



DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

OPCIÓN I.- TESIS

TRABAJO PROFESIONAL

**“EFECTO DE LAS CONDICIONES DE LA
CONGELACIÓN DEL MESOCARPIO DE
SANDÍA Y TOMATE EN UN SISTEMA
PELTIER EN LA RETENCIÓN DE
POLIFENOLES Y CAROTENOIDES ”.**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA
QUÍMICA**

PRESENTA:

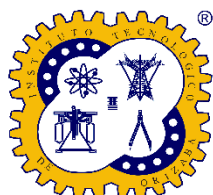
I.Q ARELY CANO GARAY

DIRECTOR DE TESIS:

DRA. ROSALÍA CERECERO ENRÍQUEZ

CO ASESOR:

DR. JOSÉ MANUEL TEJERO ANDRADE





Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Instituto Tecnológico de Orizaba
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Orizaba, Veracruz, **10/septiembre/2025**
Dependencia: División de Estudios de Posgrado e Inv.
Asunto: Autorización de Impresión
Opción: I

ARELY CANO GARAY
CANDIDATA A GRADO DE MAESTRA EN
CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA
PRESENTE

De acuerdo con el Reglamento de Titulación vigente de los Centros de Enseñanza Técnica Superior, dependiente de la Dirección General de Institutos Tecnológicos de la Secretaría de Educación Pública y habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora le hizo respecto a su Trabajo Profesional titulado:

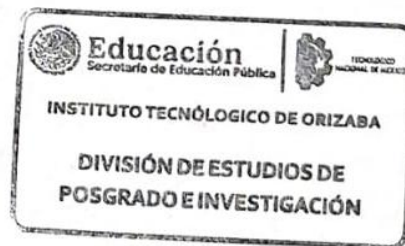
**Efecto de las condiciones de la congelación del mesocarpio de sandía y tomate
en un sistema Peltier en la retención de polifenoles y carotenoides**

Comunico a usted que este Departamento concede su autorización para que proceda a la impresión del mismo.

ATENTAMENTE
Excelencia en Educación Tecnológica®
CIENCIA-TÉCNICA-CULTURA®


OFELIA LANDETA ESCAMILLA
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACIÓN

ccp. Archivo
OLE/NAVC



OG-13-F06



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Av. Oriente 9 #852 Colonia Emiliano Zapata, C.P. 94320
Orizaba, Veracruz. Tel. 01 (272) 1105360
e-mail: info@orizaba.tecnm.mx www.orizaba.tecnm.mx





Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Instituto Tecnológico de Orizaba
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Orizaba, Veracruz, **30/mayo/2025**
Asunto: **revisión de trabajo escrito**

DRA. OFELIA LANDETA ESCAMILLA
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
PRESENTE

Los que suscriben, miembros del jurado, han realizado la revisión de la Tesis del (la) C.

ARELY CANO GARAY

La cual lleva el título de:

EFFECTO DE LAS CONDICIONES DE LA CONGELACIÓN DEL MESOCARPIO DE SANDÍA Y TOMATE
EN UN SISTEMA PELTIER EN LA RETENCIÓN DE POLIFENOLES Y CAROTENOIDES

Y concluyen que se acepta.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
CIENCIA-TÉCNICA-CULTURA®

PRESIDENTE: DRA. ROSALÍA CERECERO ENRÍQUEZ

FIRMA

SECRETARIO: DR. JOSÉ MANUEL TEJERO ANDRADE

FIRMA

VOCAL: DRA. LETICIA LÓPEZ ZAMORA

FIRMA

VOCAL SUP.: DRA. GUADALUPE LUNA SOLANO

FIRMA

TA-09-18



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Av. Oriente 9 #852 Colonia Emiliano Zapata, C.P. 94320
Orizaba, Veracruz. Tel. 01 (272) 1105360
e-mail: info@orizaba.tecnm.mx www.orizaba.tecnm.mx



Declaratoria de originalidad y cesión de derechos

Orizaba, Veracruz el día **19** del mes de **febrero** del año 2025

La que suscribe

C. Arely Cano Garay

Declaro que esta tesis, tiene una extensión de 121 cuartillas, ha sido escrita por mí y constituye el registro escrito del trabajo de tesis titulada

“EFECTO DE LAS CONDICIONES DE LA CONGELACIÓN DEL MESOCARPIO DE SANDÍA Y
TOMATE EN UN SISTEMA PELTIER EN LA RETENCIÓN DE POLIFENOLES Y
CAROTENOIDES.”

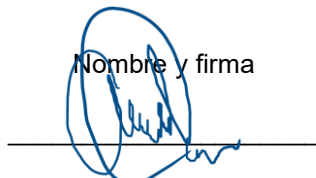
del programa: Maestría en Ciencias en Ingeniería Química bajo la asesoría y dirección de la Dra. Rosalía Cerecero Enríquez y del Dr. José Manuel Tejero Andrade y no ha sido sometida en ninguna otra institución previamente.

Todos los datos y las referencias a materiales ya publicados están debidamente identificados con su respectivo crédito e incluidos en las notas bibliográficas y en las citas que se destacan como tal y, en los casos que así lo requieran, cuento con las debidas autorizaciones de quienes poseen los derechos patrimoniales. Por lo tanto, me hago responsable de cualquier litigio o reclamación relacionada con derechos de propiedad intelectual, exonerando de toda responsabilidad al Tecnológico Nacional de México campus Orizaba.

También declaro que, al presentar esta tesis, cedo los derechos del trabajo al Tecnológico Nacional de México campus Orizaba, para su difusión, con fines académicos y de investigación, bajo las regulaciones propias de la institución y que si existe algún acuerdo de confidencialidad de la información lo haré saber en forma escrita para que se omitan las secciones correspondientes.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, grafico o de datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y del director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección: depi_orizaba@tecnm.mx Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente de este.

Nombre y firma



Arely Cano Garay

DEDICATORIA

En este apartado quiero expresar mi gratitud a todas aquellas personas que me acompañaron en este camino, siendo testigos de este proceso.

A mis abuelitos, aunque ya no están en este plano, sé que me cuidan y me acompañan desde donde se encuentre. Ustedes siguen siendo mi fuerza silenciosa y eterna. A mis papás, quienes han sido mi pilar en casa paso de mi vida. Son mi ancla y mi motor, mi motivación más grande y el apoyo incondicional en las buenas y en las malas. Todo lo que soy y lo que logré se lo debo a ustedes. A mi hermana, mi confidente y mi consuelo. Gracias por estar en todo momento con tu manera única de hacerme sentir querida y en calma. Eres una parte esencial en mi vida.

A mis mejores amigos Maggy, Isaí, Charito y Ary. Ustedes han sido mi soporte más grande, los que me han sostenido cuando sentí que ya no podía más. Gracias por estar en mis triunfos y en mis caídas. Estos nueve años a su lado han sido los mejores de mi vida y sé que lo que viene será aún más valioso. Los amo hasta el fin del mundo.

A mis amigos de toda la vida Nepo, Gianni y Erick. Desde la infancia hasta hoy han sido parte fundamental para mí. Gracias por apoyarme sin condiciones, incluso sin entender del todo mi proyecto, pero siempre estando para mí. Los llevo en el corazón con un cariño enorme que nunca cambiará.

A mis queridas Teiboleras: Celeste, Gaby, Ismari, Kari, Miriam y Yoali. Ustedes llegaron en la maestría para darle color y alegría a mis días. Se volvieron mi felicidad y mi refugio en esta etapa, siempre estaré agradecida por haber compartido este logro a su lado.

A mis amigas Moonie, Gabsi, Bon y Rossi, Gracias por estar en cada paso, por sus palabras de aliento, por animarme cuando lo necesitaba y por ser testigos de este camino. Ustedes son una parte muy especial en mi vida.

Y, finalmente, a Portgas D. Ace, aunque seas un personaje, eres y serás mi soporte emocional más grande. En ti encontré fuerza, compañía y motivación en los momentos más difíciles. A ti te dedico con cariño una parte de esta tesis, porque sin ese refugio, tampoco habría llegado hasta aquí.

RECONOCIMIENTOS

Deseo expresar mi más profundo agradecimiento a mi asesora de tesis la Dra. Rosalía Cerecero Enríquez, por su paciencia, orientación y compromiso durante el desarrollo de este proyecto. Gracias por brindarme su apoyo académico, impulsar a más de uno a ser independientes, ser disciplinados y autodidactas, siendo herramientas claves para enfrentar al mundo y buscar oportunidades más allá de lo que uno puede realizar.

Al Dr. José Manuel Tejero Andrade por su invaluable guía, enseñanzas y la confianza depositada en mí. Su experiencia y dedicación fueron fundamentales para el avance de este trabajo, y le agradezco profundamente el tiempo y esfuerzo compartidos.

Agradezco a la Dra. Leticia, Dr. Águila, Dr. Arturo Lassman y la Dra. Lupita por sus observaciones y sugerencias que enriquecieron este trabajo y contribuyeron a darle mayor solidez. Cada aportación ha sido una oportunidad de aprendizaje que atesoro.

Extiendo mis agradecimientos a todos los profesores que formaron parte de mi formación en la Maestría, por compartir no solo conocimientos, sino también por dejar marcada una huella en mi desarrollo académico.

Gracias al Instituto Tecnológico de Orizaba por abrirme las puertas una vez más, siendo un segundo hogar, permitiendo que pudiera crecer académica y personalmente, los verdaderos retos estudiantiles y formar amistades.

Por último y menos importante, agradecer a CONAHCYT por la beca otorgada (1180133), por la oportunidad que brinda al estudiante de este país que desean continuar con un estudio de posgrado y fomentar el interés y desarrollo en la Ciencia y Tecnología

Reconocimientos académicos

PARTICIPACIÓN DE CONGRESOS

- 2023** **Ponencia** “Efecto de la congelación en las propiedades termodinámicas de pasta de tomate”. Congreso Internacional de Ingenierías 2023: Soluciones interdisciplinarias para un Cambio Global. 18 de diciembre de 2023.

PARTICIPACIÓN EN PUBLICACIÓN DE REVISTA

- 2023** “Efecto de la congelación en las propiedades termodinámicas de pasta de tomate”. Revista Ingeniantes 2023. Año 10 No. 2 Vol. 2. pp. 17-21.
- 2024** “Efectos de congelación en las propiedades térmicas del mesocarpio de Sandía”. XLV Encuentro Nacional de la AMIDIQ. Vol.3 No.1 ISSN:2683-2925.

RESUMEN

Efecto de las condiciones de la congelación del mesocarpio de sandía y tomate en un sistema peltier en la retención de polifenoles y carotenoides

Elaborado por: I.Q. Arely Cano Garay

Dirigido por: Dra. Rosalía Cerecero Enríquez

Dr. José Manuel Tejero Andrade

La conservación de alimentos climatéricos como la sandía (*Citrullus lanatus*) y el tomate (*Solanum lycopersicum*) implica retos importantes debido a su alta actividad de agua, lo que acelera a su deterioro. No obstante, estos frutos son ricos en compuestos bioactivos como carotenoides y polifenoles. Una estrategia para preservar sus propiedades y alargar su vida útil consiste en cristalizar parcialmente el agua (formando un *ice slurry*), generando una mezcla semi-sólida que retarda procesos de descomposición.

Este estudio evaluó el comportamiento de congelación de suspensiones de mesocarpio de sandía y pulpa de tomate con concentraciones de sólidos del 20, 25 y 30% (w/w). Las muestras fueron procesadas en un intercambiador de calor de superficie raspada (ICSR), asistido por un sistema termoeléctrico tipo Peltier (TEM). Se caracterizaron propiedades fisicoquímicas como bioquímicas, además, se obtuvieron curvas de congelación, puntos de congelación inicial (teóricos y experimentales), fracción de hielo y propiedades térmicas como capacidad calorífica, densidad, conductividad y difusividad térmica.

Las muestras de sandía presentaron una humedad de 91.51%, pH de 5.56, aw de 0.92 y sólidos totales de 8.49%; mientras que el tomate mostró una humedad de 94.38%, pH de 4.4, aw de 0.94 y sólidos totales de 6.5%. Las curvas de congelación permitieron validar teóricamente los puntos de congelación y la evolución de fracción de hielo. Un ensayo preliminar con congelador convencional a -18°C permitió observar el comportamiento de cristalización inicial, sirviendo como referencia para validar el funcionamiento del sistema experimental.

El uso de un ICSR con un sistema Peltier mostró ser eficaz para controlar la temperatura de congelación sin afectar las propiedades nutricionales de las suspensiones. Este tipo de tecnología representa una alternativa funcional, segura y adaptable para el proceso de matrices alimentarios (sopas, caldos, etc.).

ABSTRACT

Effect of freezing Condition on the Retention of Polyphenols and Carotenoids in Watermelon Mesocarp and Tomato Using a Peltier System

By: Eng. Arely Cano Garay

Advisor: PhD. Rosalía Cerecero Enríquez

PhD. José Manuel Tejero Andrade

The preservation of climacteric foods such as watermelon (*Citrullus lanatus*) presents significant challenges due to their high water activity, which accelerates spoilage. However, these fruits are rich in bioactive compounds such as carotenoids and polyphenols. One strategy to preserve their properties and extend shelf life is the partial crystallization of water (forming an *ice slurry*), generating a semi-solid mixture that slows down decomposition processes.

This study evaluated the freezing behavior of watermelon mesocarp and tomato pulp suspensions with solid concentration of 20, 25 and 30% (w/w). The samples were processed in a scraped surface heat exchanger (SSHE), assisted by a Peltier-type thermoelectric module (TEM). Physicochemical and biochemical properties were characterized. Additionally, freezing curves, theoretical and experimental initial freezing points, ice fraction and thermal properties such as specific heat capacity, density, thermal conductivity and thermal diffusivity were obtained.

Watermelon samples showed a moisture content of 91.51%, pH of 5.56, a_w of 0.92 and total solids of 8.49%; while tomato samples showed 94.38% moisture, pH 4.4, a_w 0.94 and 6.5% total solids. The freezing curves allowed for the theoretical validation of freezing points and the evolution of the ice fraction. A preliminary test using a conventional freezer at -18°C enable observation of the initial crystallization behavior, serving as a reference to validate the performance of the experimental system.

The use of an SSHE with a Peltier system proved effective for controlling the freezing temperature without compromising the nutritional properties of the suspensions. This type of technology represents a functional, safe and adaptable alternative for processing food matrices such as soups, broths and the other similar products.

ÍNDICE

Reconocimientos académicos

RESUMEN	I
ABSTRACT	II
LISTA DE FIGURAS	VI
LISTA DE TABLAS	X
NOMENCLATURA	XI
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	4
1.1 Generalidades de la sandía y el tomate	4
1.1.1 Propiedades fisicoquímicas	6
1.1.2 Propiedades bioquímicas	8
1.2 Carotenoides y licopeno	11
1.3 Polifenoles	12
1.3.1 Flavonoides y Antocianinas	13
1.4 Congelación	15
1.4.1 Curva de congelación	17
1.4.2 Fase de nucleación y cristalización	18
1.4.3 Incremento de volumen	19
1.4.4 Agua congelable	19
1.4.5 Tiempo de congelación	19
1.4.6 Punto de congelación de una solución	21
1.4.7 Propiedades térmicas en alimentos	22
1.5 Intercambiadores de calor	26
1.5.1 Tipos de intercambiador	27
1.5.2 Sistema termoeléctrico	28
1.5.3 Efecto Seebeck, Joule y Thomson	29
1.5.4 Efecto Peltier	31
1.5.5 Celda Peltier	32

1.6 Espectrofotometría	34
1.6.1 Espectro infrarrojo	35
1.6.2 FT-IR en alimentos	37
1.7 Diseño de experimentos	38
1.8 Antecedentes	38
1.9 Avances	40
 CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS	 44
2.1. Adquisición y procesamiento del mesocarpio de sandía y pulpa de tomate	44
2.2 Caracterización fisicoquímica de pulpa de tomate y mesocarpio de sandia.	45
2.2.1 Determinación de pH	45
2.2.2 Determinación de porcentaje de humedad	45
2.2.3 Determinación de sólidos totales	46
2.2.4 Determinación de actividad de agua (a_w)	46
2.2.5 Determinación de color	46
2.3 Características bioquímicas de la pulpa y de mesocarpio de sandia	47
2.3.1 Determinación de antocianinas	47
2.3.2 Determinación de carotenos totales	48
2.3.3 Determinación de licopeno	48
2.3.4 Determinación del contenido total de polifenoles	49
2.4 Desarrollo, montaje y validación del ICSR de laboratorio para congelación en suspensión de mesocarpio de sandía y pulpa de tomate	50
2.4.1 Montaje y validación del sistema de enfriamiento TEM de efecto Peltier	51
2.4.2 Construcción experimental del intercambiador de calor de superficie raspada	52
2.4.3 Validación experimental del funcionamiento del ICSR	53
2.4.4 Cálculo de la temperatura promedio del fluido y pared de intercambio	54
2.4.5 Cálculo del coeficiente interno de transferencia (h) en la suspensión de hielo- mesocarpio de sandía y pulpa de tomate	55
2.4.6 Cálculo de tiempo de congelación inicial	55
2.4.7 Fracción de masa de hielo	56
2.5 Determinación de las propiedades termodinámicas	56
2.5.1 Cálculo de la capacidad calorífica	57
2.5.2 Cálculo de la conductividad térmica	57
2.5.3 Cálculo de la difusividad térmica	57

2.6 Validación por FTIR del contenido de nutrientes	57
2.7 Análisis de color y Regresión no lineal de propiedades térmicas	58
CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	60
3.1 Análisis fisicoquímico del tomate y sandía	60
3.1.1 Determinación de color	61
3.2 Análisis bioquímico	62
3.3 Determinación de la $T_{c,i}$ a partir de las curvas de congelación teóricas y experimentales.	63
3.3.1 Curvas de congelación teórica y empírica en un congelador comercial.	63
3.3.2 Curvas de congelación de soluciones de pulpa de tomate y de mesocarpio de sandia	64
3.3.3 Determinación de las propiedades térmicas	65
3.4 Determinación de las condiciones de congelación en el ICSR	69
3.4.1 Validación del montaje del prototipo de congelación	69
3.4.2 Tiempo de congelación inicial y fracción hielo	74
3.5 Validación por FTIR del contenido de nutrientes	80
3.6 Regresión lineal	82
CONCLUSIONES	87
RECOMENDACIONES	88
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89
ANEXOS	102

LISTA DE FIGURAS

Figura		Pág.
1.1	Morfología de la sandía (Gebhart y Matthews, 1985)	5
1.2	Morfología del tomate (Mundo huerto, 2016)	6
1.3	Coordenadas de color en el sistema Hunter <i>Lab</i> . (Mathias-Retting y An-Hen. 2014)	8
1.4	Estructura del β -caroteno y licopeno (Meléndez-Martínez <i>et al.</i> , 2021)	12
1.5	Estructura química de los flavonoides (Hernández-Guzmán, 2015)	14
1.6	Estructura de Antocianina 3-glucósido (Peñarrieta <i>et al.</i> , 2014)	15
1.7	Curva de congelación de un alimento (Umaña, 2011)	17
1.8	Diagrama de tipos de intercambiadores (Orrego, 2003)	27
1.9	Diagrama del efecto Seebeck (Yu y Logvivov, 2007)	30
1.10	Diagrama del efecto Thomson. Consiste en electricidad pasa a través del gradiente de temperatura a lo largo de su longitud donde el calor es absorbido o expulsado a lo largo de la corriente. (Thakkar, 2016)	31
1.11	Efecto Peltier (Yu y Logvinov, 2007)	32
1.12	Estructura de la celda Peltier (Del Campo, 2022)	33
1.13	Longitud de onda y absorbancia (Rochenszwalb y Figueroa, 2023)	34
1.14	Regiones espectrales de infrarrojo (Téllez, 2019)	35
1.15	Espectro MIR en diferentes regiones mostrando los grupos funcionales de cada área. (Dani <i>et al.</i> , 2019)	37

