental promedio $t_{c_{exp}}$ de la pulpa de guayaba roja es de $89,39 \pm 2,47$ horas, valores semejantes reportados por **Okita et al. (2013)**, quienes definieron un tiempo de $105,07 \pm 5,98$; $100,32 \pm 5,79$ y $96,02 \pm 6,27$ horas, para pulpa de guayaba adquirida de una pequeña agroindustria ubicada en el distrito de Larvas/MG Brasil congelada a $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, para los cuales obtuvieron diferentes valores de coeficiente de transferencia de calor del medio de enfriamiento ($13,460$; $13,040$ y $13,040\text{ W/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$) respectivamente. En el estudio realizado por estos autores cada uno de los tiempos y coeficientes de transferencia de calor por convección corresponden a diferentes posiciones que se ensayaron en el interior de la cámara.

A la vez, también se corrobora con lo mencionado por **Salvadori et al. (1996)**, quienes determinaron el tiempo de congelación para pulpa de frutilla envasada en cilindros metálicos con similares dimensiones, cuyos valores fueron de $97,65$ horas para un cilindro infinito y $143,60$ horas para un cilindro finito.

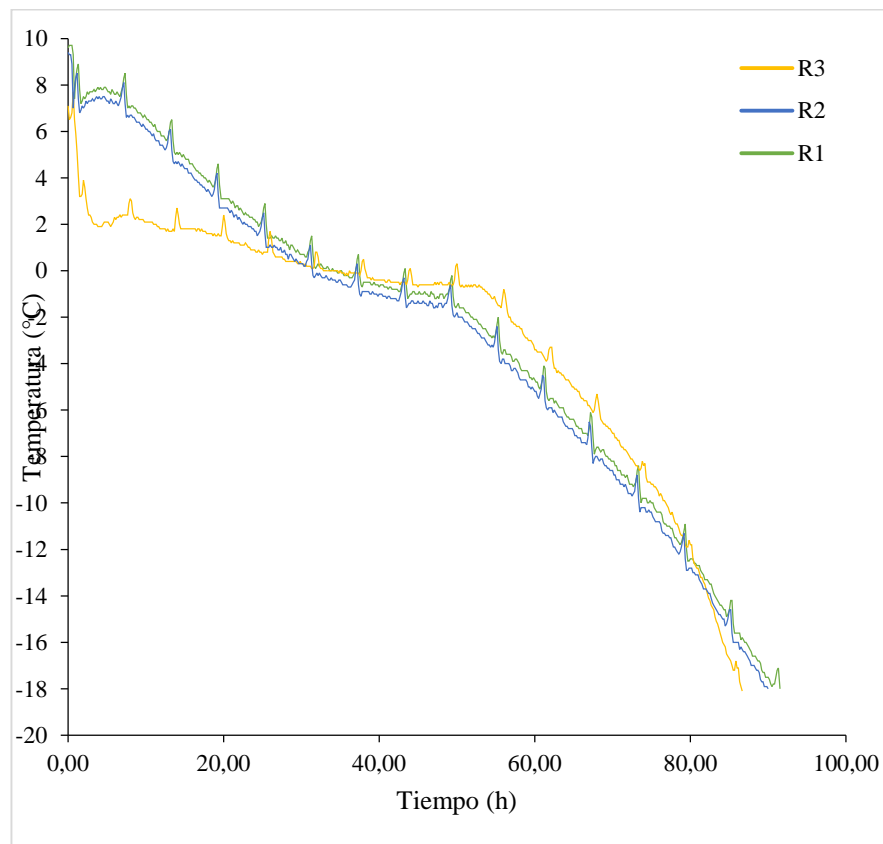


Figura 3. Descenso de temperatura de la pulpa de guayaba durante la congelación en las ubicaciones R₁, R₂ y R₃ en la cámara de congelación.

Punto de congelación

Según **Barbosa-Cánovas et al. (2005)**, el cambio de fase de un alimento se halla por debajo de los $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, debido a la presencia de agua ligada y agua libre, además mencionan que durante el proceso de congelación, la concentración de sólidos aumenta en el agua sin congelar, motivo por el cual existe una variación en la temperatura de congelación.