2.1	Metodología del proceso de congelación en un ICSR del mesocarpio de sandía y pulpa de tomate	44
2.2	Muestras de tomates y sandías naturales adquiridos	45
2.3	Medidor de Actividad de agua	46
2.4	Diagrama del sistema de enfriamiento termoeléctrico	52
2.5	Figura izquierda del intercambiador muestra la posición de las cuchillas y, la figura de la derecha muestra la tapa y contratapa.	53
2.6	Vista del soporte para el ICSR con sistema TEM lateral (a) y frontal (b)	54
2.7	Composición del Equipo PerkimElmer Two: a) Vista general, b) Diamante y brazo de presión y c) Software de fábrica del equipo	58
3.1	Curva de calibración de ácido gálico para la identificación de polifenoles	63
3.2	Curvas de congelación del mesocarpio de sandía. a) 8.49% sólidos y b) 20, 25 y 30% sólidos	65
3.3	Curvas de congelación de pulpa de tomate con 6.5% sólidos, y a 20, 25 y 30% sólidos	65
3.4	Propiedades térmicas del mesocarpio de sandía experimental y teórica: a) Capacidad calorífica, b) densidad	66
3.5	Propiedades térmicas del mesocarpio de sandía experimental y teórica: a) Conductividad térmica y b) Difusividad térmica	67
3.6	Propiedades térmicas de la pulpa de tomate experimental y teóricas: a) Capacidad calorífica, b) densidad,	68

3.7	Propiedades térmicas de la pulpa de tomate experimental y teóricas: a) Conductividad térmica y b) difusividad térmica	68
3.8	Curvas de congelación del mesocarpio de sandía sin agitación a 8.49 sólidos, 20, 25 y 30%	70
3.9	Curvas de congelación del mesocarpio de sandía con agitación a 8.49 sólidos, 20, 30 y 40%	71
3.10	Curvas de congelación de la pulpa de tomate sin agitación a 6.5 sólidos, 20, 30 y 40%	72
3.11	Curvas de congelación de la pulpa de tomate con agitación a 6.5 sólidos, 20, 30 y 40%	73
3.12	Mesocarpio de sandía sin agitación: a)20, b)30 y c)40%	76
3.13	Mesocarpio de sandía con agitación: a) 20, b) 30 y c) 40%	76
3.14	Pulpa de tomate sin agitación: a)20, b)30 y c)40%	77
3.15	Pulpa de tomate con agitación: a) 20, b) 30 y c) 40%	77
3.16	Micrografías de mesocarpio de sandía sin agitación: a)20, b) 30 y c) 40%	78
3.17	Micrografías de mesocarpio de sandía con agitación: a)20, b) 30 y c) 40%	78
3.18	Micrografía de pulpa de tomate sin agitación: a) 20, b) 30 y c) 40%	79
3.19	Micrografía de pulpa de tomate con agitación: a) 20, b) 30 y c) 40%	79
3.20	Espectros FTIR de mesocarpio de sandía antes y después de almacenarse	81
3.21	Espectros FTIR de pulpa de tomate antes y después de almacenarse	82
3.22	Medición de color de mesocarpio de sandía fresco como referencia y muestra por triplicado de	83

	congelación donde: a) Luminosidad, b) tonalidad verde a rojas y c) azul a amarillo	
3.23	Medición de color de pulpa de tomate fresco como referencia y muestra por triplicado de congelación donde: a) Luminosidad, b) tonalidades verdes a rojas y c) azul a amarillo	84
3.24	Comparación entre los datos experimentales y teóricos de la conductividad térmica de mesocarpio de sandía y pulpa de tomate a diferentes temperaturas.	85
3.25	Comparación entre los datos experimentales y teóricos de la capacidad calorífica de mesocarpio de sandía y pulpa de tomate a diferentes temperaturas	86

LISTA DE TABLAS

Tabla		Pág.
1.1	Composición nutricional de la sandía en 100g (USDA, 2019).	9
1.2	Composición nutricional del tomate en 100g (USDA,2019).	10
1.3	Análisis de las técnicas de congelación y efecto en alimentos	16
1.4	Factor geométrico utilizado para la ecuación de Plank (Esteban-Valdez, 2018)	21
1.5	Coeficientes para estimar propiedades térmicas de los alimentos (Choi y Okos, 1986, dados por Singh y Heldman, 2009)	26
1.6	Aplicaciones en diferentes efectos en sistemas termoeléctricos	29
2.1	Datos de curva de calibración en la determinación de polifenoles	49
3.1	Caracterización fisicoquímica de mesocarpio de sandía (<i>Citrullus lanatus</i>) y pulpa de tomate (<i>Solanum lycopersicum</i>)	60
3.2	Análisis de color de mesocarpio de sandía y pulpa de tomate natural	61
3.3	Determinación de color en muestras frescas y congeladas	62
3.4	Caracterización bioquímica del mesocarpio de sandía y pulpa de tomate	62
3.5	Propiedades térmicas del mesocarpio de sandía	66
3.6	Propiedades térmicas de la pulpa de tomate	67
3.7	Temperatura de congelación inicial del mesocarpio de sandía en el ICSR	71
3.8	Temperatura de congelación inicial en pulpa de tomate en el ICSR	73
3.9	Tiempo de congelación inicial en mesocarpio de sandía y pulpa de tomate	75

NOMENCLATURA

Abreviatura	Descripción	Unidades
A	Absorbancia	-
a	Coordenadas rojo/verde	-
Ar	Área angular	-
a _w	Actividad de agua	-
b	Coordenadas amarillo/azul	-
C*	Chrome	-
C _p	Capacidad calorífica	Kj/(kg °C)
ΔE	Diferencia de color	-
FD	Factor de dilución	-
h	Coefficiente de transferencia de calor	W/(m ² °C)
h*	Hue	-
k, λ	Conductividad térmica	W/m°C
L	Luminosidad	-
m _w	Fracción de masa de agua	-
PM	Peso molecular	-
P, R	Constantes de Plank	-
Q	Calor perdido	kJ/s
T	Temperatura	
T _a	Temperatura del medio acondicionado	
T _{c.i}	Temperatura de congelación inicial del alimento	°C
T _{p.i}	Temperatura de la pared interna	
T _m	Temperatura promedio	
t	Tiempo	s
V	Volumen	L, mL
X _a	Contenido de fracción de agua	-
x _b	Fracción de agua ligada	-
X _p	Fracción de masa de proteína	-
X _{m.h}	Fracción másica de hielo	°C
α	Difusividad térmica	m ² /s
δ	Espesor	m
λ	Calor latente de fusión del agua	(kJ/kg)
λ _a	Calor latente de congelación del alimento	(kJ/Kg)
ρ	Densidad	Kg/cm ³
θ	Tiempo de congelación de Plank	s

INTRODUCCIÓN

La conservación de alimentos es una de las prioridades fundamentales dentro de la industria alimentaria, dado a que permite extender la vida útil de los productos, mantener su valor nutricional y preservar sus características sensoriales. Entre los métodos más utilizados es la congelación, que se destaca por su eficacia, reducción al deterioro microbiológico y enzimático sin afectar significativamente la calidad del alimento. Sin embargo, este método no siempre resulta adecuado para frutos enteros con alto contenido de agua, por lo que una opción viable es su transformación en jugos, suspensiones o concentrados, permitiendo un mejor manejo, almacenamiento y aprovechamiento.

Diversos estudios han abordado la aplicación de tecnologías de congelación para mejorar la conservación de matrices alimentarias líquidas o semilíquidas, enfocándose en la formación controlada de hielo como una estrategia para concentrar sólidos sin aplicar calor. La sandía (*Citrullus lanatus*) y tomate (*Solanum lycopersicum*) representan productos de gran interés por alta disponibilidad de agua, riqueza en nutrientes y compuestos bioactivos. No obstante, enfrentan desafíos particulares: El mesocarpio de sandía o blanco, es frecuentemente desechado a pesar de su contenido nutricional, mientras que el tomate, por su naturaleza climatérica, presenta una vida útil pero corta y es susceptible a deterioro físico durante el almacenamiento y transporte.

El problema que aborda este trabajo es que ambos alimentos son altamente perecederos, lo que representa una pérdida nutricional, económica y ambiental. Se busca, por tanto, proponer una alternativa que permita conservar y valorizar estos productos mediante un método eficiente. Con base a lo anterior, este proyecto propone el uso de un intercambiador de calor de superficie raspada (ICSR) acondicionado con un sistema termoelectrónico tipo Peltier (TEM) para llevar a cabo un proceso de congelación con el fin de congelar suspensiones líquidas de mesocarpio de sandía y pulpa de tomate. Este sistema permite controlar de manera precisa la temperatura del proceso y, con ayuda de un raspador, generar cristales de hielo pequeños, favoreciendo una mejor conservación estructural y química del

alimento. Esto radica la necesidad de desarrollar tecnologías que permitan reducir el desperdicio alimentario, mejorar el aprovechamiento de subproductos y ofrecer alternativas de conservación que preserven compuestos como polifenoles y carotenoides y permita contemplar el diseño y validación del prototipo, la caracterización de las suspensiones, la evaluación de la fracción de hielo generada y la medición de la retención de compuestos funcionales. Se espera que los resultados como base para futuras aplicaciones industriales orientadas a la conservación y valorización de alimentos altamente perecederos.

CAPÍTULO I

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

CAPÍTULO I. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

1.1 Generalidades de la sandía y el tomate

La sandía (*Citrullus lanatus*) es un miembro de la familia cucurbitácea. Esta especie es nativa de África y ha sido cultivado por 4000 años en India y Sur de Rusia. Esta especie está revestida de zarcillos rizados y peludos, hojas pinadas lobuladas. La pulpa del fruto es acuosa, dulce y rojizo. La sandía contiene una amplia gama de compuestos bioactivos que incluyen glucósidos, carotenoides, flavonoides, alcaloides, carbohidratos, ácidos grasos y aceites esenciales (Sorokina *et al.*, 2021).

La sandía es un cultivo de impacto económico y demandada por su composición nutritiva, propiedades y bajo contenido calórico. Tiene un periodo de vida de aproximadamente 30 días después de su cosecha. Como se muestra en la Figura 1.1 es de forma esférica u ovalada. La piel de la sandía consta de dos capas: Una capa exterior delgada, de color verde llamada epicarpio, esta capa tiende a tener rayas o un patrón en tonos verdes. La capa interna, llamada endocarpio, se encuentra dentro de la piel y es la porción comestible de la fruta. Consta de semillas que se encuentran incrustados en el endocarpio donde maduran concurrentemente con la fruta hasta su madurez (Gebhart y Matthews, 1985).

Al igual que la sandía, el tomate (*Solanum lycopersicum*) es una hortaliza popular, objeto de numerosos estudios científicos debido a su composición nutricional y beneficios para la salud. En la Figura 1.2, Mundo huerto (2018) se observa en cómo se encuentra conformado el tomate, puede tomar forma bilocular o plurilocular, sub esférica globosa o alargada, y puede alcanzar peso que oscila casi hasta los 600 g. Este fruto está compuesto por epicarpio, tejido placentario y semillas. Estas semillas son ovoides y comprimidas, pueden ser lisas o muy velludas y parduzcas. Cada semilla está compuesta por embrión, endospermo y cubierta seminal (Mayela, 2017).

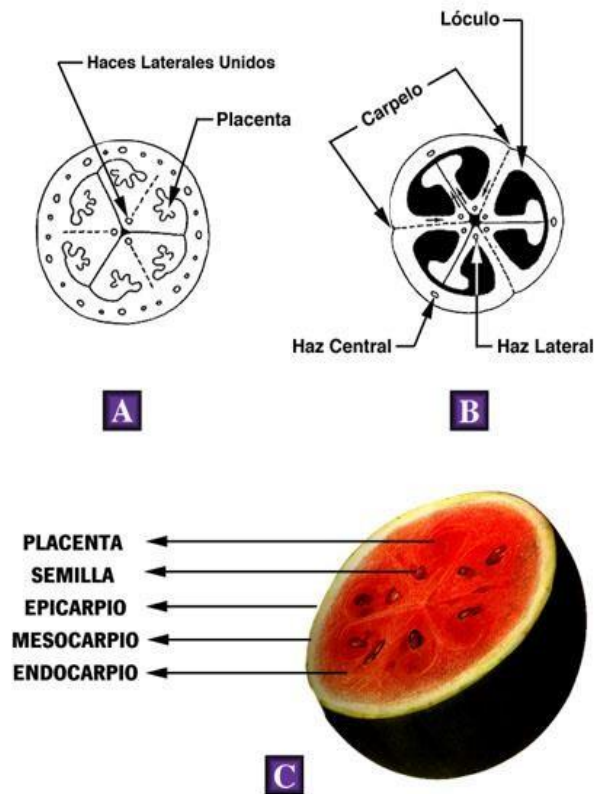


Figura 1. 1.Morfología de la sandía (Gebhart y Mattheews, 1985)

El tomate (*Solanum lycopersicum*), pertenece a la familia de los solanáceas. Es una hortaliza originaria de América del Sur, cultivado en el año 700 a.C. en México. Es una baya, gruesa y carnosa con segmentos de diferentes formas. La planta de tomate tiene muchas características interesantes como el fruto carnoso, un simpodial brotes y hojas compuestas, que otras plantas modelos (arroz, por ejemplo). Es rica en licopeno, lo que puede tener efectos beneficiosos, además del licopeno, es una fuente de varios carotenoides como fitoeno, fitoflueno, α -caroteno, β -caroteno, gammacaroteno y neurospeno (Seisuke y Neelima, 2014; Perveen *et al.*, 2015).

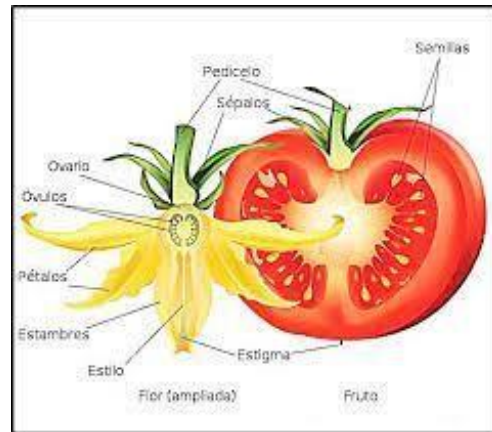


Figura 1. 2. Morfología del tomate (Mundo huerto, 2018)

1.1.1 Propiedades fisicoquímicas

En la evaluación de la calidad de los alimentos se consideran varios factores. La composición depende de la variedad, origen y condiciones de crecimiento, así como la calidad, procesamiento y almacenamiento. Entre estas propiedades son el pH, acidez titulable (AT), sólidos solubles totales (°Brix), contenido de materia seca, contenido de cenizas, proteína, ácido ascórbico, azúcares reductores y relación °Brix/ácido. En el caso de las frutas, el componente predominante es el agua, además de carbohidratos como sacarosa, fructuosa, glucosa y sorbitol, junto con una pequeña cantidad de proteína. (Nonga *et al.*, 2014).

Los sólidos solubles totales (STT) representan la cantidad de sustancias disueltas en un líquido y se determinan a través de los grados Brix. Este parámetro incluye carbohidratos, ácidos orgánicos, proteínas, grasas y minerales, representando entre el 10 y 20% del peso fresco del fruto. A medida que la fruta madura, el contenido de STT aumenta, reduciendo la acidez y potenciando el dulzor. Dado que la concentración de STT varía en diferentes partes del fruto, es fundamental obtener un valor representativo utilizando un refractómetro (Escorza, 2023).

El pH es un indicador del nivel de acidez o alcalinidad de una sustancia, siendo papel crucial en la seguridad alimentaria, debido a que influye en el desarrollo de microorganismos patógenos que afectan la salud al consumidor. La medición en

los alimentos permite determinar qué tipo de microorganismos pueden proliferar en ellos. Los alimentos ácidos como carnes, lácteos, azúcares, granos refinados y bebidas carbonatadas presentan un pH bajo, ejemplos de estos incluyen limones, naranjas, tomate y yogur. Por otro lado, los alimentos alcalinos tienen un pH superior a 7 y contribuyen a la alcalinización del organismo, lo que puede aportar beneficios para la salud, entre ellos se encuentran frutas, verduras, frutos frescos y granos integrales como espinacas, brócoli, manzanas y sandía (Ameyalli, 2023).

El agua es un componente esencial en los alimentos y su contenido influye en diversas características como el valor nutricional, sabor y aroma. Con la industrialización de los alimentos, el nivel de agua adquiere aún más importancia, determinando la identidad del producto. En los alimentos naturales, el porcentaje de agua varía entre 60 y 90%. En los alimentos, el agua se encuentra en dos formas: Agua libre, que se libera con facilidad cuya cantidad puede estimarse rápidamente y agua absorbida, que se encuentra cristalizada o unida a proteínas, dificultando su eliminación (Hanna Instruments, 2025).

El color es una propiedad organoléptica de los alimentos percibida a través de la vista. Se considera un factor psicológico clave en la apreciación y selección de productos alimentos, especialmente en aquellos de origen vegetal, influye en la percepción de madurez y calidad. La evaluación del color puede realizarse de forma visual (con el ojo humano) o mediante instrumentos como colorímetros o sistemas de visión digital. El color se define a partir de tres atributos: Matiz, croma y brillo. El sistema CIE es el más utilizado para su medición, ya que toma en cuenta las fuentes de iluminación y los observadores estándar. Este sistema emplea tres coordenadas principales para ubicar un color en el espacio: CIE XYZ, CIE *Lab* y CIE LC^*h° . Donde L^* representa la luminosidad con valores entre 0 (negro) y 100 (blanco), a^* indica la desviación del color respecto al eje acromático, valores positivos corresponden al rojo y negativos al verde, b^* definen la desviación, valores positivos es amarillo y azul negativos. Las coordenadas a^* y b^* conforman el plano de cromaticidad, mientras que L^* , C^* (croma) y h° (tono)

establecen el modelo cilíndrico de color en el espacio CIE *Lab*. En este sistema, C^* representa la saturación del color, con valores 0 a 150, mientras que H^* indica el matiz del color. En la Figura 1.3, Mathias-Retting (2014) presenta una figura, en donde se puede observar las coordenadas en el sistema Hunter *Lab* (Mathias-Retting y An-Hen, 2014).

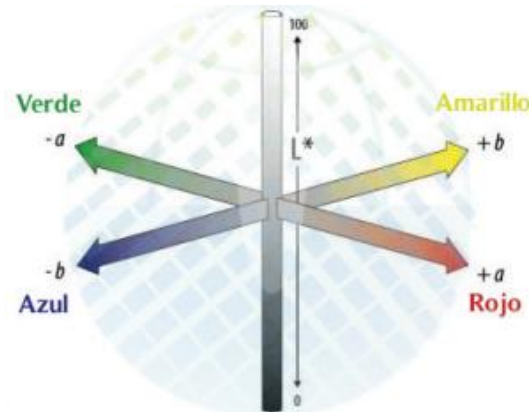


Figura 1. 3. Coordenadas de color en el sistema Hunter *Lab*
(Mathias-Retting y An-Hen, 2014)

1.1.2 Propiedades bioquímicas

La sandía por su alto contenido de agua constituye el 92% de su composición, permitiendo hidratarse en periodos de calor intenso o actividad física. Se considera una fuente de carbohidratos, es decir, contenido de azúcares naturales como principal componente. Sin embargo, el índice glucémico es bajo debido al contenido de fibra dietética, es decir, que el consumo no provoca aumento en los niveles de glucosa en la sangre (USDA, 2019). Esto se puede apreciar en la Tabla 1.1, en cuanto a la composición nutricional de la sandía en 100 g.

Además de tener propiedades hidratantes, paliativas, antienvjecimiento y antioxidantes, favoreciendo su uso a nivel industrial. Tiene un alto contenido de vitamina C, siendo un antioxidante valioso en cuanto a la eliminación de radicales libres (Muhammad *et al.* 2022).

Tabla 1. 1. Composición nutricional de la sandía en 100g (USDA, 2019).

Componente	Cantidad
Agua (g)	91.4
Energía (Kcal)	30
Proteína (g)	0.61
Lípidos totales (g)	0.15
Carbohidratos (g)	7.55
Fibra dietética total (g)	0.4
Ca (mg)	7
Fe (mg)	0.24
K(mg)	112
P (mg)	11
Vitamina C (mg)	8.1
Vitamina A: Eq. Retinol (μ g)	28
Caroteno- β (μ g)	303
Licopeno(μ g)	4530
Vitamina E (mg)	0.05

Diversos estudios han analizado la composición nutricional de la sandía. Por ejemplo, la investigación de Castellón y Talavera (2012) realizaron bajo condiciones óptimas de cultivo, presentaron resultados consistentes con los valores nutricionales mencionados en la Tabla 1.1. De manera similar, Valle-Vargas *et al.* (2020), en un estudio bioquímico empleando extracciones en la corteza de sandía, corroboraron la presencia de compuestos a partir de 100 g de sandía, confirmó que esta fruta contiene nutrientes que contribuyen positivamente a la dieta humana.

El tomate se consume natural y sin procesar, esto es, expuesto al oxígeno, luz, calor o frío, actividad enzimática e inclusive el pH. En cuanto a los alimentos procesados, en algunos casos, eliminan partes comestibles de interés con el objetivo de incrementar el valor calórico, a veces omitiendo el valor nutritivo (Carbajal, 2013).

El tomate está compuesto por agua y macronutrientes, entre los carotenoides no provitamina A y vitamina C. Entre los carotenoides no provitamina A se

encuentra el licopeno cuya cantidad depende de su variedad de cultivo, el grado de madurez, modo de cultivo y forma de maduración. En la Tabla 1.2, se aprecia la composición nutricional del tomate en porción de 100 g. (USDA,2019).

Tabla 1. 2. Composición nutricional del tomate en 100g (USDA,2019).

Componente	Cantidad
Agua (g)	94.38
Energía (Kcal)	20
Proteína (g)	0.82
Lípidos totales (g)	0.31
Carbohidratos (g)	4.04
Fibra dietética total (g)	1.2
Ca (mg)	10
Fe (mg)	0.22
K(mg)	226
P (mg)	23
Vitamina C (mg)	16.3
Vitamina B ₆ (mg)	0.078
Vitamina A: Eq. Retinol (μ g)	32
Caroteno- β (μ g)	397
Licopeno(μ g)	2813
Vitamina E (mg)	0.58

A partir del estudio de la publicación del Gobierno de México (2020), en 100 g de tomate contiene un 94.2% de agua, 1.8 g de fibra, 1 g de proteína, 820 μ g de carotenos y 16.3 mg de vitamina C. En la búsqueda de información acerca de las propiedades que tiene el tomate como menciona Ali *et al.* (2020) siendo el análisis proximal uno de los primeros enfoques para la caracterización de los alimentos, particularmente para la identificación de nutrientes en cualquier producto alimenticio y mencionan que, 100g de tomate consta de ceniza de 0.0875g , agua de 0.9417 g, humedad 0.9118 g, azúcar total de 0.05 g, pH 3.83, energía 34.67 kcal/100 g, acidez 0.48%, fructuosa 2.88%, glucosa 2.45%, sacarosa 0.02% y fibra total 11.44 (g/100 g). En el estudio de Abdel-Rahman

(1982) mediante los procedimientos de la Asociación de Químicos de Vitaminas, Inc., determinaron la composición del tomate en diferentes presentaciones (fresco, jugo y concentrado), concluyendo que no hay diferencia significativa entre las tres presentaciones en cuanto a humedad y pH. Hubo diferencia en proteína, lípido, cenizas, carbohidratos y calorías de tomate fresco y jugo con la concentración de tomate, debido al tipo de proceso y condiciones que se encuentre.

1.2 Carotenoides y licopeno

Los antioxidantes naturales se encuentran en frutas y vegetales, y permiten la protección de un número considerable de enfermedades cardiovasculares. La búsqueda de antioxidantes, demuestran una fuente de pro vitamina A y su actividad de antioxidante real en la célula al participar en la neutralización de especies reactivas de oxígeno y nitrógeno producido. Los carotenoides como el licopeno protegen las plantas al absorber la luz durante la fotosíntesis, evitando la fotosensibilización (Carranco *et al.*, 2011).

Los carotenoides son pigmentos tetraterpénicos que presentan colores amarillo, naranja, rojo y morado. Son ampliamente distribuidos en la naturaleza y están presentes en hongos, algas, plantas y animales. Las estructuras generales consisten en una cadena de polieno con nueve dobles enlaces conjugados y un grupo terminal en ambos extremos de la cadena poliénica. Se dividen en dos subgrupos: Carotenos y xantofilas. Los carotenos, tales como α -caroteno, β -caroteno, β , Ψ -caroteno (γ -caroteno) y el licopeno, siendo hidrocarburos (Maoka, 2019).

El licopeno es un compuesto de frutas y verduras de color rojo y naranja, como el tomate, la sandía, la papaya, la guayaba rosada, la zanahoria, entre otros. Es responsable debido a la absorción de luz con una longitud de onda máxima de $\lambda=444, 170$ y 502 nm. Participa en el proceso de fotosíntesis y protege a las plantas de los daños causados por la sobreexposición a la luz. También es un intermediario esencial en la síntesis de β -caroteno y xantofilas (Kulawik *et al.*, 2023).

Tiene una estructura acíclica, un isómero del β -caroteno, que no tiene actividad como provitamina A, debido a que carece del anillo de beta-ionona (Figura 1.4). Este pigmento natural, es formado por cuarenta átomos de carbono y tres enlaces dobles, de lo cual, es altamente reactivo frente al oxígeno y los radicales libres. Solo las plantas y ciertos microorganismos pueden sintetizar licopeno, y una de sus funciones principales es absorber luz durante la fotosíntesis, protegiendo a la planta contra la fotosensibilización. Además, se dé su presencia en diversos alimentos, el licopeno es uno de los carotenoides que se encuentra en mayor concentración en el suero humano, representando entre 21-43% del total de carotenoides. Se distribuye en varios tejidos del cuerpo, como el hígado, riñones, glándulas suprarrenales, testículos, ovarios y próstata. Aunque depende de la ingesta a través de la dieta, las variaciones diarias tienen poco efecto en su concentración, debido a su vida media en el plasma siendo relativamente larga entre 12 a 33 días (Cruz *et al.* 2013)

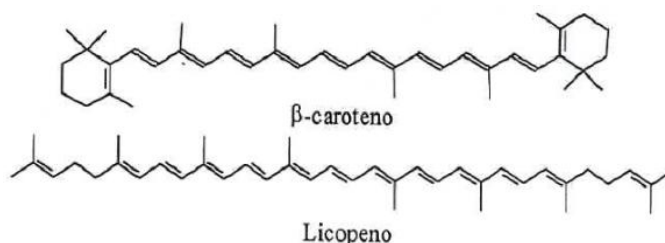


Figura 1. 4. Estructura del β -caroteno y licopeno (Meléndez-Martínez *et al.*, 2021)

1.3 Polifenoles

Los polifenoles o compuestos fenólicos ampliamente distribuidos de grupos de metabolitos en las plantas. No solamente comprenden una amplia variedad de moléculas que tienen una estructura polifenólica (es decir, grupos hidroxilo en anillos aromáticos), sino también con un anillo fenólico, como ácidos y alcoholes fenólicos. Se caracterizan químicamente como compuestos con características estructurales fenólicas, este grupo de productos naturales es muy diverso y contiene varios subgrupos de compuestos fenólicos. Biogenéticamente, los compuestos fenólicos proceden de dos vías metabólicas: La vía del ácido shikímico donde se

forman principalmente los fenilpropanoides y la vía del ácido acético (Belscak, *et al.*, 2018).

En la actualidad, aproximadamente 10,000 compuestos fenólicos diferentes se han identificado y, en su mayoría son de origen vegetal. Los principales son los fenoles ácidos, que, consisten dos grupos, con presencia de un grupo hidroxilo y una mayor separación del grupo carbonilo sujeto al anillo aromático, en donde aumenta la capacidad antioxidante. Otro grupo importante son los ácidos hidroxibenzóicos, compuestos con presencia de un grupo carboxilo (grupo ácido) y grupos hidroxilo sujetos en un anillo aromático. Mientras que los lignanos y ligninas, se derivan de fenilalanina y alcoholes cinámicos presentes en algunos alimentos, como granos, hortalizas y uvas. Tienen una capacidad antioxidante significativa, y se consideran como fuentes de fitoestrógenos en la dieta (Peñarrieta *et al.*, 2014).

Existen diferentes técnicas que permiten identificar estos compuestos, uno de los principales es extracción de matrices vegetales, por técnicas de extracción convencional, como extracción sólido-líquido, con disolventes polares: Agua, metanol, etanol o acetona, entre otros. Existen métodos desarrollados para la determinación de compuestos fenólicos que requieren mayor sensibilidad y selectiva, uno de ellos es la espectrofotometría UV-Vis, permite determinar diferentes grupos estructurales presentes en los compuestos fenólicos, mientras de manera cuantitativa, existe la técnica de Folin-Ciocalteu, es utilizado para la determinación de fenoles totales. Se basa en la oxidación total de estos compuestos que se encuentran presentes en las muestras por la acción del reactivo Folin-Ciocalteu. Este contenido molibdato y tungstato sódico, que reacciona a cualquier tipo de fenol. Para el contenido total de flavonoides se determina utilizando el colorímetro, basándose en el complejo de los compuestos fenólicos con Al(III) (Nacz y Shahidi, 2006).

1.3.1 Flavonoides y Antocianinas

Son un subgrupo primario que poseen propiedades antioxidantes, antimicrobianas y antiinflamatorias, exhiben efectos beneficios contra la obesidad, diabetes y

trastornos neurodegenerativos y enfermedades cardiovasculares. Comúnmente existen como metabolitos secundarios de las plantas en naturaleza. (Liu *et al.* 2020).

En la Figura 1.5, se aprecia la estructura química, consta de un esqueleto carbonado C6-C3-C6, en donde los componentes C6 son anillos aromáticos que se unen por tres átomos de carbono que pueden formar o no un tercer anillo pirano o pirona (Anillos A-C). Los diferentes flavonoides se diferencian en la concentración y en los sustituyentes el anillo, mientras que los compuestos individuales, entre cada grupo se distinguen diferentes sustituciones en los anillos A y B, como se observa en la Figura 1.5 (López-Luengo, 2002).

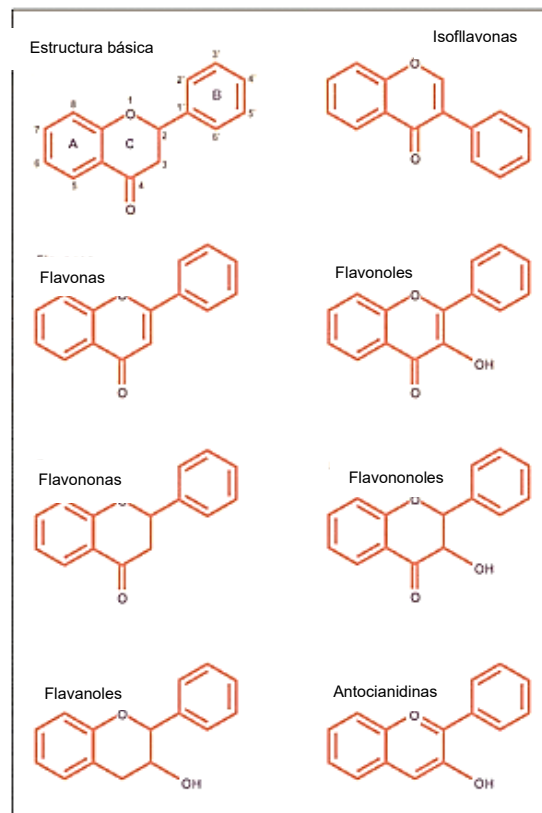


Figura 1. 5. Estructura química de los flavonoides (Hernández-Guzmán, 2015).

Son glucósidos de antocianidinas. El glucósido se encuentra presente en la posición 3-hidroxilo del anillo C (Figura 1.6). Son compuestos flavonoides que brindan a la planta variedad de colores que pueden ir desde el rojo hasta el violeta. Son pigmentos naturales que participan en funciones biológicas en su actividad antioxidante. Las antocianinas y antocianidinas se asocian como compuestos

beneficiosos para la salud porque posee la propiedad funcional de prevenir enfermedades cancerígenas (De la Rosa et al., 2022).

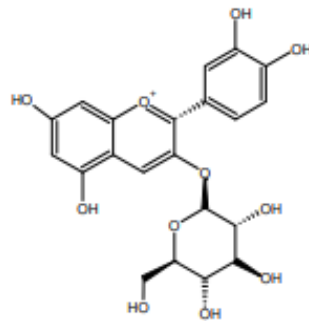


Figura 1. 6. Estructura de Antocianina 3-glucósido (Peñarrieta *et al.*, 2014)

1.4 Congelación

La refrigeración y la congelación son técnicas ampliamente utilizadas en la conservación de alimentos y otros productos perecederos. Estos métodos aprovechan las bajas temperaturas para ralentizar el deterioro microbiano y enzimático; la refrigeración implica mantener los alimentos a temperaturas cercanas a 0°C, mientras que la congelación disminuye para estar debajo de cero, ayudando a la preservación de la calidad y valor nutricional de los alimentos a largo plazo (Plank, 2005).

La congelación de los alimentos se encarga de retirar cierta cantidad de calor, tanto sensible como latente. El retiro de calor sensible permite disminuir la temperatura del alimento hasta alcanzar el punto de congelación inicial. Posteriormente, se retira el calor latente, provocando el cambio de estado del agua del alimento de líquido a sólido. Se continúa retirando calor sensible hasta alcanzar la temperatura deseada (Gutiérrez, 2014).

En la Tabla 1.3, presentan diversos estudios realizados por distintos autores, en los que se emplearon diferentes sistemas de congelación aplicados a alimentos bajo distintas condiciones.

Tabla 1. 3. Análisis de las técnicas de congelación y efecto en alimentos

Referencia	Tipo de sistema	Muestra	Concluyen
Ahsen, <i>et al.</i> (2020).	Congelación lenta vs rápida	Fresas enteras	Termopares T monitorean la congelación de fresas en almacenadas en Congelador Bosh de acero inox 316 perforado con congelación rápida (flujo de aire a 1.2 m/s a -35 °C). Bolsas de polietileno de baja densidad a -25°C durante 4 meses. Concluyeron que el congelador modificado congela más rápido que el doméstico, conserva mejor la estructura del tejido, luminosidad y color
Agnieszka <i>et al.</i> (2021).	Liofilización con pretratamiento de escaldado o ultrasonido	Rodajas de Remolacha en rodajas gap 5 mm, pre- enfriadas 4-6°C.	A partir de un escaldado o pre tratamiento con ultrasonido 40 kHz y 180W durante 5-10 min. Antes de la liofilización, emplean congelación rápida a -80°C por 2 h, congelación lenta a -18°C por 14 días y, combinada congelación rápida y almacenamiento a -18°C. Se utilizó el liofilizador ALPHA 1-4 por 48 h a 10°C a 63 Pa o 103 Pa. Concluyen que la calidad y propiedades del liofilizado depende del tipo de pretratamiento donde, el ultrasonido causó un mayor encogimiento en comparación con el escaldado, al afectar actividad de agua, afecta estructura y porosidad.
Dalmau <i>et al.</i> (2024).	Congelación rápida	Arándanos, uvas y espino amarillo.	Se realizó el secado de las bayas tratadas y no tratadas a 50°C (vacío y liofilizadas), evaluaron cambios en epicarpio, color y volumen (antes y después de la deshidratación). Con pretratamiento por inmersión de N líquido a -196°C, 2 min, seguido por 2 min a 20° C. Concluyen, el pretratamiento reduce el epicarpio al 47%, acelera el secado de la baya (conservando volumen, forma y color). La calidad del producto seco depende del tipo de baya.
You <i>et al.</i> (2021).	Congelación asistida por ultrasonido con nano-burbujas usando solución glicol (66% v/v) como refrigerante	Agua destilada y gelatina hidrolizada como alimento viscoso.	Evaluaron el comportamiento de las nano-burbujas y ultrasonido (con frecuencia constante o variable), afectan el congelado de alimentos viscosos. Emplearon soluciones de gelatina hidrolizada (10, 15, 20, 25 y 30%) como modelos para incorporar nano burbujas con distintos métodos de congelación para la formación de cristales de hielo. Las soluciones con 20 y 30% gelatina con nano burbujas tuvieron mayor estabilidad. La combinación de nano burbujas y ultrasonido resulta en una transición de fase más rápida y eficiente. Concluyeron que esta técnica puede optimizar la congelación en alimentos viscosos.
Delgado <i>et al.</i> (2009)	Congelación por inmersión asistida por ultrasonido	Manzanas en forma de cilindro de 1.8 cm de diámetro y 2.5 de altura	Analizaron el efecto del ultrasonido intermitente 120s a 40khz y 131.3 W en la velocidad de congelación por inmersión de manzanas en corte tangencial y radial en líquido refrigerante. Resultando en un 8% de mejora en rapidez de congelación respecto al ultrasonido, con una mejor transferencia de calor, conservando mejor textura, menor daño celular y estructura más uniforme. Concluyendo que el ultrasonido es favorece la calidad del congelado de frutas.
Zhiwei, <i>et al.</i> (2019)	Congelación con ultrasonido de multifrecuencia asistido	Papas cortadas en cilindro de 2 cm y diámetro de 1.5 cm. Se colocaron en bolsas de plástico de 5 x 7 cm	Evaluaron el efecto del ultrasonido de frecuencia múltiples 20, 28 y 40 kHz en la congelación de papa. Evaluaron características como firmeza, pérdida por goteo, contenido de nutrientes y estructura celular. El ultrasonido aceleró la congelación y redujo el tamaño de cristales de hielo. Las papas tratadas conservaron mejor textura y estructura interna. Las frecuencias múltiples mostraron mejor resultado logrando una menor pérdida de peso y mejores características visuales tras el descongelamiento.

La cristalización de una solución es una tecnología muy utilizada en la industria química y agroalimentaria. En la mayoría de los casos, estas características en la fase cristalina definen la calidad del producto, su textura e igualmente impacta la duración de la conservación. Los principales componentes que originan cristales o estructuras cristalinas en los alimentos son el agua, azúcar, lípidos o almidones. Otros componentes igualmente a ser cristalizados son las sales, ácidos orgánicos, proteínas y emulsificantes.

Las frutas y verduras se congelan a una temperatura de -18°C , y los alimentos con mayor contenido graso, como helados -2°C y, pescados, se congelan a temperaturas más bajas, $\sim -25^{\circ}\text{C}$. En la temperatura final al congelar alimentos, es posible que todavía tengan agua presente en forma líquida, 10% de agua puede estar en estado líquido, aunque a -18°C (Singh y Heldman, 2009).

1.4.1 Curva de congelación

El proceso de congelación en los alimentos tiene su complejidad que la congelación de agua. La evolución de la temperatura con respecto al tiempo, se conoce como curva de congelación, en la Figura 1.7 se muestra esta curva típica de un alimento:

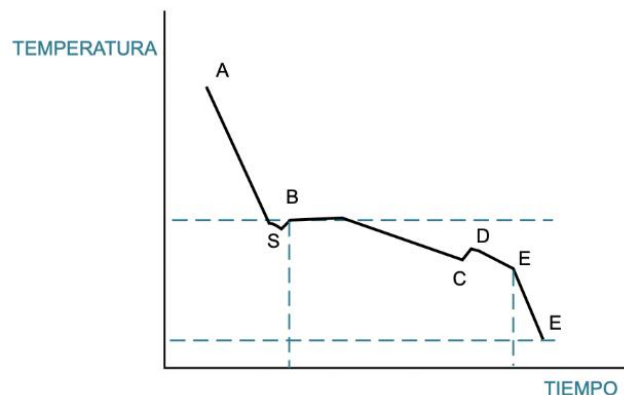


Figura 1. 7. Curva de congelación de un alimento (Umaña, 2011)

El alimento pasa por diferentes secciones:

AS: El alimento a someterse a bajas temperaturas, se enfría por debajo de su punto de congelación inferior a 0°C . En el punto **S** corresponde a la temperatura inferior al punto de congelación, en donde el agua permanece en estado líquido.