En la Figura 4 se presenta una sección de la curva de congelación entre $(1\text{ y }-5,17)\text{ }^{\circ}\text{C}$, donde se determinó que el punto de congelación de la pulpa de guayaba con un contenido de humedad de $88,98\%$ es de $-0,89\text{ }^{\circ}\text{C}$, el mismo que se alcanzó a las $46,06$ horas del proceso. Valores similares han sido reportados por **Reno et al. (2011)** y **Pereira et al. (2013)**, cuyos valores fueron de $-2,09\text{ }^{\circ}\text{C}$ y de $-1,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ respectivamente. Este último valor correspondió a pulpa de guayaba roja con un contenido de humedad del $85,6\%$ obtenida del mercado local del municipio de Lavras, (Brasil).

En consecuencia, la diferencia entre el valor determinado en este estudio y los reportados en la literatura, puede deberse al contenido de humedad que posee la matriz alimentaria.

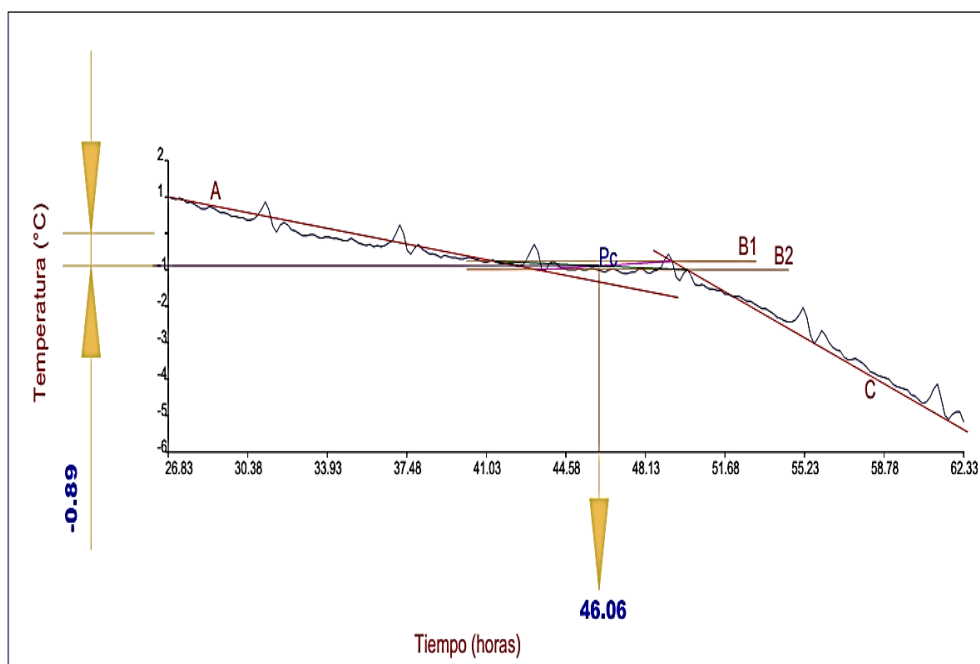


Figura 4. Pulpa de guayaba: punto de congelación

4.1.2. PREDICCIÓN MATEMÁTICA DEL TIEMPO DE CONGELACIÓN

El tiempo de congelación determinado con los coeficientes de transferencia de calor por convección h_1 y h_2 tanto para la ecuación de Plank fue de 74,49 y 43,62 horas como para la ecuación de **Salvadori-Mascheroni (1991)**, el t_{cal} fue de 132,60 y 99,29 horas, respectivamente.

Dichos valores mencionados anteriormente al compararlos con el t_{exp} establecieron un valor de error relativo equivalente a 16,66 % y 51,39 % para la ecuación de Plank mientras, que del 48,34 % y 11,07 % para **Salvadori-Mascheroni (1991)**.

En consecuencia, el cálculo del error relativo determinó que el valor calculado del tiempo de congelación más cercano al experimental se encontró con la ecuación propuesta por Salvadori-Mascheroni (1991), para el valor más alto del coeficiente de transferencia de calor por convección (h_2) 13,46 (W/m²°C).

Según, **Delgado y Sun (2001)**, esta ecuación posee mayor precisión para fines industriales. De igual manera **Ilicali & Icier (2010)**, en su estudio también determinaron que dicha ecuación arroja predicciones más exactas del tiempo de congelación para puré de papaya fresca en cilindros infinitos.

Sin embargo, las predicciones del tiempo de congelación calculado establecieron porcentajes de error demasiado altos al compararse con el tiempo experimental, esto puede deberse al uso de valores de h bibliográficos que no corresponden al valor real del estudio. Según **Okita et al. (2013)**, conocer el coeficiente de transferencia de calor por convección es uno de los retos más significativos en la estimación de los tiempos de congelación.

4.1.3. RESULTADOS MICROBIOLÓGICOS

Los resultados microbiológicos obtenidos en este estudio representan evidencia objetiva, sobre la función que ejerce la fase de congelación como medida de control dentro del proceso de producción de pulpas de frutas pasteurizadas.

Microorganismos deteriorantes

El análisis microbiológico de la pulpa de guayaba determinó recuentos de 0 UFC/g antes y después del proceso de congelación para mohos, levaduras, y Coliformes totales, lo cual demostró que la congelación conserva la calidad microbiológica inicial con la que se libera el producto antes de su proceso de congelación. Además estos resultados evidencian el cumplimiento de los parámetros microbiológicos exigidos por la Norma INEN 2337 para producto pasteurizados.

4.1.3.1. Microorganismos patógenos

En el caso de *Salmonella* y *Escherichia coli*, no se detectó presencia de estos patógenos en las muestras de pulpa de guayaba antes y después del proceso de congelación, cumpliendo así los criterios microbiológicos de la Norma INEN 2337.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

Se determinó que el tiempo congelación experimental de la pulpa de guayaba pasteurizada, envasada y congelada en cilindros de 200 kg, en las instalaciones de Healthy Food Marcalman Ecuador S.A., fue de $89,39 \pm 2,47$ horas.

Se establecieron las curvas de congelación de la pulpa de guayaba, identificando que el punto de congelación fue de $-0,89$ °C alcanzado a las 46,06 horas, lo que valida el tiempo congelación del producto estimado durante el diseño y construcción de la cámara de congelación (1,6 ton en 48 h), además que permitieron la determinación del tiempo de congelación experimental.

Se calculó el tiempo de congelación de la pulpa de guayaba mediante ecuaciones matemáticas, la ecuación propuesta por Salvadori-Mascheroni (1991), posee menor error de estimación, por tanto puede ser utilizada por Healthy Food Marcalman S.A. para la predicción del tiempo de congelación de sus productos, utilizando un valor referente del coeficiente de transferencia de calor por convección del aire de $13,46$ ($W/m^2\text{°C}$).

Se encontró que la calidad e inocuidad microbiológica de la pulpa de guayaba pasteurizada se mantiene después del proceso de congelación, cumpliendo los parámetros microbiológicos establecidos por la legislación del Ecuador, garantizando la calidad e inocuidad del producto terminado y validando la fase de congelación de acuerdo a los requerimientos de la Norma ISO 22000:2005.

5.2. RECOMENDACIONES

Se recomienda a Healthy Food Marcalman Ecuador S.A:

- Utilizar la cámara de congelación para el proceso de congelación de pulpa de fruta pasteurizada, comercializada en cilindros de 200 kg.
- Sumar el tiempo de congelación estimado en este estudio al tiempo total del proceso de producción de pulpa de guayaba.
- Evaluar los tiempos de congelación de pulpa de fruta pasteurizada envasada en otros materiales como cartón y polietileno, con diferentes configuraciones geométricas.
- Evaluar los cambios sensoriales y fisicoquímicos que provoca el proceso de congelación en las pulpas de frutas pasteurizadas fabricadas.
- Hacer uso de los datos recolectados en este estudio para la validación del proceso de congelación de pulpa de fruta pasteurizada, dando cumplimiento a los requerimientos de la Norma Internacional ISO 22000:2005 y FSSC 22000.