BC: Se elimina el calor latente con la formación de hielo, permaneciendo a temperatura constante. En el incremento de la concentración de solutos en la fracción de agua no congelada provoca el descenso del punto de congelación, disminuyendo ligeramente.

CD: Uno de los solutos alcanza la sobresaturación y se cristaliza. Esto hace que la liberación del calor latente correspondiente provoca el aumento de la temperatura hasta la temperatura del soluto.

DE: Continúa la cristalización del agua y el soluto.

EF: La temperatura de la mezcla de agua y hielo desciende.

1.4.2 Fase de nucleación y cristalización

Un nivel mínimo de agua es indispensable para la vida microbiana como para una variedad de reacciones químicas y bioquímicas. En general, cuando se somete un alimento a congelación, el agua se transforma en hielo y se produce un efecto de desecación, inactivando reacciones de la degradación del alimento y alargando la vida útil del alimento.

La congelación se produce de una manera paulatina, pasando por una nucleación inicial, después en crecimiento de los cristales. En la fase de nucleación, los alimentos más comunes, se congelan entre 0 y -4°C, es la zona en donde existe la formación de cristales. La congelación implica la presencia o formación de pequeños núcleos que son los centros de los cristales que se formaran. Al convertirse el agua en hielo, hay un incremento gradual en la concentración de elementos disueltos en el agua restante, originando un mayor descenso del punto de congelación. El crecimiento de cristales a partir de los núcleos formados, ante el descenso de la temperatura, este fenómeno ocurre rápido, formándose un mayor número de agregados cristalinos y, en consecuencia, el tamaño de los cristales es menor. Al contrario, una temperatura próxima al punto de fusión, la nucleación es lenta, con pocos núcleos cristalinos, por lo tanto, resultan cristales relativamente grandes. El descenso de temperatura alcanza un punto en el agua restante

(solución), agua-solutos concentrándose, solidifican juntos en un punto de saturación llamado punto eutéctico (Martín, 2015).

1.4.3 Incremento de volumen

El agua pura a 0°C incrementa en volumen aproximadamente 9% al congelarse. La formación de hielo siempre va acompañada de un incremento en volumen ocupado por la estructura del producto congelado, que producirá daños de mayor a menor magnitud de acuerdo con las características del tejido que esté congelando (frutos enteros, pulpas o pures). La dilatación del agua que se produce varía considerablemente de acuerdo con estos factores: contenido de agua, es decir, a mayor contenido de agua, mayor aumento de volumen. Por disposición celular, los tejidos poseen espacios intercelulares, absorción en el incremento interno de volumen sin que haya cambios importantes en el volumen global. Concentración de solutos, a mayor concentración, disminuye el punto de congelación (Gutiérrez, 2014).

1.4.4 Agua congelable

El agua ligada es aquella que no llega a congelarse a -20°C denominado como fracción de agua no congelable. Las propiedades termofísicas de los alimentos congelados dependen de la fracción hielo presente en el alimento, por lo que, se necesita analizar la fracción másica de agua cristalizable (Badui, 2006).

Una vez formadas las primeras semillas de hielo, a medida que la temperatura disminuye, hay un incremento en la fracción másica de hielo y un decremento en la fracción másica de agua no congelada, es por ello que, mientras mayor sea el cambio de agua libre a la condición de congelación, mayor será la conserva de la calidad del alimento (Barreiro y Sandoval, 2006).

1.4.5 Tiempo de congelación

Hay factores que influyen en el tiempo de congelación de alimentos. Se encuentra la temperatura del medio de congelación, de tal manera que los tiempos de congelación disminuirán en cuanto sea menor las dimensiones del producto, velocidad de flujo, coeficiente de transferencia de calor por convección h , y las propiedades térmicas del producto. Es uno de los parámetros más importantes en

el proceso de congelación, se define como el tiempo necesario para disminuir la temperatura del producto desde su temperatura inicial a -18°C . Cuando el producto alcanza la temperatura final dada, esto asegura que la temperatura media del producto se redujo a un valor de almacenamiento. Para el cálculo de tiempo de congelación se desarrolló por Plank en 1913. Se considera el calor latente de cambio de fase al aproximarse a los puntos de congelación. Los objetos se consideran homogéneos o isotrópicos y cuentan un valor promedio de conductividad térmica (Mendoza, 2016).

El cálculo de tiempo de congelación utilizando la ecuación de Plank, se refiere al cambio de estado, es decir, hasta que el alimento que ha sido enfriado hasta el punto de congelación. Se considera también que todo el calor latente de cambio de estado se elimina en las proximidades del punto de congelación y, además los objetos a enfriar tienen formas geométricas simples (paralelepípedos, planchas, cilindros o esferas). Además, los objetos se consideran homogéneos o isotrópicos y se cuenta con un valor promedio de la conductividad térmica (Morales, 2023)

Además, la constante de conductividad térmica para la región congelada se asume. La valoración del tiempo de congelación de Plank es como se muestra en la ecuación (1.1):

$$\theta = \frac{L_f}{T_{c,i} - T_m} \left(\frac{PD}{h} + \frac{RD^2}{ks} \right) \quad (1.1)$$

En donde, L_f es calor latente de fusión ($^{\circ}\text{C}$), $T_{c,i}$ es la temperatura inicial de congelación de un alimento ($^{\circ}\text{C}$), T_m es la temperatura del medio de congelación ($^{\circ}\text{C}$), D es el espesor o diámetro del medio (m), h es el coeficiente de transferencia de calor convectivo ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$), ks es la conductividad térmica del alimento congelado (W/mK) y P y R son los factores geométricos, como se muestran en la Tabla 1.4:

Tabla 1. 4. Factor geométrico utilizado para la ecuación de Plank (Esteban-Valdez, 2018)

Factor geométrico	P	R
Capa infinita	1/2	1/8
Esfera	1/16	1/24
Cilindro	1/4	1/16

Además, para calcular el tiempo de congelación se debe determinar los parámetros físicos, es decir, las propiedades térmicas de los alimentos y factores ambientales. En las propiedades térmicas engloba lo que es la entalpía, calor específico, densidad y conductividad térmica, sin embargo, en estas propiedades son en función de la temperatura y en consecuencia hacen un cambio alrededor del punto de congelación. En cuanto a los factores ambientales son la temperatura ambiental y el coeficiente de transferencia de calor (Zempoalteca-Apango, 2024).

1.4.6 Punto de congelación de una solución

Inicialmente aparecen cristales de hielo puro, conocida como temperatura inicial de congelación. Luego se forman cristales de soluto más agua en cierta concentración llamada eutéctica, relacionada con la formación de cristales durante la congelación y que puede variar según la composición. La formación de cristales eutécticos depende de la temperatura y de las propiedades químicas de los componentes del alimento. Es importante tener en cuenta que la presencia de cristales de eutéctica puede afectar la calidad de los alimentos congelados, ya que pueden alterar la textura y el sabor del producto final. (Orrego, 2003).

Por otra parte, una disolución diluida ideal es la que una partícula de soluto se encuentra rodeada de partículas de disolvente donde interaccionan con partículas de disolvente, debido a la dilución. En una disolución ideal, el soluto cumple la Ley de Henry y el disolvente la ley de Raoult. Cuando en estas propiedades coligativas en disoluciones con electrolitos fuertes, dan como resultado a la formación de pares iónicos, formados por uno o más cationes y uno o más aniones unidos temporalmente entre si debido a las fuerzas electroestáticas entre iones de carga

opuesta. Esta unión hace que disminuya el número total de partículas en disolución, es decir, la adición de un disolvente a temperatura y presión constante trae una disminución del potencial químico del disolvente modificando su presión de vapor, punto de ebullición y punto de congelación (Moreiras, 2020).

1.4.7 Propiedades térmicas en alimentos

El proceso de congelación depende de las propiedades térmicas del alimento, debido a la cantidad de agua presente y, la influencia del punto triple del agua, por lo que, las propiedades del producto alimentario cambian de forma proporcional al contenido de agua. A medida que el agua dentro del producto cambia de líquido a sólido, tanto la densidad, conductividad, contenido de energía (entalpía) y calor específico aparente del producto cambiarán gradualmente a medida que aumenta o disminuye la temperatura (Singh y Heldman, 2009).

La densidad de las partículas individuales de alimentos es con respecto a volumen a partir de la estructura de las partículas. En donde la densidad de partículas se predice a partir:

$$\rho = \rho_s e_{so} + \rho_a e_a \quad (1.2)$$

En donde ρ_a es la fase gaseosa se obtiene a partir de tablas de propiedades de agua (kg/m^3), ρ_s es la densidad de la partícula del sólido (kg/m^3), e_{so} es el volumen de fracción sólido y e_a es la fase gaseosa o aire. El cambio gradual de densidad se debe al cambio gradual en la proporción de agua congelada en función de la temperatura. La magnitud del cambio en la densidad es proporcional al contenido de humedad del producto.

El calor específico a presión constante (C_p) se emplea en aplicaciones de calentamiento y enfriamiento de alimentos, representando la energía en forma de calor que un sistema gana o pierde por unidad de masa para cambiar la temperatura sin cambios de estado. Es importante en el análisis térmico de procesamiento de alimentos. En los alimentos depende de sus componentes, contenido de humedad, temperatura y presión, aumentando con el contenido hídrico.

$$C_p = \frac{Q}{m(\Delta T)} \quad (1.3)$$

Donde Q es el calor ganado o perdido (kJ), m es la masa (kg), ΔT es el cambio de temperatura en el material ($^{\circ}\text{C}$) y C_p es el calor específico (kJ/kg $^{\circ}\text{C}$). El diseño de equipo para el procesamiento de alimentos se requiere valores numéricos de C_p tanto para los alimentos como los materiales.

Existen formas de obtenerlos como el uso de tablas de C_p de los componentes de alimentos y no alimentos. También mediante de ecuaciones predictivas, permitiendo ajustar datos experimentales a modelos matemáticos. Uno de los modelos para calcular C_p , citado por Singh y Heldman (2006) donde propuso Siebel (1892) donde:

$$C_p = 0.837 + 3.349 X_w \quad (1.4)$$

En donde X_w es la cantidad de agua contenida expresada como fracción. En donde este no muestra el efecto de la temperatura u otros componentes, se ve influenciado en los componentes de productos mediante la ecuación citada por Singh y Heldman (2006), donde propuso Charm (1978) dado que:

$$C_p = 2.093 X_f + 1.256 X_s + 4.187 X_w \quad (1.5)$$

En donde X es la fracción masa y los subíndices representan que, f es grasas, s son sólidos no grasos y w es contenido de agua.

Para la ecuación basada en los componentes de un alimento, se da que:

$$C_p = 1.424 X_h + 1.549 X_p + 1.675 X_f + 1.675 X_a + 4.187 X_w \quad (1.6)$$

En donde X es la fracción masa, en donde, cada subíndice son h para carbohidratos, p son para proteínas, f para lípidos, a para cenizas y w para humedad.

A partir de estas ecuaciones, no hay dependencia de temperatura, sin embargo, donde la temperatura cambia, se emplean modelos predictivos de calor específico que incluyen la dependencia de temperatura. De acuerdo de Singh y Heldman

(2009), mencionan que, Choi y Okos (1986) presentaron un modelo integral que permitió predecir el calor específico basándose en la composición y la temperatura:

$$C_p = \sum_{i=1}^n k_i Y_i \quad (1.7)$$

En donde, X_i es la fracción de i th del componente, n es el número total de los componentes en un alimento y C_{pi} es el calor específico de i th de cada componente como una función de la temperatura.

La conductividad térmica mide la transferencia de calor en los alimentos. Representan la cantidad de calor que se conduce por unidad de tiempo a través de una unidad de espesor. Los alimentos húmedos se aproximan más a la conductividad térmica del agua. Los valores se obtienen mediante tablas o ecuaciones empíricas predictivas que permiten procesos de variación térmica. Para las frutas y vegetales con un contenido de humedad mayor a 60%, Singh y Heldman (2009), siguen la ecuación propuesta por Sweat (1974) se da:

$$k = 0.148 + 0.493 X_w \quad (1.8)$$

En donde, k es la conductividad térmica (W/m°C) y X_w es el contenido de agua expresada en fracción.

Otra ecuación empírica del mismo autor, es el ajuste del conjunto de datos para sólidos y líquidos.

$$k = 0.25X_h + 0.155 X_p + 0.16 X_f + 0.135 X_a + 0.58 X_w \quad (1.9)$$

En donde, X es la fracción masa y cada subíndice son representados de la misma manera que la ecuación (1.6).

Estas ecuaciones son valores de la conductividad térmica de los componentes puros. Sin embargo, no se encuentran en función de la temperatura, citado por Singh y Heldman (2006), los autores Choi y Oikos (1986) dieron la siguiente expresión en función de la composición del alimento y la temperatura:

$$k = \sum_{i=1}^n k_i Y_i \quad (1.10)$$

En donde el alimento tiene n componentes, k_i es la conductividad en i th componentes, Y_i es el volumen fracción de i th de los componentes, obteniendo:

$$Y_i = \frac{\frac{X_i}{\rho_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{X_i}{\rho_i}} \quad (1.11)$$

Donde X_i es la fracción de peso ρ_i es la densidad (Kg/m^3) del i th componente.

Es una relación que involucra conductividad térmica, densidad y el calor específico, en donde se expresa de la siguiente manera:

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} = \frac{m^2}{s} \quad (1.12)$$

La difusividad se puede calcular sustituyendo los valores de conductividad térmica, densidad y calor específico a partir de tablas donde proporciona valores de temperatura térmica determinados experimentalmente, en donde Choi y Okos (1986) proponen la siguiente ecuación predictiva a partir de la sustitución de las variables correspondientes:

$$\alpha = \sum_{i=1}^n \alpha_i X_i \quad (1.13)$$

En donde n es el número de componentes, α_i es la difusividad térmica de i th componentes y X_i es la fracción masa de cada componente, en donde los valores obtenidos se emplean en la Tabla 1.5.

Son modelos matemáticos que permiten predecir propiedades termofísicas de alimentos, basado en la composición del alimento, considerando fracción en peso de sus componentes principales: Agua, proteínas, grasas, carbohidratos y cenizas. Estos modelos fueron desarrollados en un rango de temperatura de -40°C hasta 150°C .

Las propiedades térmicas influyen en la transferencia de calor. Es necesario para el cálculo y diseño de procesos con respecto a la calidad del producto, sobre todo aplicadas en frutas y vegetales para estimar la cantidad de calor requerido en los procesos: Escaldado, pasteurización, evaporación, fritura, refrigeración,

congelación, esterilización, secado, entre otras, en donde hay intercambio de energía y masa (Alvis *et al.* 2011).

Tabla 1. 5. Coeficientes para estimar propiedades térmicas de los alimentos (Choi y Okos, 1986, dados por Singh y Heldman, 2009).

Property	Component	Temperature function	Standard error	Standard % error
k (W/m°C)	Protein	$k = 1.7881 \times 10^{-1} + 1.1958 \times 10^{-3}T - 2.7178 \times 10^{-6}T^2$	0.012	5.91
	Fat	$k = 1.8071 \times 10^{-1} - 2.7604 \times 10^{-3}T - 1.7749 \times 10^{-7}T^2$	0.0032	1.95
	Carbohydrate	$k = 2.0141 \times 10^{-1} + 1.3874 \times 10^{-3}T - 4.3312 \times 10^{-6}T^2$	0.0134	5.42
	Fiber	$k = 1.8331 \times 10^{-1} + 1.2497 \times 10^{-3}T - 3.1683 \times 10^{-6}T^2$	0.0127	5.55
	Ash	$k = 3.2962 \times 10^{-1} + 1.4011 \times 10^{-3}T - 2.9069 \times 10^{-6}T^2$	0.0083	2.15
	Water	$k = 5.7109 \times 10^{-1} + 1.7625 \times 10^{-3}T - 6.7036 \times 10^{-6}T^2$	0.0028	0.45
	Ice	$k = 2.2196 - 6.2489 \times 10^{-3}T + 1.0154 \times 10^{-4}T^2$	0.0079	0.79
α (mm ² /s)	Protein	$\alpha = 6.8714 \times 10^{-2} + 4.7578 \times 10^{-4}T - 1.4646 \times 10^{-6}T^2$	0.0038	4.50
	Fat	$\alpha = 9.8777 \times 10^{-2} - 1.2569 \times 10^{-4}T - 3.8286 \times 10^{-8}T^2$	0.0020	2.15
	Carbohydrate	$\alpha = 8.0842 \times 10^{-2} + 5.3052 \times 10^{-4}T - 2.3218 \times 10^{-6}T^2$	0.0058	5.84
	Fiber	$\alpha = 7.3976 \times 10^{-2} + 5.1902 \times 10^{-4}T - 2.2202 \times 10^{-6}T^2$	0.0026	3.14
	Ash	$\alpha = 1.2461 \times 10^{-1} + 3.7321 \times 10^{-4}T - 1.2244 \times 10^{-6}T^2$	0.0022	1.61
	Water	$\alpha = 1.3168 \times 10^{-1} + 6.2477 \times 10^{-4}T - 2.4022 \times 10^{-6}T^2$	0.0022×10^{-6}	1.44
	Ice	$\alpha = 1.1756 - 6.0833 \times 10^{-3}T + 9.5037 \times 10^{-5}T^2$	0.0044×10^{-6}	0.33
ρ (kg/m ³)	Protein	$\rho = 1.3299 \times 10^3 - 5.1840 \times 10^{-1}T$	39.9501	3.07
	Fat	$\rho = 9.2559 \times 10^2 - 4.1757 \times 10^{-1}T$	4.2554	0.47
	Carbohydrate	$\rho = 1.5991 \times 10^3 - 3.1046 \times 10^{-1}T$	93.1249	5.98
	Fiber	$\rho = 1.3115 \times 10^3 - 3.6589 \times 10^{-1}T$	8.2687	0.64
	Ash	$\rho = 2.4238 \times 10^3 - 2.8063 \times 10^{-1}T$	2.2315	0.09
	Water	$\rho = 9.9718 \times 10^2 + 3.1439 \times 10^{-3}T - 3.7574 \times 10^{-3}T^2$	2.1044	0.22
	Ice	$\rho = 9.1689 \times 10^2 - 1.3071 \times 10^{-1}T$	0.5382	0.06
c_p (kJ/kg°C)	Protein	$c_p = 2.0082 + 1.2089 \times 10^{-3}T - 1.3129 \times 10^{-6}T^2$	0.1147	5.57
	Fat	$c_p = 1.9842 + 1.4733 \times 10^{-3}T - 4.8008 \times 10^{-6}T^2$	0.0236	1.16
	Carbohydrate	$c_p = 1.5488 + 1.9625 \times 10^{-3}T - 5.9399 \times 10^{-6}T^2$	0.0986	5.96
	Fiber	$c_p = 1.8459 + 1.8306 \times 10^{-3}T - 4.6509 \times 10^{-6}T^2$	0.0293	1.66
	Ash	$c_p = 1.0926 + 1.8896 \times 10^{-3}T - 3.6817 \times 10^{-6}T^2$	0.0296	2.47
	Water ^a	$c_p = 4.0817 - 5.3062 \times 10^{-3}T + 9.9516 \times 10^{-4}T^2$	0.0988	2.15
	Water ^b	$c_p = 4.1762 - 9.0864 \times 10^{-5}T + 5.4731 \times 10^{-6}T^2$	0.0159	0.38
	Ice	$c_p = 2.0623 + 6.0769 \times 10^{-3}T$	0.0014	0.07

1.5 Intercambiadores de calor

La transferencia de energía térmica ocurre de manera natural entre materiales a diferentes temperaturas. Puede ser por conducción, convección o radiación. La conducción es el paso de energía entre partículas adyacentes en contacto, ocurre principalmente en sólidos y líquidos. La convección implica movimiento de fluidos adyacentes a un sólido, mientras que la radiación es por ondas electromagnéticas sin necesidad de un medio (Cengel, 2007).