6. BIBLIOGRAFÍA

- 3M. (2016). 3M Interpretation Guides. [Http://solutions.3m.co.uk/wps/portal/3M/en_GB/FoodSafetyEU/FoodSafetyEU/Training/BrochuresDownloads/PetrifilmInterpretationGuides](http://solutions.3m.co.uk/wps/portal/3M/en_GB/FoodSafetyEU/FoodSafetyEU/Training/BrochuresDownloads/PetrifilmInterpretationGuides)/.Or
- Archer, D.L. (2004). *Freezing: an underutilized food safety technology* *International Journal of Food Microbiology*, 90 (2), 127-138.
- Alvis, A., Caicedo, I., & Peña, P. (2012). *Determination of Thermophysical Properties of Foods as a Function of Concentration and Temperature using a Computational Program*. *Technological information*, 23 (1), 111-116.
- Barbosa-Canovas, G. V., Altunakar, B., & Mejía-Lorío, D. J. (2005). *Freezing of fruits and vegetables: An agribusiness alternative for rural and semi-rural areas* (Vol. 158). Food & Agriculture Org.
- Brady, H. B. (2002). *Mejorando la seguridad y calidad de frutas y hortalizas frescas: manual de formación para instructores*. ITESM-Campus Monterrey, México.
- Campañone, L.A., Salvadori, V. O., & Mascheroni, R.H. (2005). *Food freezing with simultaneous surface dehydration: approximate prediction of freezing time*. *International journal of heat and mass transfer*, 48 (6), 1205-1213.
- Cengel, Y.A., & Ghajar, A. (2007). *Heat transfer and mass*. Editorial: Editorial McGraw-Hill.
- Choi, Y., and M.R. Okos. 1986. *Effects of Temperature and Composition on the Thermal Properties of Foods*. In *Food Engineering and Process Applications* 1:93-101. London: Elsevier Applied Science Publishers
- Cleland, AC, and Earle, RL (1977). *A comparison of analytical and numerical methods of predicting food freeze times*. *Journal of Food Science*, 42 (5), 1390-1395.
- Delgado, A. E., & Sun, D. W. (2001). *Heat and mass transfer models for predicting freezing processes-a review*. *Journal of Food Engineering*, 47 (3), 157-174.
- FAO, (2004). *Perspectivas a plazo medio de los productos básicos agrícolas*. Documentos de la FAO sobre productos básicos y Comercio. Proyecciones al

año 2010. Roma 2004. 95 p.

- Fellows, P.J. (2009). *Food processing technology: principles and practice*. Elsevier.
- Fricke, B.A., & Becker, B.R. (2001). *Evaluation of thermophysical property models for foods*. HVAC & R Research, 7 (4), 311-330.
- Góral, D., & Kluza, F. (2002). *Experimental and analytical determination of freezing point depression*. Electr J Polish Agric Univ, Agric Engr, 5 (2).
- Healthy Food. (2013a). Política de Inocuidad. Documentos mandatorios (Primera edición, Ed.). Quito, Ecuador: HEALTHY FOOD.
- Healthy Food. (2013b). Instructivo para la fabricación de pulpa de guayaba congelada. Documentos de producción (Primera edición, Ed.). Quito, Ecuador: HEALTHY FOOD.
- Healthy Food. (2013c). Instructivo para análisis y recuento de mohos y levaduras. Documentos de Aseguramiento de Calidad (Primera edición, Ed.). Quito, Ecuador: HEALTHY FOOD.
- Healthy Food. (2013d). Instructivo para análisis y recuento de Coliformes totales. Documentos de Aseguramiento de Calidad (Primera edición, Ed.). Quito, Ecuador: HEALTHY FOOD.
- Healthy Food. (2015). Instructivo para análisis y recuento de *Salmonella*. Documentos de Aseguramiento de Calidad (Primera edición, Ed.). Quito, Ecuador: HEALTHY FOOD.
- Healthy Food. (2016a). Análisis de peligros y puntos críticos de control. Documentos mandatorios. (Primera edición, Ed.). Quito, Ecuador: HEALTHY FOOD.
- Healthy Food. (2016b). Informe de proceso de congelación. Producción y Aseguramiento de Calidad. (Primera edición, Ed.). Quito, Ecuador: HEALTHY FOOD.
- Holdsworth, S. D., Simpson, R., & Barbosa-Cánovas, G. V. (2008). *Thermal processing of packaged foods*. (pp. 176-188). New York: Springer.
- Ilicali, C., & Icier, F. (2010). *Freezing time prediction for partially dried papaya puree with infinite cylinder geometry*. Journal of Food Engineering, 100 (4), 696-704.

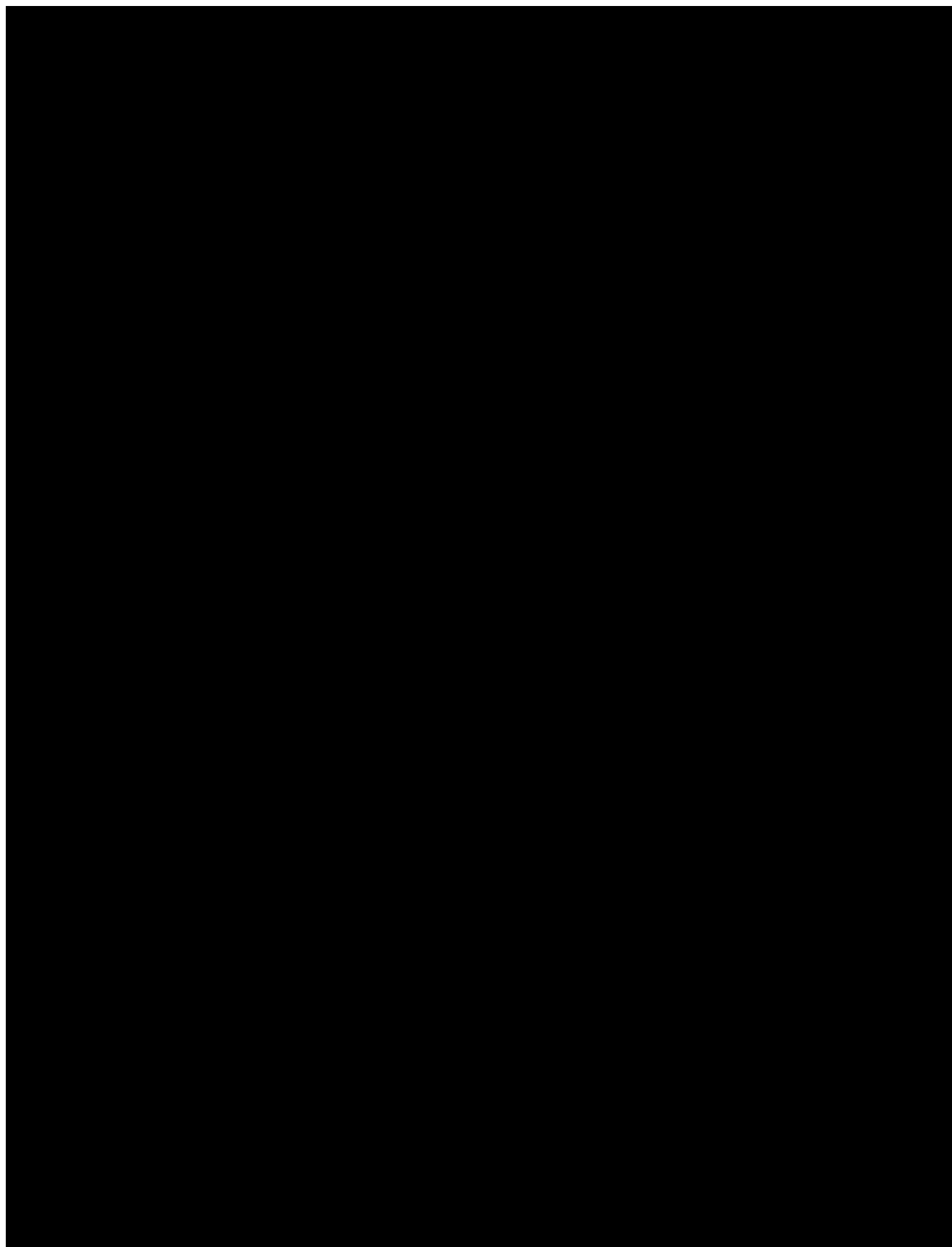
- Ibarz, A., & Ribas, A. I. (2005). *Unit operations in food engineering*. Mundi-Press Books.
- INEN (2008). Ecuadorian Technical Standard NTE INEN-ISO 2337. *Juices, pulps, concentrates, nectares, fruit and vegetable drinks*. Requirements (pp. 15). Quito, Ecuador
- Johnston, W. A. (1994). *Freezing and refrigerated storage in fisheries* (No. 340). Food & Agriculture Org.
- Machado, M., & Hallström, B. (2003). *The original Plank equation and its use in the development of food freezing rate predictions*. *Journal of food engineering*, 58 (3), 267-275.
- Machado-Velasco, K. M., & Vélez-Ruiz, J. F. (2008). *Study of physical properties of Mexican foods during freezing and frozen storage*. *Mexican Journal of Chemical Engineering*, 7 (1), 41-54.
- Mascheroni, R. H., & Calvelo, A. (1982). *A simplified model for freezing time calculations in foods*. *Journal of Food Science*, 47 (4), 1201-1207.
- Microorganisms, F. P., & Handbook, N. T. (2005). *Bad Bug Book*. *US Food and Drug Administration: Silver Spring, MD, USA.* [(accessed on 1 July 2014)].
- Nagaoka, J., Takagi, S., & Hotani, S. (1955). *Experiments on the freezing of fish in an air blast freezer*. *Proc. 9th Intern. Congr. Refrig.*
- Norma, I. S. O., & ISO, E. (2005). 22000: 2005. *Food Safety Management Systems*, November Review.
- Okita, W. M., Reno, M. J., Peres, A. P., & Resende, J. V. (2013). *Heat transfer analyzes using computational fluid dynamics in the air blast freezing of guava pulp in large containers*. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 30 (4), 811-824.
- Pereira, C. G., Resende, J. V. D., Pereira, G. D. G., Giarola, T. M. D. O., & Prado, M. E. T. (2013). *Thermal conductivity measurements and predictive models for frozen guava and passion fruit pulps*. *International Journal of Food Properties*, 16 (4), 778-789.
- Persson, P.O., & Londahl, G. (1993). 2 Freezing technology. *Frozen food technology*, 20.