Los intercambiadores de calor se pueden clasificar dependiendo el tipo de contacto que tenga con el alimento que calienta o enfría. Existen intercambiadores de contacto directo, lo que permite una transferencia más eficiente. Por otro lado, existen intercambiadores de contacto indirecto, en los que los fluidos no están en contacto directo, sino se encuentran separados por una pared donde hay transferencia de calor. La Figura 1.8 presenta ejemplos de intercambiadores de

calor como placas, tubos, tanques de enfriamiento de inmersión. La selección del equipo dependerá de la aplicación y propiedades de los fluidos involucrados, considerando sus características físicas y químicas para evitar reacciones no deseadas o contaminación.

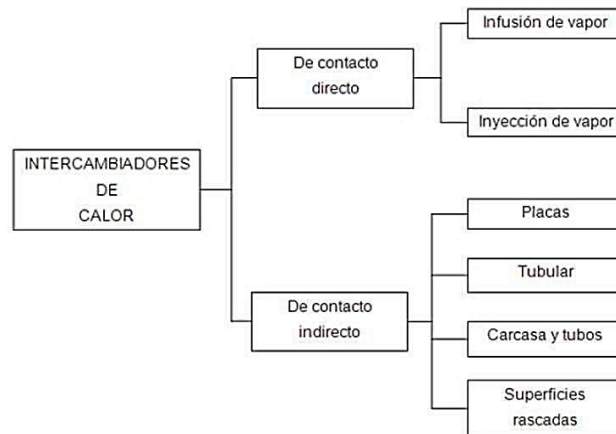


Figura 1. 8. Diagrama de los tipos de intercambiadores (Orrego, 2003).

1.5.1 Tipos de intercambiador

Existe un flujo paralelo cuando el flujo interno o de los tubos y el flujo externo o de la carcasa ambos fluyen en la misma dirección. Para este caso, ambos fluidos entran al intercambiador en el mismo extremo y presentan una diferencia de temperatura. Como el calor se transfiere del fluido de mayor temperatura hacia el fluido de menor temperatura, cuando se aproximan una con la otra, disminuye su temperatura y el otro aumenta tratando de alcanzar el equilibrio térmico (Jaramillo 2007).

Hay un contraflujo cuando los dos fluidos fluyen a la misma dirección, pero en sentido opuesto, es decir, cada uno de los flujos entran al intercambiador por diferentes extremos. El de menor temperatura sale en contraflujo en el extremo donde entra el fluido de mayor temperatura, la temperatura del fluido más frío se aproximará a la temperatura del fluido de entrada (Jaramillo 2007).

En el intercambiador de calor de flujo cruzado, uno de los fluidos fluye de manera perpendicular al otro fluido, es decir, uno de los flujos pasa a través de tubos mientras que el otro pasa alrededor de estos tubos formando un ángulo de 90° . Son

usados para la presencia de cambio de fase y, por lo tanto, se tiene un fluido pasado por el intercambiador en dos fases bifásicos (Jaramillo, 2007).

1.5.2 Sistema termoelectrico

Los sistemas termoelectricos muestran una excelente eficiencia en el aumento de temperatura. Mientras que sus aplicaciones son limitadas, pueden usarse potencialmente en sistemas de compresión de vapor. Se estudia fenómenos en los que intervienen el calor y la electricidad, se conoce por electricidad generada por la aplicación de calor en la unión de dos materiales diferentes. Consiste a partir de la unión de dos alambres de distinto material (circuito llamado termopar), y una de las uniones se mantiene a una temperatura superior a la otra, ocurre una diferencia de tensión que hace fluir una corriente eléctrica entre las uniones caliente y fría, esto se conoce como el efecto Seebeck (Ángeles y Márquez, 2005 ; Cantero *et al.*, 2018).

Los refrigerantes termoelectricos funcionamiento silencioso, relativamente liviano, capaz de proporcionar un calentamiento rápido y enfriamiento, además de realizar un control preciso de la temperatura. Además, tiene una refrigeración mucho más flexible (Mao *et. al.* 2020).

En la creación de una unidad de refrigeración termoelectrica, se construye un sistema que comprende de un bloque de metal de alta conductividad térmica, como una aleación de aluminio con un disipador térmico con aletas. El bloque de metal funciona para enfriar el lado frío. El espesor del bloque permite que haya unión térmica con la placa fría del elemento Peltier. El disipador térmico está conectado al lado opuesto del elemento Peltier, para disipar el calor extraído en el ambiente. Además, el elemento está rodeado de una capa delgada de grasa térmica u otro material de interfaz térmica que permite una mejor transferencia (Smoot, 2018).

En la Tabla 1.6, se presentan algunos estudios en los que se aplicaron estos efectos en sistemas termoelectricos bajo distintas condiciones. Estos estudios profundizan en el análisis y funcionamiento proporcionando una compresión detallada en diversos escenarios.

Tabla 1. 6. Aplicaciones en diferentes efectos en sistemas termoelectricos

Referencias	Sistema termoelectrico	Condiciones	¿Qué obtienen?
Shafei <i>et al.</i> (2016).	Efectos Peltier y Seebeck en sistema de aire acondicionado	Evaluaron la eficacia del sistema TEM bajo efecto Peltier y Seebeck, para volúmenes específicos: 1, 4 y $9 \times 10^3 \text{ cm}^3$. determinó el voltaje en 10 min	$T_{\text{enfriamiento}}$ constante y $T_{\text{calentamiento}}$ entre 16 y 40°C , donde el voltaje generado alcanzó aprox. 12V en 30 min.
Chen y Chen (1996).	Efecto Thomson en rendimiento de un enfriador TEM con simulación numérica tridimensional	Evalúan rendimiento de enfriadores (TEC) en miniatura en microprocesadores y equipos pequeños con simulaciones numéricas tridimensionales. Analizan tres módulos TEC de enfriamiento considerando ΔT de 0 y 10 K. Módulos con 8, 20 y 40 pares TEC examinaron la escala y efecto Thomson en enfriamiento.	La potencia creció significativamente, indicando que los TEC miniatura son adecuados para alto rendimiento de enfriamiento. En cuanto a la potencia del módulo mejoró entre 5-7% al considerar el efecto Thomson.

1.5.3 Efecto Seebeck, Joule y Thomson

Este efecto fue descubierto por Thomas Johann Seebeck (1770-1831) al unir de extremo a extremo dos barras de diferente metal en un lazo cerrado y, en unión más caliente que la otra, generando una corriente eléctrica en el circuito como se observa en la Figura 1.9. El arreglo mencionado es conocido como termopar y la magnitud de tensión termoelectrica es proporcional a la diferencia entre la temperatura en la unión del termopar y la de las conexiones al medidor. (Ramírez-López, 2010)

El coeficiente Seebeck es un indicador que sirve para identificar a los materiales termoelectricos que permiten cuantificar la corriente eléctrica que se produce entre los extremos de un material a diferentes temperaturas. Como resultado, un metal se comportará como positivo y el otro negativo, creando así, una corriente de electrones, es decir, una corriente eléctrica. (Yu y Logvinov, 2007).

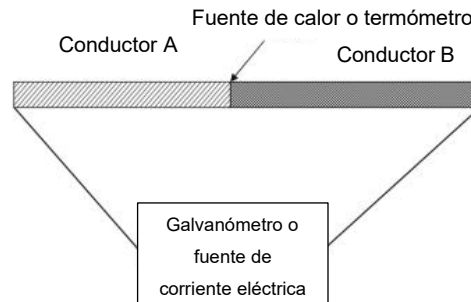


Figura 1. 9. Diagrama del efecto Seebeck (Yu y Logvinov, 2007)

En el caso del efecto Joule, es un fenómeno físico que ocurre cuando una corriente pasa a través de un material conductor y se convierte en calor. Sucede que cuando los electrones chocan con los átomos del conductor, causan una resistencia al flujo de corriente. Esta resistencia se transforma en energía térmica, por lo que aumenta la temperatura del conductor. Es también conocido como calentamiento resistivo. Este fenómeno se utiliza ampliamente en aplicaciones como la soldadura de metales o en cirugías sin sangrado. Debe cumplir dos factores importantes: el material debe ser tanto conductor eléctrico como térmico. Este efecto se emplea para calentar externamente un material y, la corriente eléctrica la potencia necesaria para activarlo, como en el caso de un material autorreparable, depende de la energía necesaria para alcanzar la energía de activación requerida. El efecto suele estar presente en materiales compuestos con relleno macro, fibras, alambres y películas. (Orellana *et al.*, 2021).

El efecto Thomson consiste en el paso de la corriente eléctrica en un sistema térmico en donde la existencia del gradiente de temperatura surge una fuente volumétrica de calor adicional a la fuente de calor de Joule. Este efecto depende de un proceso en la generación de fuerza electromotriz o el enfriamiento termoeléctrico. Otra manera de describir este efecto es la generación térmica de FEM (fuerza termo electromotriz), es un efecto termoeléctrico y cuadrático en el diferencial de temperatura entre el lado caliente y el lado frío, debido a que la corriente eléctrica es proporcional a ella (Logvinov *et al.*, 2007). Este efecto se puede observar en la Figura 1.10, apreciando el funcionamiento de este efecto a través de una corriente eléctrica.

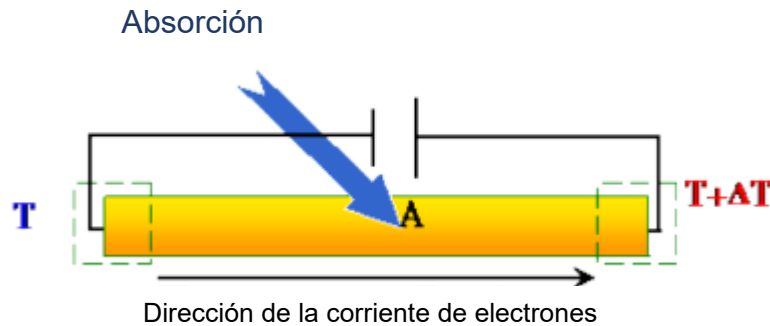


Figura 1. 10. Diagrama del efecto Thomson. Consiste en electricidad pasa a través del gradiente de temperatura a lo largo de su longitud donde el calor es absorbido o expulsado a lo largo de la corriente (Thakkar, 2016).

1.5.4 Efecto Peltier

El efecto Peltier es la absorción de calor y evolución (además del calor en Joule) en la unión de dos conductores a través de los cuales pasa una corriente continua en donde circula la corriente eléctrica. Esta absorción de calor y evolución depende de la corriente eléctrica por unidad de tiempo. De acuerdo con Yu y Logvinov (2007) mencionan al efecto Peltier como la corriente eléctrica que pasa por un circuito bimetalico que se mantiene a una temperatura uniforme generando calor en una unión mientras se absorbe en otra. Esto ocurre porque una corriente en el metal también lleva consigo una corriente térmica y, se representa como $\vec{j}^q = \Pi \vec{j}$ como se observa en la Figura 1.11 donde j es la densidad de corriente eléctrica (A/m^2). Dado que la corriente eléctrica es constante en el circuito cerrado varían de un metal a otro, las corrientes térmicas en ambos metales no son iguales. Por lo tanto, la diferencia de calor debe generarse en una unión y transferirse a la otra para mantener una temperatura uniforme.

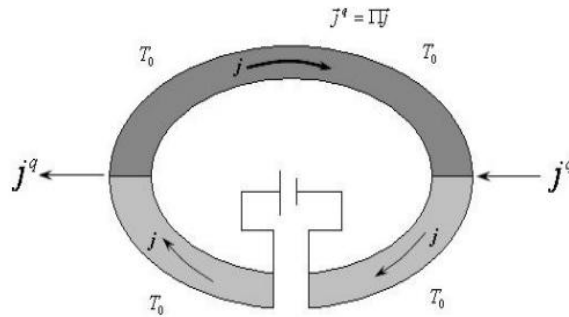


Figura 1. 11. Efecto Peltier (Yu y Logvinov, 2007)

Los módulos termoelectrónicos usan variaciones en los niveles de energía de electrones que proporcionan la transferencia de calor. La energía es conducida entre el bajo nivel de energía de semiconductor tipo P y el alto nivel de energía de semiconductor tipo N de la superficie fría y la superficie caliente. El módulo de Peltier está hecho por una serie de conexiones de tipo P y N, en donde se produce una corriente eléctrica a través de dos diferentes tipos de metales semiconductores. Consiste en la corriente empieza a transferir calor de un lado a otro; el lado frío del módulo de Peltier puede ser usado como un congelador mientras que del otro lado continúa calentándose. Es necesario enfriar el lado caliente para evitar riesgos de daño del sistema, por otro lado, el Peltier debe combinarse con un refrigerador como un disipador de calor o refrigeración por agua para disipar el calor del lado caliente para una operación efectiva (Fairuz *et al.*, 2020).

1.5.5 Celda Peltier

Dispositivos compuestos por semiconductores colocados sobre una superficie de cerámica. En la Figura 1.12, se muestra la celda, con una serie de semiconductores unidos entre sí por un metal conductor, en donde hay una conversión de energía calórica en eléctrica o viceversa, más apreciable. Al aplicar una corriente continua en una celda Peltier, los electrones pasan a través de los semiconductores, esto quiere decir que cuando un electrón pasa de un material positivo (tipo P) a uno negativo (tipo N), pasa del nivel energético inferior a otro superior, al absorber energía y, por lo tanto, calor. La energía absorbida se deposita en el lado contrario en donde hay disipación de calor, esto ocurre con los demás semiconductores.

También ocurre si se cambia el sentido de la corriente, produce un cambio en la circulación de los electrones en la producción de calor.



Figura 1. 12. Estructura de la celda Peltier (Del Campo, 2022).

El enfriador termoelectrico (TEC) o módulo termoelectrico (TEM), es un dispositivo arreglado por pares termoelectricos (semiconductores de tipo N y P) colocados eléctrica y térmicamente iguales. Estos semiconductores se insertan en placas de cerámica. Los materiales semiconductores termoelectricos se utilizan en refrigeradores con aleaciones de telururo de bismuto. Los pares de semiconductores N y P se colocan de manera que se acoplan eléctricamente en serie. Las placas de cerámica exhiben integridad mecánica y actúan como aislantes eléctricos para superficies frías y calientes. Las placas también ofrecen conductividad térmica para la transferencia de calor. En los extremos de dos conductores, se genera un cambio de temperatura a través de las intersecciones de semiconductores debido al flujo de corriente (Afshari, 2020).

Se utilizan comúnmente en aplicaciones donde el lado frío del módulo TEC se coloca sobre un objeto a enfriar con un disipador de calor en el lado caliente para mejorarlo. Sin embargo, si el disipador de calor y el objeto a enfriar están unidos a las placas de cerámica sin ninguna estructura mecánica de soporte, ocurren fuerzas de tensión o corte a través del módulo TEC. Estos módulos no están diseñados para soportar este tipo de cargas, estas fuerzas podrían romper el módulo o provocar

fallas mecánicas. Es por ello que se sujetan entre el objeto y un disipador de calor debido a la capacidad de un módulo Peltier para soportar grandes fuerzas de compresión de las abrazaderas, estas pueden absorber cualquier fuerza de corte o tensión del objeto y del disipador de calor. Estos módulos tienen aplicaciones en las que el lado frío del módulo TEC se coloca sobre un objeto mientras que el disipador de calor en el lado caliente permite retirar el calor. Sin embargo, si el disipador térmico y el objeto a enfriar están unidos a las placas de cerámica sin ninguna estructura mecánica de soporte, podría producir grandes fuerzas de cizallamiento o tensión en el módulo y, como consecuencia, puede romper el módulo o provocar algún fallo mecánico (Smoot, 2020).

1.6 Espectrofotometría

La decisión de utilizar pruebas analíticas permite la seguridad de las decisiones y detectar rápidamente cualquier interacción en la composición de los mismos. La espectrofotometría es un método que basa entre la absorción de luz por parte de un compuesto y su concentración. Cuando incide luz monocromática sobre un medio homogéneo, una parte de luz incidente es absorbida por el medio y otra transmitida. Dependiendo del compuesto⁶³ y tipo de absorción medida, puede estar en estado sólido, líquido o gaseoso. Como se muestra en la Figura 1.13, cada sustancia tiene su propio espectro de absorción, es una curva que muestra la cantidad de energía radiante absorbida, es decir, absorbancia por determinada longitud de onda radiante, en donde cada sustancia absorbe cantidad de radiación que es distinta a la que absorbe otro compuesto (Díaz *et al.*, 2010)

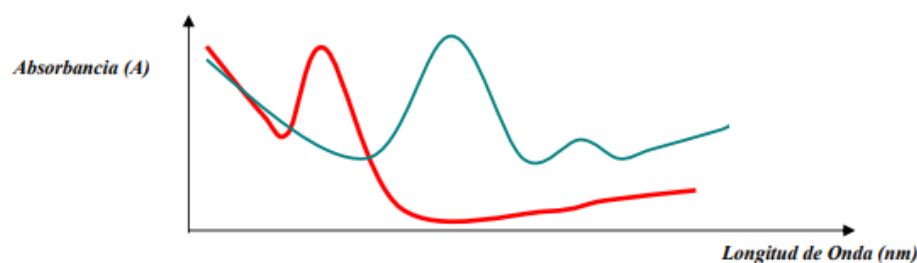


Figura 1.13. Longitud de onda y absorbancia (Rochenszwalb y Figueroa, 2023).

1.6.1 Espectro infrarrojo

La espectroscopía infrarroja (IR), también conocida como infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) tiene un amplio rango de aplicaciones, es decir, en el análisis de pequeñas moléculas o complejos moleculares hasta un análisis de células o tejidos. Es utilizado para el mapeo de componentes celulares (carbohidratos, lípidos proteínas) para identificar células anormales. Los grupos funcionales pueden asociarse con características bandas de absorción infrarroja, correspondiendo a las vibraciones fundamentales de estos (Bethomieu y Hienerisadel, 2009).

En el espectro electromagnético, la región IR se encuentra entre $12800\text{--}10\text{ cm}^{-1}$. En las aplicaciones como de los aparatos, se divide en tres zonas: IR cercano (NIR): $12800\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$, IR medio (MIR): $4000\text{--}400\text{ cm}^{-1}$; IR lejano (FIR): $400\text{--}10\text{ cm}^{-1}$, siendo el IR medio donde se concentran la mayoría de las aplicaciones analíticas tradicionales (Figura 1.14). VIS es a lo que se llama el espectro visible, siendo la parte del espectro electromagnético que el ojo humano puede percibir, el NIR requiere preparación de muestras para ofrecer un análisis cuantitativo sin consumir o destruir la muestra. Es utilizado para el análisis de compuestos orgánicos e inorgánicos que contengan átomos pesados, es decir, masa atómica superior a 19 y proporcionar datos en estudios estructurales (Serrano, 2009).

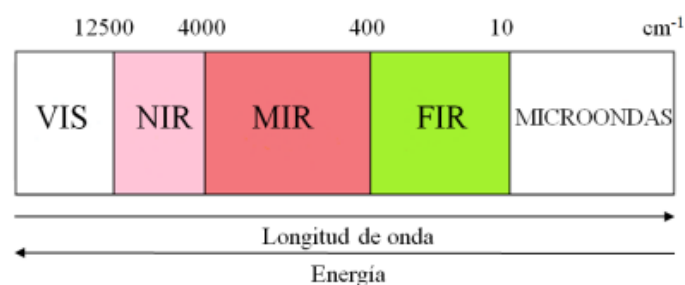


Figura 1. 14. Regiones espectrales de infrarrojo (Téllez, 2019)

Las aplicaciones de la espectroscopia del infrarrojo medio (IMR) en la industria alimentaria es amplio, pero al mismo tiempo son limitadas, debido a las fuertes absorciones de agua que interfiere en la determinación de otros componentes presentes. Un desarrollo crítico en la instrumentación MIR en su aplicación a

estructuras y compuestos biológicos complejos ha hecho aparición de técnicas para muestras, como la obtención de los compuestos en alimentos en estado líquido (Downey, 1998; Karoui *et al.*, 2010).