- Pham, Q.T. (1996). *Prediction of calorimetric properties and freezing time of foods from composition data*. Journal of Food Engineering, 30 (1), 95-107.
- Plank, R. (1963) El empleo del frío en la industria de la refrigeración. *Ed. Reverté*, Barcelona
- Refryacor S.A. (2016). Informe de proceso de congelación. Producción y Aseguramiento de Calidad. (Primera edición, Ed.). Quito, Ecuador: HEALTHY FOOD.
- Reno, M. J., Resende, J. V., Peres, A. P., Giarolla, T. M. O., & Prado, M. E. T. (2011). *Heat transfer and energy consumption in the freezing of guava pulp in large containers*. Applied Thermal Engineering, 31 (4), 545-555.
- Salvadori, V. O., & Mascheroni, R. H. (1991). *Prediction of freezing and thawing times of foods by means of a simplified analytical method*. Journal of Food Engineering, 13 (1), 67-78.
- Salvadori, V. O. (1994). *Heat transfer during freezing, storage and thawing of food* (Doctoral dissertation, Faculty of Engineering).
- Salvadori, V. O., Mascheroni, R. H., & De Michelis, A. (1996). *Freezing of strawberry pulp in large containers: experime.*
- Salvadori, V. O., De Michelis, A., & Mascheroni, R. H. (1997). *Prediction of freezing times for regular multi-dimensional foods using simple formulae*. LWT-Food Science and Technology, 30(1), 30-35.

ANEXOS

ANEXO A

Diagrama de flujo de proceso de Pulpas de frutas pasteurizadas en Healthy Food



Fuente: Healthy Food, (2016a)

ANEXO B
CÁMARA DE CONGELACIÓN



ANEXO C

ECUACIONES DE CHOI-OKOS PARA DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES TERMOFISICAS

$$cp = \sum cpi * Xi \quad \text{Ec. 4}$$

$$k = \sum Cpi * Xi \quad \text{Ec. 5}$$

$$\alpha = \sum \alpha i * Xi \quad \text{Ec. 6}$$

$$\rho = \sum \rho i * Xi \quad \text{Ec. 7}$$

En las ecuaciones (4) a (7) el subíndice *i* se refiere al componente considerado, humedad, proteína, grasa, fibra, carbohidratos y ceniza (Alvis, Caicedo & Peña 2012).