La espectroscopia MIR reconoce sustancias químicas de alimentos líquidos basados en el hecho de que las moléculas absorben frecuencias que son característicos en su estructura. Cada enlace químico tiene una molécula con energía vibratoria que indica una “huella digital” para determinar su estructura (Wen-Hao y Da-Wen, 2019).

Para la interpretación del análisis de FTIR: Primero, es la identificación de bandas de absorción en todo el espectro IR. Si la muestra tiene un espectro simple, es decir, hay menos de 5 bandas de absorción, los compuestos analizados son compuestos orgánicos simples, pero si tiene más de 5 bandas de absorción, la muestra puede ser un complejo de molécula. Segundo, identificar el área de enlace simple ($2500-4000\text{ cm}^{-1}$). Dependiendo del área y el tamaño de los picos para identificar la presencia de hidratos, hidroxilo, compuestos fenólicos, etc. Para el tercer paso es la identificación del área de triple enlace ($2000-2500\text{ cm}^{-1}$) en donde el pico suele ir seguido de la presencia de espectros adicionales a frecuencias $1600-1300$, $1200-1000$ y $800-600\text{ cm}^{-1}$. En el cuarto paso, es identificar el área de enlace doble ($1500-2000\text{ cm}^{-1}$). En esta región puede ser grupo carbonilo ($\text{C}=\text{O}$), amina ($\text{C}=\text{N}$) y azo ($\text{N}=\text{N}$). Finalmente, el último paso es la identificación de la región de la huella digital ($600-1500\text{ cm}^{-1}$). Esta área es específica y única, a partir de una tabla, con los grupos funcionales, en la longitud de onda y la intensidad del pico en la que se encuentran permite que haya una facilidad en identificar. Como se muestra en la Figura 1.15, se aprecia un diagrama con sus respectivas áreas con los grupos funcionales presentes por su tipo de enlace (Dani *et al.*, 2019).

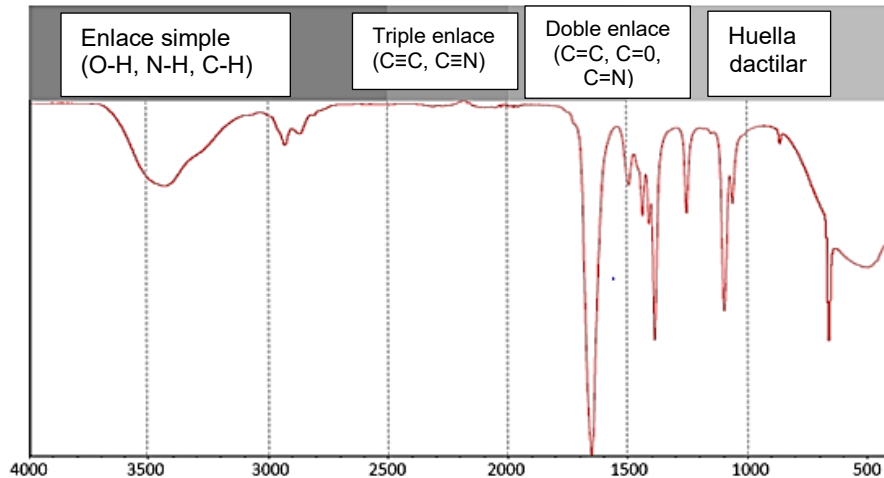


Figura 1.15. Espectro MIR en diferentes regiones mostrando los grupos funcionales de cada área (Dani *et al.*, 2019)

1.6.2 FT-IR en alimentos

Se ha utilizado como método el análisis en diferentes productos alimenticios, desde leche hasta el vino, así como cereales hasta carne. Esto es debido a la amplia gama de alimentos con diferentes características y propiedades, es por ello que, para obtener resultados precisos y confiables es en análisis en espectroscopia IR (Valeriy *et al.* 2016).

En el análisis FTIR, las bandas de absorción características están asociadas principalmente compuestos por grasas, proteínas, carbohidratos y humedad, permitiendo el crecimiento obtenido en el espectro. En las bandas de absorción está presente el agua que absorbe fuertemente el espectro IR, siendo proporcional del espectro para revelar absorciones residuales debido a otros componentes (Van de Voort, 1992).

En la industria alimentaria, la importancia en la autenticación de productos es importante para las agencias reguladoras, los minoristas y los consumidores porque los ingredientes costosos tienen el potencial de adulteración y etiquetado incorrecto sea fraudulento o accidental. Es por ello, que el uso de FTIR se ha explorado en los últimos años. Combinando FT-NIR y FT-MIR con métodos estadísticos multivariados ha permitido la autenticación de productos a base de hierbas, jugos de frutas, productos agrícolas, aceites, comestibles, lácteos y otros productos. Con

esfuerzo se, se ha tenido diversos grados de éxito en cuanto a la clasificación de productos auténticos o no auténticos según la región del espectro electromagnético, empleando técnicas quimiométricas utilizadas en los espectros (Rodríguez-Saona y Allendorf, 2011).

1.7 Diseño de experimentos

El diseño experimental es la técnica que consiste en realizar una serie de experimentos en donde inducen a cambios deliberados en las variables de un proceso, que permite observar e identificar las causas de los cambios de respuesta de salida. No sólo permite mejorar y optimizar procesos de productos sino en la realización de los modelos o diseño para efectuar el experimento y el análisis de datos. (Ilzaribe *et al.*, 2007)

Este puede presentarse en diferentes métodos para obtener valores experimentales como teóricos, que permiten corroborar hipótesis, ya sea por varianza, bloques, al azar o por regresión lineal y no lineal. Estas regresiones se basan en la estimación de parámetros para dos o más variables mediante el ajuste de curva.

Los modelos de regresión lineal son considerados aproximaciones en diversas aplicaciones de regresión empleando ecuaciones para encontrar las mejores estimaciones de parámetros y cuantificar precisión de los mismos. En el caso de la regresión lineal, la solución es única y el método es exacto, mientras que la regresión no lineal debe ser aproximada y el método es iterativo. Para la estimación de parámetros de un modelo de regresión no lineal se usa mediante el método de mínimos cuadrados o el método de máxima verosimilitud. Esto permite el uso de procedimientos de estimación, requiriendo cálculos más complejos. Por lo tanto, el análisis para los modelos de regresión no lineal se lleva a cabo mediante software (Novales, 2010).

1.8 Antecedentes

Duchitanga-Torres (2018). Evaluó la capacidad antioxidante (CA) en pulpa fresca, congelada y liofilizada del tomate de árbol (*Solanum betaceum*), babaco (*Carica pentagona*) y tomate riñón (*Solanum lycopersicum*) mediante el método DPPH.

Demostó que el proceso de congelación y liofilización afecta la CA, dependiendo del tipo de fruta y proceso. Así, concluyó el babaco es la fruta con mayor CA en fresco, el tomate de árbol en congelación y el tomate riñón en el de liofilización. El proceso de liofilización afecta menos la capacidad antioxidante de estos alimentos que la congelación.

Kumar *et al.* (2018). Implementaron a partir del módulo de Peltier en un sistema de refrigeración impulsado por una fuente de corriente continua apoyado de un banco de batería. Consistió del módulo termoelectrico, cámara de refrigeración, batería, panel solar y transformador de control. Concluyeron que a través de un compresor y un refrigerante permite enfriar el sistema, permitiendo la efectividad de acondicionar ambientes fríos y calientes.

Lee-Hoon *et al.* (2018). Determinó el contenido de fenoles totales, flavonoides y propiedades antioxidantes captando 2,2-difenil-1-picrilhidrazilo (DPPH) y reducción férrica de potencial antioxidante de polvo de cáscara de sandía roja secados a 40 y 60°C obtenidos por liofilización. Los extractos que utilizaron fueron agua, metanol, etanol y acetona. Hicieron comparativa de cada uno y observaron que el extracto de metanol tiene mayor actividad antioxidante a comparación de los otros compuestos.

Asyiquin *et al.* (2019). Realizaron un estudio sobre el desarrollo de mini refrigeradores utilizando un sistema termoelectrico basado en celdas Peltier para mejorar la funcionalidad y, a partir de un microcontrolador Arduino UNO para controlar la temperatura. El Arduino UNO se utilizó para programar y gestionar las funciones del sistema, empleando un software especializado (Arduino GENUINO) para ajustar la temperatura de enfriamiento. Demostraron que el sistema desarrollado fue efectivo para mejorar el conocimiento técnico funcionalidad.

Santes *et al.* (2019), evaluaron la retención de compuestos fenólicos en rebanadas de sandía a diferentes espesores (1, 3 y 5 mm) y se deshidrataron por ventana de refractancia a diferentes temperaturas (70, 80 y 90 °C). Se analizaron mediante el método de Folin-Ciocalteu antes y después del secado. Esto incluyó sus propiedades fisicoquímicas con respecto a la humedad, color y actividad de agua. Concluyó que el secado entre 100-200°C permitió evaluar los cambios

fisicoquímicos y, por lo tanto, el factor significativo es la temperatura, debido a su retención fenólica ($p=0.002$) con un 96.02% de varianza.

1.9 Avances

Afshari (2020). Obtuvo el rendimiento del sistema termoeléctrico Peltier a partir de dos maneras diferentes para comparar el valor de del coeficiente de rendimiento (COP) durante el enfriamiento. A partir de dos cajas frigoríficas y dos modos de calentamiento y enfriamiento (cajas de 15 x 15 x 15 cm, monitorean la temperatura termopares tipo T). La temperatura promedio de las cajas y lo empleó para el cálculo del consumo de energía eléctrica del dispositivo termoeléctrico que incluye la celda, ventilador y mini bomba de agua, Utilizó una celda Peltier de 12V, TEC1-12715, para enfriar y calentar dentro de dos cajas concluyendo que la temperatura de las cajas puede bajar a niveles por debajo de la temperatura de congelación del agua. Reveló que los valores obtenidos de COP en el modo de calefacción son un 233% mayores que los del modo de enfriamiento durante los primeros 60 s. Sin embargo, el consumo de energía en el modo de enfriamiento fue mayor que el modo de calefacción, así como los cálculos que obtuvo para COP y energía térmica, mostró que los valores disminuyen con el tiempo, indicando la limitación del medio, que es un contenedor cerrado.

Bhattacharjee *et al.* (2020) Evaluaron el potencial de la ultrafiltración hermética para concentrar compuestos bioactivos en el jugo de sandía y analizaron la efectividad del almacenamiento congelado para conservar el concentrado de jugo. Emplearon dos temperaturas diferentes ($30 \pm 2^\circ\text{C}$ y $23 \pm 2^\circ\text{C}$) y presiones de 2 y 3 bar, con factores de concentración de 1.5, 2 y 3. Determinaron el contenido total de fenoles en términos de ácido gálico, la concentración de flavonoides en términos de equivalentes de rutina y el licopeno mediante espectrofotometría usando el método de extracción con hexano. Concluyeron que el proceso de ultrafiltración fue exitoso en retener un alto porcentaje de compuestos bioactivos en el concentrado de jugo de sandía, con los flavonoides mostrando los mayores niveles de concentración. El conjunto de parámetros más eficiente fue a $23 \pm 2^\circ\text{C}$, 3 bar y, un factor de concentración volumétrica de 1.5. El almacenamiento congelado a -18°C mantuvo

una alta proporción de compuestos bioactivos después de un mes y se observó una mayor pérdida de vitamina C. El licopeno se conservó en un 93% en el concentrado tras el almacenamiento.

Chavan *et al.* (2022) Implementaron el sistema de refrigeración termoeléctrica enfriado por líquido (LCTR) para el almacenamiento de frutas y verduras de verano, indicando resultados notables en la pérdida fisiológica de peso, firmeza y valores de color. El sistema LCTR redujo significativamente ($p < 0,0001$) en la pérdida de peso. Observaron un menos cambio de color en los alimentos sometidos a LCTR a comparación de almacenamiento por refrigeración convencional. De igual manera, con respecto a la calidad, ningún alimento tuvo ningún efecto significativo ($p < 0.0001$). Concluyeron el sistema termoeléctrico de refrigeración de frutas y verduras útil para la comercialización de alimentos naturales de manera eficiente.

Jamiul *et al.* (2024). Diseñaron una camisa de enfriamiento utilizando módulos Peltier y un sistema de circulación de agua para transferir calor de manera eficiente, descartando la necesidad de compresores o refrigerantes tradicionales. El sistema consistió en bloques de aluminio que albergan módulos de Peltier, el proceso implicó la circulación de agua a través de esos bloques para disipar eficazmente el calor generado por los módulos, haciendo que el agua circule a través de un radiador, entrando a un tanque de almacenamiento y finalmente regresar a los bloques de aluminio. Realizaron pruebas para confirmar la capacidad del sistema para alcanzar temperaturas inferiores de 10°C y concluyeron que pueden disminuir a cierta temperatura, indicando el potencial de la camisa de refrigeración en diversas aplicaciones, especialmente para refrigeración portátil.

Wiles *et al.* (2020). Investigaron las diferencias en la corteza y jugo de sandía en transferencia de calor y conductividad a través de datos experimentales y análisis matemáticos. Cortaron la sandía en dos partes iguales, Uno con corte perpendicular a la parte superior e inferior de la sandía, de modo que ambos extremos del tallo quedaran intactos. Midieron la temperatura a lo largo del radio de la fruta en el límite exterior y en la parte inferior de la cáscara. Emplearon un termómetro digital (Taylor Rotating Display Thermometer, modelo 9834-21) como una cámara de imagen

térmica infrarroja. En el caso de la cáscara se midió mediante un calibrador de vernier después de identificar el lugar de transición de la fruta donde comienza el color rojo suave, desde la parte inferior de la cáscara. La sandía la sometieron a un congelador durante 52 min a -6°C , experimentando la transferencia de calor transitoria, durante la cual, la temperatura descendió a lo largo de su radio desde el límite exterior de la fruta, para así, sacar la sandía y cortarla para medir mejor su distribución de temperatura radial. Para validar sus resultados, compararon con un análisis teórico asumiendo las propiedades térmicas de la sandía. Obtuvieron que, a través de la cáscara la congelación es mejor a comparación de sus datos teóricos basado en las propiedades del agua asumidas en sandía. El descenso de la temperatura es significativo al diseñar el proceso térmico durante el almacenamiento y transporte de este fruto.

Wiharti *et al.* (2024). Utilizaron un dispositivo termoeléctrico (TEC) en un sistema combinado que integra un enfriador de agua controlado por Arduino Uno. Estableció un punto de ajuste de temperatura en el enfriador de agua, gestionado por el Arduino. Compararon a partir de la temperatura inicial, el comportamiento de la temperatura del enfriador de agua y la temperatura del cuarto con el aire frío. Concluyendo que, el sistema TEC con enfriador de agua es más efectivo para una habitación de menor tamaño que el enfriador de agua.

CAPÍTULO 2

MATERIALES Y MÉTODOS

CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS

En el desarrollo experimental del proyecto, se determinaron las condiciones de la congelación en el mesocarpio de sandía y de pulpa de tomate tanto en congelación lenta y, posteriormente congelación rápida mediante el montaje experimental del intercambiador de calor de superficie raspada (ICSR) asistida con un sistema TEM. La Figura 2.1 muestra el diagrama de flujo de las etapas experimentales en la congelación de muestras en el laboratorio de plantas piloto (LPP) del Instituto Tecnológico de Orizaba.

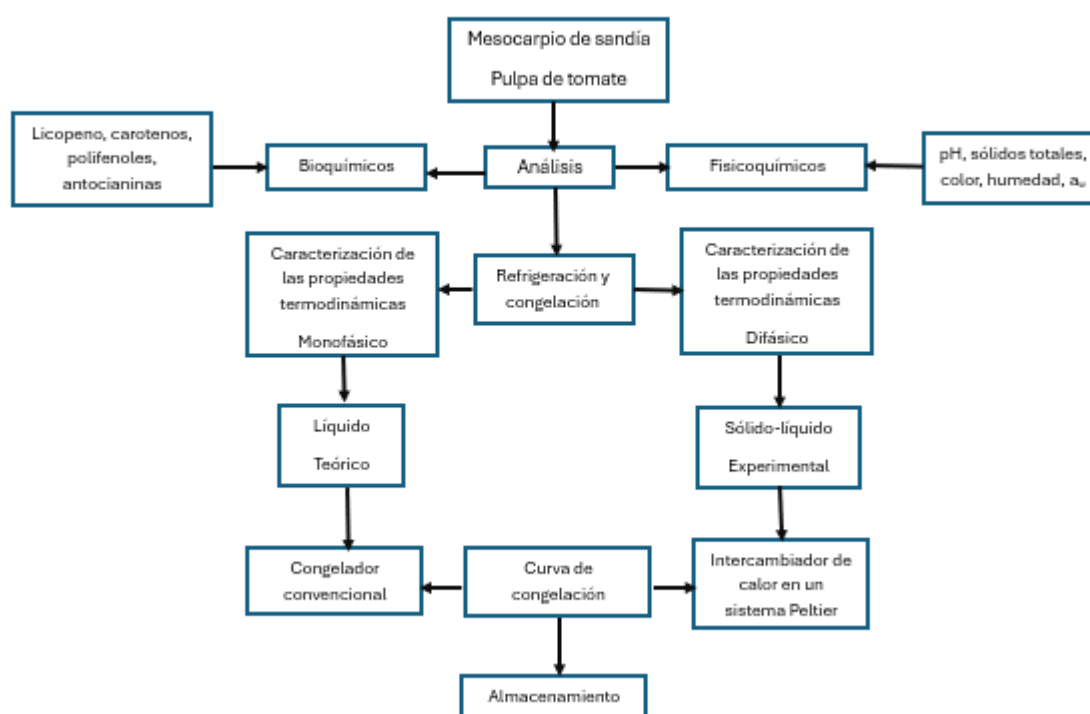


Figura 2. 1. Metodología del proceso de congelación en un ICSR del mesocarpio de sandía y pulpa de tomate

2.1. Adquisición y procesamiento del mesocarpio de sandía y pulpa de tomate

Se utilizó la sandía (*Citrullus lanatus*) y tomate (*Solanum lycopersicum*), adquiridas en el mercado Emiliano Zapata del municipio de Orizaba, Veracruz. Se seleccionaron considerando el estado de madurez como frutos firmes y de color intenso, con el menor tiempo de cosecha, como se aprecia en la Figura 2.2



Figura 2. 2. Muestras de tomates y sandías naturales adquiridos

En la obtención del mesocarpio de sandía (fracción blanca), se extrajo cuidadosamente pulpa (parte roja) y corteza (verde) con un cortador casero. Este mesocarpio se licuó a vacío para obtener el jugo (licuadora Osen HB300). En cuanto al tomate, pasó por el proceso de escaldado para remover la piel protectora; mediante un cuchillo se partió en cuatro fracciones, retirando semillas y placenta, obteniendo únicamente la pulpa, licuando a vacío. Ambos alimentos fueron almacenados en recipientes herméticos y llevados a refrigeración de 4°C.

2.2 Caracterización fisicoquímica de pulpa de tomate y mesocarpio de sandia.

2.2.1 Determinación de pH

El pH es una medida determinar el grado de acidez o alcalinidad de una sustancia o solución y, se basa en la concentración de iones de hidrógeno (H⁺). Se utilizó un potenciómetro marca Hanna Instruments pH211 para obtener la lectura, en muestras de 100 mL con un electrodo previamente calibrado en soluciones tapón con pH de 4,7,10.

2.2.2 Determinación de porcentaje de humedad

Se determinó bajo la NMX-F-083-1986, se colocaron cápsulas de aluminio 5 h a 100°C en un desecador con silica-gel, después se pesaron. En las cápsulas taradas se colocó 10 g de muestra, colocándose en un horno thermofisher a 100°C durante 12 h, reposando 2 h en el desecador y pesada posterior. Mediante la ecuación 2.1, se calculó el porcentaje de humedad en cada muestra:

$$\text{Porcentaje de humedad} = \frac{(\text{Peso inicial} - \text{peso final})}{\text{Peso inicial}} \times 100 \quad (2.1)$$

2.2.3 Determinación de sólidos totales

De los datos obtenidos de determinar la humedad, se calcularon los sólidos totales del mesocarpio de sandía y tomate, mediante la ecuación 2.2:

$$\%Sólidos\ totales = 100 - \%humedad \quad (2.2)$$

2.2.4 Determinación de actividad de agua (a_w)

Se determinó en un medidor de agua VTS-160A (Figura 2.3), con un rango de 0.03 a 1.0 (a_w), se colocó 1 g de muestra en la capsula magnética inferior, se cierra y se realiza la medición a temperatura de laboratorio.



Figura 2.3. Medidor de Actividad de agua

2.2.5 Determinación de color

Para determinar los parámetros de color se empleó un colorímetro para líquidos marca HunterLab modelo ColorQuest XE. Los resultados registrando los parámetros de L , a y b mediante el programa Universal Software versión 4.10. Al obtener los parámetros por medio de las ecuaciones 2.3 y 2.4, para mesocarpio de sandía y pulpa de tomate se determinó **Hue** (h^*) y **Chroma** (C^*)

$$Hue\ (h^*) = \arctg \frac{b^*}{a^*} \quad (2.3)$$

$$Pureza = (C^*) = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad (2.4)$$

Para la obtención de diferencia de color (ΔE). Se utilizaron los parámetros de L , a y b utilizando la ecuación 2.5.

$$\Delta E = \sqrt{((\Delta L))^2 + (\Delta a)^2 + ((\Delta b))^2} \quad (2.5)$$

Donde ΔL es la diferencial de L_{inicial} y L_{final} , Δa es la diferencia de a_{inicial} y a_{final} y Δb es la diferencia de b_{inicial} y b_{final} .

2.3 Características bioquímicas de la pulpa y de mesocarpio de sandía

2.3.1 Determinación de antocianinas

Para la extracción de compuestos, se utilizó un solvente compuesto por etanol anhidro, agua destilada y ácido clorhídrico en una proporción volumétrica 7:3:1 (v: v: v). La muestra fue colocada en un frasco ámbar junto con el solvente en una relación 1:1 (v: v) y se mantuvo en extracción durante 24 h a 4°C. Posteriormente, la mezcla fue filtrada mediante papel filtro (poro no.1) y concentrada en una parrilla magnética (marca IKA) a 55°C hasta alcanzar el 60% de su volumen inicial (Santes, 2019).

Para la cuantificación, se prepararon soluciones tampón con pH 1.0 y 4.5.

1. Buffer pH 1.0: Se disolvieron 1.86 g de KCl (cloruro de potasio, 0.025 M) en 980 mL de agua destilada, ajustando el pH a 1.0 (± 0.05) con HCl. La solución se transfirió a un matraz aforado de 1L y se completó con agua destilada.
2. Buffer pH 4.5: Se pesaron 54.43 g de $\text{CH}_3\text{CO}_2\text{Na} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (acetato de sodio trihidratado, 0.4 M) y se disolvieron en 980 mL. Se ajustó el pH a 4.5 (± 0.05) con HCl y se aforó a 1L.

Para la medición, se mezcló 1 mL de extracto con 5 mL de cada solución tampón (pH 1.0 y 4,5) por separado. Las muestras fueron leídas a longitudes de onda de 520 y 700 nm utilizando un espectrofotómetro Thermo Genesys 20 con un rango de 375-1100 nm utilizando agua destilada como blanco. La concentración de antocianinas se determinó a partir de la ecuación 2.6.

$$A = (A_{520\text{nm}} - A_{700\text{nm}})_{\text{pH } 1} - (A_{520\text{nm}} - A_{700\text{nm}})_{\text{pH } 4.5} \quad (2.6)$$

Se colocó un matraz balón de 50 mL de muestra y 50 mL de acetona. Se agitó, decantó, repitiendo el procedimiento con porciones adicionales de acetona para asegurar una extracción completo de los pigmentos. Se repitió el proceso hasta extraer completamente los pigmentos para totales y se agregaron 15 mL de hexano. Se agregó una cantidad mínima de Na₂SO₄ anhidro.

2.3.2 Determinación de carotenos totales

Las extracciones de mesocarpio de sandía y pulpa de tomate se mantuvieron en contacto con el agente desecante durante 15 min, con agitación cada 3 min. Posteriormente, la solución que contenía el hexano fue transferida a un matraz aforado de 100 mL y se completó el aforo con hexano. Se tomaron aproximadamente 2 mL de esta solución utilizando una pipeta y se transfirieron a un tubo de ensayo, donde se añadieron 8 mL adicionales de hexano. La absorbancia de la mezcla se midió a 490 nm en un espectrofotómetro Genesys 20 con un rango de 375 a 1100 nm empleando hexano como blanco. Finalmente, se pesó la muestra para así, obtener el peso de los carotenos totales en donde se calculó mediante la ecuación 2.7:

$$Carotenos\ totales = \frac{(A_{490}) \cdot V \cdot 1000}{(\epsilon \cdot 100 \cdot ml\ de\ la\ muestra)} \quad (2.7)$$

En donde V es el volumen de aforo, A es la absorbancia de la muestra, ϵ es el coeficiente de extensión molar en hexano que es un valor de 2592.

2.3.3 Determinación de licopeno

Para la obtención del licopeno, se utilizó el método de Marti *et al.* (2018), en donde se utilizaron 5 mL de etanol al 95%, 5 mL de butilhidroxitolueno (BHT) al 0,05% (p/v) en acetona, 10 mL de hexano y 0,6 mL de muestra en frascos ámbar. Se reposó por 15 min, se agitó para añadir 2 mL de agua destilada, para así, agitar nuevamente utilizando un agitador de vidrio durante 5 min. Se analizó la capa superior del hexano a 503 nm en un espectrofotómetro de Thermo Genesys 20 con un rango de operación de 375 a 1100 nm utilizando hexano como blanco. De esta forma, se calculó el contenido de licopeno con la ecuación 2.8:

$$Licopeno = \frac{(A_{503\text{ nm}}) \cdot PM \cdot FD \cdot 1000}{(\epsilon \cdot L)} \quad (2.8)$$

En donde ϵ es el coeficiente de extensión molar del licopeno en hexano (17.2×10^4 M/cm), PM es el peso molecular del licopeno (536.9 g/mol), L es el largo de la celda (cm) y FD es el factor de dilución.

2.3.4 Determinación del contenido total de polifenoles

Se prepararon soluciones de ácido gálico en diferentes concentraciones (expresadas en ppm) disueltas en 10 mL de agua destilada, con el fin de construir la curva de calibración, como se muestra en la Tabla 2.1. Para la extracción de compuestos fenólicos, se utilizó un solvente compuesto por etanol anhidro, agua destilada y ácido clorhídrico en una proporción 7:3:1 (v/v/v). Esta mezcla se combinó con la muestra en una relación 1:1 (v/v). Esta mezcla se combinó con la muestra en una relación 1:1 (v:v), manteniéndose en reposo durante 24 h a 4°C.

Una vez obtenido el extracto, este fue concentrado en una parrilla magnética a 55°C a un volumen del 60% y se adicionaron 2mm de NaF para inactivar la enzima polifenol oxidasa y prevenir la degradación de los polifenoles durante el ensayo. El extracto fue homogeneizado en parrilla magnética y centrifugado (centrífuga Hermle modelo z 383) a 10 000 rpm durante 15 min, se recuperó el sobrenadante y se colocaron en frascos ámbar.

Tabla 2. 1. Datos de curva de calibración en la determinación de polifenoles.

Ácido	Ppm	0	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600
gálico	g	0	0.002	0.004	0.006	0.008	0.010	0.012	0.014	0.016

Para la determinación de polifenoles se realizó por el método de Folin-Ciocaltea. Se tomaron 250 μ L de cada extracto o solución y se colocaron en frascos ámbar. Se añadieron 15 mL de agua de y 15 mL de reactivo de Fenol Folin-Ciocalteu diluido 1:10, posteriormente se homogeneizó el contenido de los matraces y se dejó reposar en un lapso de 8 min en oscuridad. Una vez que transcurrió el tiempo, se adicionó a cada matraz 3.75 mL de la disolución de carbonato sódico al 7.5% y 5

mL de agua destilada, se homogeneizaron los matraces y se mantuvieron en reposo en oscuridad a temperatura ambiente en un periodo de 2 horas. Por último, se midió la absorbancia a 765 nm en un espectrofotómetro Genesys 20 con rango de operación de 375 a 1100 nm.

A partir de los valores de absorbancia que se obtuvieron de cada concentración de ácido gálico, se graficaron estos datos para determinaciones (concentración de ppm de ácido gálico vs. absorbancia). Los datos se ajustan a una función lineal en la ecuación 2.9:

$$y = mx + b \quad (2.9)$$

El contenido total de polifenoles (mg Eq AG / 100 ml de jugo) por medio de la función de calibración (ec. 2.10).

$$\text{Contenido total de polifenoles} = \frac{(\text{Absorbancia muestra} - b)}{m} \quad (2.10)$$

2.4 Desarrollo, montaje y validación del ICSR de laboratorio para congelación en suspensión de mesocarpio de sandía y pulpa de tomate

Para validar el funcionamiento del intercambiador de calor de superficie raspada (ICSR), y confirmar su eficiencia en la formación de cristales de hielo, se llevaron a cabo ensayos experimentales que incluyeron el monitoreo térmico de suspensiones a distintas concentraciones. Estos datos permitieron general curvas de congelación tanto en el ICSR (con y sin agitación), como en un congelador convencional, el cual, se empleó como sistema de referencia para evaluar el comportamiento térmico de cada muestra.

Se utilizaron dos tipos de muestras: Suspensiones de mesocarpio de sandía a 8.49, 20, 25 y 30%, siendo M-8.49, M20, M25 y M30, en cuanto a pulpa de tomate a 6.5, 20, 25 y 30% siendo PT-6.5, PT20, PT25 y PT30. Estos indicadores permitieron evaluar cómo influye la concentración de sólidos en la formación de hielo y sus propiedades térmicas.

El Intercambiador de calor de superficie raspada (ICSR) asistido mediante un sistema TEM, está conformado por un contenedor tipo batch de aluminio (opcional

de acero inox. 316), un eje central que soporta dos cuchillas, existiendo un gap entre cuchilla - pared de 1 mm. Este eje es controlado por un motor XD-60 GA775 con una velocidad 5 rpm. Las paredes del intercambiador son contenidas en una caja de acrílico cuyas paredes fueron recubiertas con espuma de poliuretano como aislante. El perfil de temperatura del sistema está conformado por termopares tipo J para diferentes alturas de la pared y, otro en un termopozo en la tapa superior. Esto para tener una temperatura de referencia de la muestra o mezcla para validar en su momento la proporción de hielo generada. Las características geométricas del ICSR son descritas posteriormente. Un sistema de enfriamiento tipo TEM (termoeléctrico de efecto Peltier), permite controlar y reducir la temperatura del sistema desde la base del intercambiador.

2.4.1 Montaje y validación del sistema de enfriamiento TEM de efecto Peltier

Los ICSR utilizan diferentes sistemas de acondicionamiento de las muestras, desde maquina frigorífica con refrigerante primario -40°C que eliminan calor de un segundo circuito de un fluido acondicionador (etanol puro). En este proyecto se utilizó como medio refrigerante y de acondicionamiento, un sistema TEM, que consiste en un módulo termoeléctrico de efecto Peltier como se puede observar en la Figura 2.4. Se optó por colocar en la parte inferior del ICSR una placa de aluminio de $10 \times 0.5\text{ cm}$, sobre la celda Peltier, para mayor transferencia térmica (lado frío). La celda Peltier utilizada modelo TEC1-12710, con un rango de temperatura de -50 hasta 150°C , con dimensión de $4 \times 4\text{ cm}$, 12V y 10 A . Proporciona una cara con capacidad para enfriar y, otra cara opuesta emite calor con la misma proporción. La cara fría de la celda Peltier enfría un contenedor a través de una placa difusora de aluminio, este sistema frío está aislado en una cámara de acrílico con 11 cm de largo $\times 7.2$ de ancho con una capacidad de 79.2 cm^3 . Por otro lado, dos disipadores de calor, evitan el sobrecalentamiento del lado caliente de la celda Peltier. Están conformado térmicamente, por la parte caliente de la celda, que conecta mediante 8 tubos de cobre utilizados como conductores térmicos, esto permite que la celda mantenga un equilibrio en ambas caras al evitar que se sobrecaliente pasando por las paredes de aluminio, además cuenta con ventiladores acoplados para extraer el calor que generado por la celda soltando el aire en una misma dirección.

Este sistema está conectado a una fuente de alimentación modelo 0503FAI-FP030A710002 que opera con voltaje y corriente de salida de 12V y 30A con un voltaje mínimo de entrada de 110-220V y, potencia de salida 360W. Esta fuente tiene la potencia suficiente para que el sistema opere con seguridad y eficiencia, con una resistencia de temperatura altas y bajas.

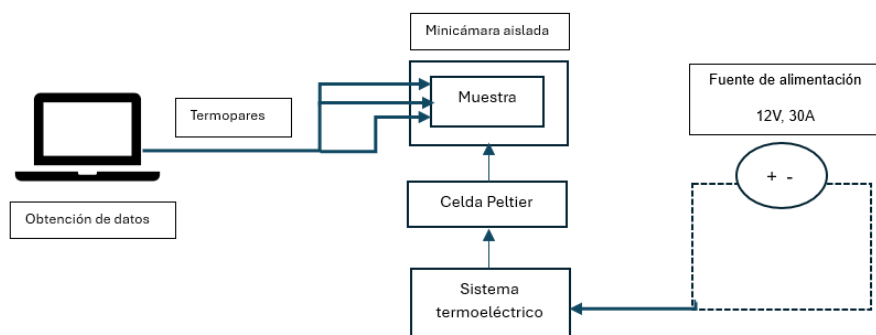


Figura 2. 4. Diagrama del sistema de enfriamiento termoeléctrico

2.4.2 Construcción experimental del intercambiador de calor de superficie raspada

A partir de la Figura 2.5, se muestra el ICSR. Está compuesto por un cilindro de aluminio 130 ml., equipado al interior con un sistema de dos cuchillas de acero inoxidable giratorias a velocidad de 5 rpm, con un gap cuchilla-pared de un 1mm para un raspado continuo de la pared interna del cilindro. El contacto constante de las cuchillas con la superficie interna permite mantener una transferencia de calor efectiva y alcanzar una estabilidad térmica del proceso para una cristalización heterogénea propia de las soluciones y suspensiones alimentarias.

Para aislar la cámara, se utilizan placas de acrílico, colocándolo en una cámara cubica, cubriendo entre el cilindro y pared con espuma expansible PRETUL ESEX-500P de capacidad de 300 ml. El aislar y rellenar los espacios entre cilindro del ICSR y paredes del cubo, limitó la pérdida de energía del sistema y, el medio ambiente. Así mismo, se colocó en la parte una tapa superior.

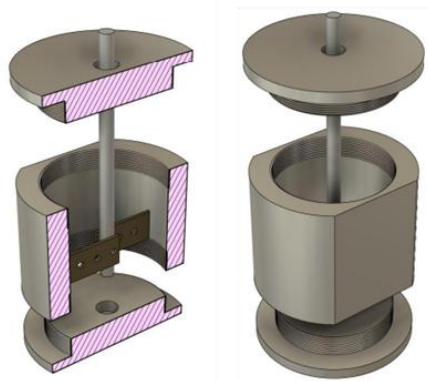


Figura 2. 5. Figura izquierda del intercambiador muestra la posición de las cuchillas y, la figura de la derecha muestra la tapa y contratapa.

2.4.3 Validación experimental del funcionamiento del ICSR

Para validar el funcionamiento del intercambiador de calor de superficie raspada (ICSR) y confirmar su eficiencia en la producción de masa de hielo, se llevó a cabo un monitoreo continuo mediante sensores de temperatura colocados en puntos estratégicos del sistema. Esto permitió obtener las curvas de congelación con y sin agitación, lo cual facilitó la comparación del comportamiento de las muestras en fase líquido-sólido (suspensiones con cristales de hielo formados).

Se determinaron las suspensiones de mesocarpio de sandía de 8.49, 20, 30 y 40% (M-8.49, M20, M30 y M40) y pulpa de tomate de 6.5, 20, 30 y 40% (PT-6.5, PT20, PT30 y PT40). Estas variaciones permitieron observar los efectos de las concentraciones de sólidos sobre el comportamiento térmico y la formación de cristales de hielo en cada tipo de muestras.

La Figura 2.6 ilustra el diseño del montaje experimental: La vista lateral (a) muestra el soporte y la disposición de los sensores, mientras que la vista frontal (b) permite observar el mecanismo del intercambiador, el cual se encuentra fijado a una base robusta que evita movimientos erráticos durante la operación. Los sensores fueron colocados estratégicamente para capturar lecturas precisas con un intervalo de registro cada 5 s.

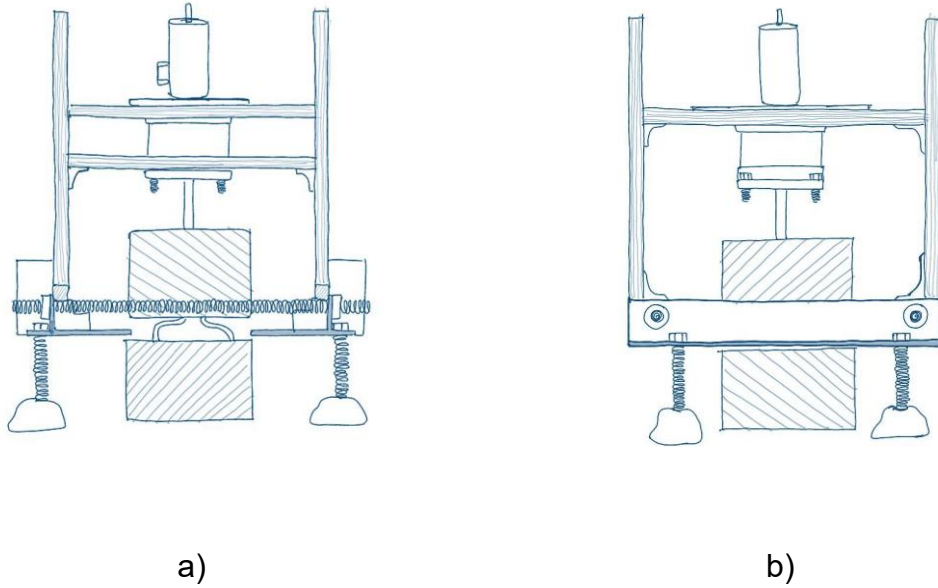


Figura 2. 4. Vistas del soporte para el ICSR con sistema TEM lateral (a) y frontal (b)

2.4.4 Cálculo de la temperatura promedio del fluido y pared de intercambio

Diferentes correlaciones han sido propuestas para determinar la temperatura en la pared de intercambio, la práctica común es obtener un valor promedio de la temperatura del fluido durante el proceso de congelación, se ha empleado la ecuación siguiente:

$$T_m = \frac{T_1 + T_2}{n} \quad (2.11)$$

En donde T_1 y T_2 son las temperaturas del jugo a estimar, siendo temperatura en dos puntos de medición de la temperatura de congelación.