Tabla 3. Ecuaciones para determinar propiedades térmicas de alimentos por componentes (-40 °C ≤ T ≤ 150 °C).

Propiedad térmica	Componente del alimento	Modelo
Densidad(kg/m ³)	Proteína	$\rho = 1,3299 \times 10^3 - 5,1849 \times 10^{-1} T$
	Grasas	$\rho = 9,2559 \times 10^2 - 4,1757 \times 10^{-1} T$
	Carbohidratos	$\rho = 1,5991 \times 10^3 - 3,1046 \times 10^{-1} T$
	Fibra	$\rho = 1,3115 \times 10^3 - 3,6589 \times 10^{-1} T$
	Ceniza	$\rho = 2,4238 \times 10^3 - 2,8063 \times 10^{-1} T$
	Agua	$\rho = 9,9718 \times 10^2 + 3,1439 \times 10^{-3} T - 3,7574 \times 10^{-3} T^2$
Conductividad térmica (W/mK)	Proteína	$K = 1,7881 \times 10^{-1} + 1,1958 \times 10^{-3} T - 2,7178 \times 10^{-6} T^2$
	Grasas	$k = 1,8071 \times 10^{-1} - 2,7604 \times 10^{-3} T - 1,7749 \times 10^{-6} T^2$
	Carbohidratos	$k = 2,0141 \times 10^{-1} + 1,3874 \times 10^{-3} T - 4,3312 \times 10^{-6} T^2$
	Fibra	$k = 1,8331 \times 10^{-1} + 1,2497 \times 10^{-3} T - 3,1683 \times 10^{-6} T^2$
	Ceniza	$k = 3,2962 \times 10^{-1} + 1,4011 \times 10^{-3} T - 2,9069 \times 10^{-6} T^2$
	Agua	$k = 5,7109 \times 10^{-1} + 1,7625 \times 10^{-3} T - 6,7036 \times 10^{-6} T^2$

Conductividad térmica (m ² /s)	Proteína	$\alpha = 6,8714 \times 10^{-8} + 4,7578 \times 10^{-10} T - 1,4646 \times 10^{-12} T^2$
	Grasas	$\alpha = 9,8777 \times 10^{-8} - 1,2569 \times 10^{-10} T - 3,8286 \times 10^{-14} T^2$
	Carbohidratos	$\alpha = 8,0842 \times 10^{-8} + 5,3052 \times 10^{-10} T - 2,3218 \times 10^{-12} T^2$
	Fibra	$\alpha = 7,3976 \times 10^{-8} + 5,1902 \times 10^{-10} T - 2,2202 \times 10^{-12} T^2$
	Ceniza	$\alpha = 1,2461 \times 10^{-7} + 3,7321 \times 10^{-10} T - 1,2244 \times 10^{-12} T^2$
	Agua	$\alpha = 1,3168 \times 10^{-7} + 6,2477 \times 10^{-10} T - 2,4022 \times 10^{-12} T^2$
Calor específico (J/ kg K)	Proteína	$cp = 2,0082 \times 10^3 + 1,2089 T - 1,3129 \times 10^{-3} T^2$
	Grasas	$cp = 1,9842 \times 10^3 + 1,4733 T - 4,8008 \times 10^{-3} T^2$
	Carbohidratos	$cp = 1,5488 \times 10^3 + 1,9625 T - 5,9399 \times 10^{-3} T^2$
	Fibra	$cp = 1,8459 \times 10^3 + 1,8306 T - 4,6509 \times 10^{-3} T^2$
	Ceniza	$cp = 1,0926 \times 10^3 + 1,8896 T - 3,6817 \times 10^{-3} T^2$
	Agua	$cw = 4,0817 \times 10^3 - 5,3062 T + 9,9516 \times 10^{-1} T^2$ $cw = 4,1762 \times 10^3 - 9,0864 \times 10^{-2} T + 5,4731 \times 10^{-3} T^2$