Por otro lado, para calcular la temperatura de la pared de intercambio ($^{\circ}\text{C}$) se empleó la ecuación 2.12:

$$T_{p.i} = \frac{\left(\frac{T_1 + T_2}{2}\right) + \left(\frac{t_1 + t_2}{2}\right)}{2} \quad (2.12)$$

En donde, la estimación de la temperatura de la pared ($T_{p.i}$) se empleó la temperatura promedio del jugo (T_1 y T_2) y del medio de calentamiento (t_1 y t_2)

2.4.5 Cálculo del coeficiente interno de transferencia (h) en la suspensión de hielo- mesocarpio de sandía y pulpa de tomate

El cálculo del coeficiente interno de transferencia de calor se evaluó mediante la ecuación 2.13, empleando la ley de enfriamiento de Newton:

$$h = \frac{Q}{Ar(T_m - T_{p.i})} \quad (2.13)$$

Donde el área angular (Ar), se calcula mediante la ecuación 2.14 donde D es el diámetro mayor y d es diámetro menor.

$$Ar = \left(\frac{\pi}{4}\right) (D^2 - d^2) \quad (2.14)$$

Para determinar el calor perdido donde Q (J/s) del jugo pasar por el intercambiador, se estima con la ecuación 2.15.

$$Q = mCp (T_1 - T_2) \quad (2.15)$$

En donde m es la masa y Cp es la capacidad calorífica del jugo multiplicado por la diferencia de temperatura.

2.4.6 Cálculo de tiempo de congelación inicial

Para estimar el tiempo de congelación inicial a partir de la Ley de Raoult propuesta por Chen y Chen (1996) como modelo predictivo de la fracción de masa de hielo. Se empleó la siguiente ecuación:

$$t_{c.i} = \frac{\lambda_a \cdot y \cdot \rho}{T_c - T_a} \left[\frac{P \cdot a}{h} + \frac{R \cdot a^2}{k} \right] \quad (2.16)$$

$$\lambda_a = m_w \cdot \lambda \quad (2.17)$$

Donde $t_{c,i}$ es el tiempo de congelación inicial en el alimento (s), ρ es la densidad del alimento sin congelar (kg/m^3), λ_a es el calor latente de congelación del alimento (KJ/Kg), y es fracción de agua congelada en el alimento, λ calor latente de fusión del agua (333 kJ/kg), m_w fracción de masa de agua en el alimento, h coeficiente de transferencia de calor superficial ($\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$), P y R constantes de Plank, T_a del medio acondicionador ($^\circ\text{C}$), a espesor o gap (m), T_c es la temperatura inicial de congelación del alimento y k es la conductividad térmica del alimento ($\text{W/m}^\circ\text{C}$).

2.4.7 Fracción de masa de hielo

La fracción de agua ligada de hielo se estimaron a partir de las ecuaciones propuestas por Orrego (2008) y ASHRAE (2018), donde X_b es la fracción de agua ligada y X_p fracción de masa de proteína en porciento.

$$x_b = 0.4x_p \quad (2.18)$$

$$X_{m.h} = (x_a - x_b) \left[1 - \frac{T_{c,i}}{T} \right] \quad (2.19)$$

Donde x_a es la fracción de agua del alimento sin congelar, $T_{c,i}$ es la temperatura de congelación inicial del alimento ($^\circ\text{C}$) y T es la temperatura del alimento ($^\circ\text{C}$).

Se realizaron micrografías de las muestras obtenidas mediante microscopía óptica empleando el microscopio VELAB VE-BC PLUS, utilizando objetivo 10x, con el fin de observar las diferencias visuales entre agitación y sin agitación de las muestras de mesocarpio de sandía y pulpa de tomate. Las imágenes fueron capturadas con ayuda del software TCapture ver. 4.3.605 para evaluar las características estructurales y variaciones morfológicas en función de las condiciones de agitación.

2.5 Determinación de las propiedades termodinámicas

Se utilizaron muestras de jugo filtrado de mesocarpio de sandía y pulpa de tomate, donde las determinaciones se hicieron por triplicado. Para obtener las curvas de congelación, se utilizaron cilindros de 20 mL y se registró la temperatura por medio

de un multímetro Fluke modelo 289 equipado con un termopar tipo J, en un congelador convencional hasta -18°C . Las curvas de congelación de temperatura con tiempo validaron el punto de congelación inicial y el tiempo de congelación.

2.5.1 Cálculo de la capacidad calorífica

Para el cálculo de la capacidad calorífica, se utilizaron las correlaciones de Choi y Okos, en donde se válida para productos alimenticios y zumos de frutas con composición conocida (carbohidratos, proteínas, lípidos, cenizas) y el porcentaje de humedad mayor al 60%.

2.5.2 Cálculo de la conductividad térmica

La conductividad térmica se calculó a partir de la ecuación 1.8. En donde se válida para los productos alimenticios y zumos de frutas con composición conocida (carbohidratos, proteínas, lípidos, cenizas) y porcentaje de humedad mayor al 60%.

2.5.3 Cálculo de la difusividad térmica

La difusividad se determinó a partir de la ecuación 1.13, representando de manera predictiva de Choi y Oikos (1986) demostrado por Singh y Heldman (2003), obteniendo los valores de k , ρ , C_p utilizando los coeficientes para estimar las propiedades de los alimentos, empleando la Tabla 1.5

2.6 Validación por FTIR del contenido de nutrientes

Se utilizó el equipo FTIR Spectrum Two de PerkinElmer para identificar de manera cualitativa muestras líquidas y sólidas. Este equipo consta de un detector NIR estándar de LiTaO_3 (tantalato de litio) de alto rendimiento y temperatura ambiente. Contiene un sistema óptico con ventanas CaF_2 que permite copilar datos en un rango total de $14,700$ a $2,000\text{ cm}^{-1}$ con una resolución de $1,0\text{ cm}^{-1}$ a $7,200\text{ cm}^{-1}$. Contiene un diamante de cristal en donde se coloca la muestra y hace contacto con un brazo a presión para obtener datos detallados y se recopilaron por medio del programa que incluye la paquetería el equipo (Figura 2.7).

Para la identificación de nutrientes en mesocarpio de sandía y pulpa de tomate, se llevó a cabo por el método de extracción de solventes: Utilizando etanol en relación 1:10 se concentró para obtener un volumen de mezcla. Se colocó una gota en el

diamante del equipo, se hizo presión con el brazo y, con el apoyo del software se identificaron los nutrientes en la región deseado.

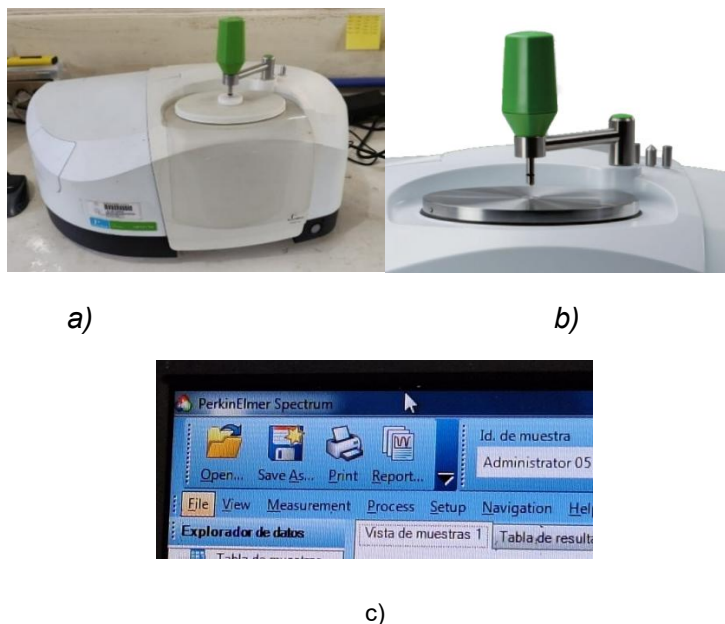


Figura 2. 7. Composición del equipo PerkinElmer Spectrum Two: a) Vista general, b) Diamante y brazo de presión y c) Software de fábrica del equipo

Obteniendo los datos de cada muestra, se identificó la longitud de interés y por medio del área bajo la curva se determinó con la afinidad de demostrar la cantidad de nutrientes presentes que no son identificadas a simple vista.

2.7 Análisis de color y Regresión no lineal de propiedades térmicas

Las variables de respuesta para la evaluación para muestras frescas y congeladas son en color, conductividad térmica y capacidad calorífica. Los parámetros de color (L, a y b) se empleó desviación estándar para indicar la diferencia entre las muestras frescas y almacenados en periodo estándar. Se realizó una regresión no lineal para conductividad térmica y capacidad calorífica con la finalidad de comparar los resultados experimentales con los teóricos y validar el modelo determinado.

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Análisis fisicoquímico del tomate y sandía

Para el presente proyecto, utilizando el mesocarpio de sandía (*Citrullus lanatus*) y la pulpa de tomate (*Solanum lycopersicum*), se seleccionaron y acondicionaron de acuerdo a lo establecido previamente en la sección 2.2. En la Tabla 3.1 se presentan los resultados fisicoquímicos de mesocarpio de sandía y pulpa de tomate.

Tabla 3.1. Caracterización fisicoquímica de mesocarpio de sandía (*Citrullus lanatus*) y pulpa de tomate (*Solanum lycopersicum*)

Determinación	Mesocarpio de sandía	Pulpa de Tomate
Humedad (%)	91.51	94.38
pH	5.56	4.4
a_w	0.92	0.94
Sólidos totales (%)	8.49	6.5

En comparación con los estudios reportados para la sandía, Valle-Vargas (2020), reportan una humedad del 95.09%, un pH de 5.61 y sólidos totales de 7.5%. Los datos experimentales en cuanto al blanco de sandía se comparan a los datos de la pulpa, señalando que tienen propiedades similares.

En el caso de la pulpa de tomate, Degwale *et al.* (2022) reportan contenido de humedad del 92.58%, un pH de 4.567 y sólidos totales de 7.433. Los datos experimentales obtenidos, la humedad fue de 93.38%, pH de 4.4 y sólidos totales de 6.5%; encontrando estos valores algo alejados a los datos reportados, esto puede atribuirse al estado de madurez y el entorno en la que se encontraban.

3.1.1 Determinación de color

De acuerdo con los resultados experimentales, se realizó la determinación de color para mesocarpio de sandía y la pulpa de tomate, como se aprecia en la tabla 3.2. para muestras natural.

Tabla 3. 2. Análisis de color de mesocarpio de sandía y pulpa de tomate natural.

Muestra	Parámetros de color de Hunter <i>Lab</i>				
	<i>L</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	C* (Chroma)	H* (Hue)
Mesocarpio de sandía	48.73	0.95	19.32	19.34	1.52
Pulpa de tomate	33.15	31.84	18.3	36.72	0.52

El jugo de mesocarpio presentó un Chroma de 19.34 y Hue de 1.52, revelando diferencias a los datos por Santes (2021) con valores de 11.02 y -1.38. Esto indica que contiene una saturación ligeramente alta y tono en el cuadrante rojo, mientras que los datos reportados indican una saturación baja y una pureza en el cuadrante verde.

De acuerdo a valores reportados para la pulpa de tomate, Pathare y Al-Dairi (2021) obtuvieron valores de Chroma de 54.41 y Hue de -1.53, mientras que los datos experimentales fueron de 36.72 y 0.52 respectivamente, estos valores indican que Hue es más alto, indicando un enrojecimiento y una saturación relativamente baja a comparación de los datos reportados, lo anterior puede atribuirse a factores físicos, como el grado de maduración, condición de almacenamiento y oxidación del alimento. (Mathias-Rettig y An-Hen, 2014).

Para demostrar la diferencia de color (ΔE) entre muestras frescas y muestras congeladas de mesocarpio de sandía y pulpa de tomate, se puede apreciar en la Tabla 3.3:

Tabla 3. 3. Determinación de color en muestras frescas y congeladas.

Muestra	Parámetros de color de Hunter <i>Lab</i>			
	<i>L</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	ΔE
Mesocarpio de sandía fresco	48.73	0.95	19.32	-
Mesocarpio de sandía congelado	71.28	-0.21	3.78	19.26
Pulpa de tomate natural	33.15	31.84	18.3	-
Pulpa de tomate congelado	24.15	29.73	14.99	15.71

3.2 Análisis bioquímico

En la Tabla 3.4 se muestran los valores obtenidos en el análisis bioquímico para mesocarpio de sandía y pulpa de tomate mediante la metodología planteada en la sección 2.3.

Tabla 3. 4. Caracterización bioquímica del mesocarpio de sandía y pulpa de tomate.

Componente	Unidades	Mesocarpio de sandía	Pulpa de tomate
Carotenos	(mg/kg)	5.01	5.14
Licopeno	(mg/kg)	34.32	29.392
Polifenoles	mg ácido gálico EAG/ g	0.02777	0.02775
Antocianinas	(mg cianidna 3-glucósido/g)	0.00887	0.6211

El mesocarpio de sandía presentó un contenido de carotenos de 5.01 mg/kg y de licopeno de 34.32 mg/kg. Estos valores se encuentran dentro del rango reportado por Ilahy *et al.* (2019) indicaron que en jugo de sandía los carotenos varían entre 1.2 y 10.2 mg/kg y el licopeno entre 30 y 70 mg/kg, lo cual confirma la presencia significativa de estos compuestos en el blanco. En el caso del tomate, se obtuvo un contenido de carotenos de 5.14 mg/kg. Del mismo autor, los rangos para carotenos para tomate están entre 3 y 12.5 mg/kg y para licopeno entre 10 y 150 mg/kg, por lo que los resultados también se encuentran dentro de los valores establecidos, reflejando una buena concentración de pigmentos en la pulpa.

Respecto a los compuestos fenólicos, el contenido de polifenoles y antocianinas en tomate difiere de los datos de Torres (2012), quien reportó 1.39 mg de ácido gálico EAG/g y 0.29 mg cianidina 3-glucósido/g respectivamente. En cuanto al mesocarpio de sandía, Kistriyani *et al.* (2020) reportaron 0.0334 mg ácido gálico EAG/g en sandía roja, comparado con Neglo *et al.* (2020) registraron valores en pulpa entre 0.001 y 0.010 (mg cianidna 3-glucósido/g), en corteza entre 0.006 y 0.026 (mg cianidna 3-glucósido/g) y en las semillas de 0.003 y 0.042 (mg cianidna 3-glucósido/g), indicando que el blanco de sandía se encuentra en los rangos de cada uno de los datos reportados, indicando la presencia de actividad antioxidante y compuestos fenólicos.

Para la cuantificación de polifenoles se elaboró una curva de calibración utilizando ácido gálico, lo cual permitió identificar este compuesto de manera precisa, como se muestra en la Figura 2.10.

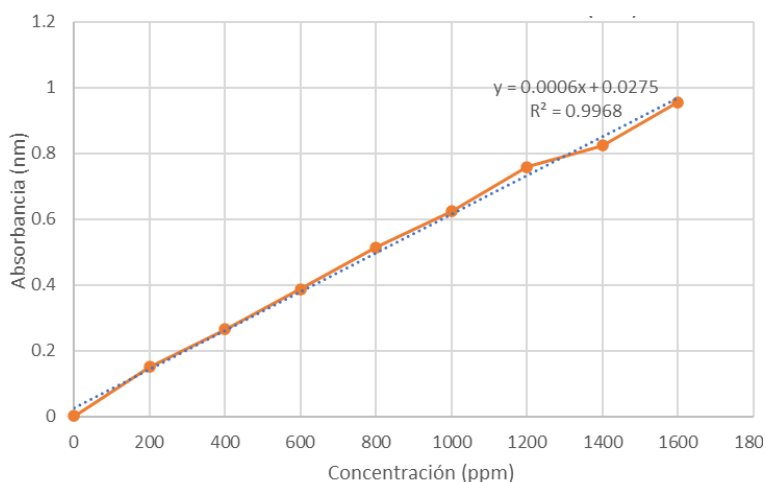


Figura 3. 1. Curva de calibración de ácido gálico para la identificación de polifenoles

3.3 Determinación de la $T_{c,i}$ a partir de las curvas de congelación teóricas y experimentales.

3.3.1 Curvas de congelación teórica y empírica en un congelador comercial.

Usando un congelador convencional, se monitoreó la temperatura con un termopar tipo J y un multímetro industrial Fluke ©, los datos recopilados se evidencian a través de la curva de congelación como se aprecia en la Figura 3.2. Se puede observar en

el mesocarpio de sandía un descenso de temperatura, e iniciando la etapa de pre enfriamiento antes de alcanzar las temperaturas por debajo de 0°C , al alcanzar estas temperaturas, pasa por la etapa sub enfriamiento (sulfusión o reordenamiento molecular), en la solución de mesocarpio, hay un ligero aumento de temperatura, perdiendo el calor sensible y la presencia del calor latente, posterior a esto, aparecen los primeros cristales. En un salto o incremento de temperatura, determina la Temperatura inicial de congelación ($T_{c,i}$) de -0.4°C . Por otra parte, para diferentes concentraciones de la solución de pulpa de tomate, se determinó el $T_{c,i}$ teórica a partir de la ecuación 2.15, presentando una tendencia similar, como se aprecia en la figura 3.3. En un congelador casero o industrial por convección forzada, la rapidez de congelación es lenta oscila entre 0.2 y 0.5 cm/h. (Merve *et al.* 2018).

Un flujo de aire de transferencia de calor de 5 a $10 \text{ W/m}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ para -18°C en un intervalo de tiempo de 180-4320 min (Orrego, 2003).

3.3.2 Curvas de congelación de soluciones de pulpa de tomate y de mesocarpio de sandia

A continuación, se presentan las curvas de congelación obtenidas experimentalmente para suspensiones de mesocarpio de sandía y pulpa de tomate, preparadas con diferentes concentraciones (20, 25 y 30%). Estas curvas permiten observar el comportamiento térmico durante el proceso de congelación en función del tiempo y la temperatura, así como identificar el punto de congelación inicial ($T_{c,i}$) para cada concentración.

En las Figuras 3.2 y 3.3 se aprecia la influencia del contenido de sólidos en la velocidad de descenso de temperatura, el tiempo que permanece en la zona de cristalización y la formación de la fase sólida.

En el caso pulpa de tomate, conlleva el mismo comportamiento en congelación de mesocarpio de sandía y otros alimentos naturales. Pasa por la etapa de pre enfriamiento hasta llegar a la etapa de sub enfriamiento para la pérdida de calor sensible e inicia la presencia de calor latente para llegar a la etapa de sulfusión. La $T_{c,i}$ de pulpa de tomate con 6.50 % en sólidos corresponde a -0.6°C . De la misma

forma, se determinó de manera teórica a diferentes concentraciones, concluyendo que la cantidad de sólidos disueltos en una muestra, $T_{c,i}$ puede diferir.

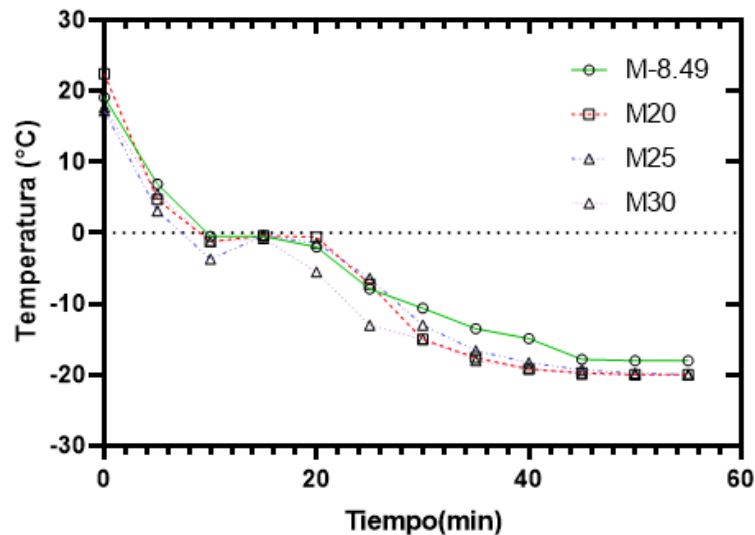


Figura 3. 2. Curvas de congelación del mesocarpio de sandía con 8.49, 20, 25 y 30% sólidos.

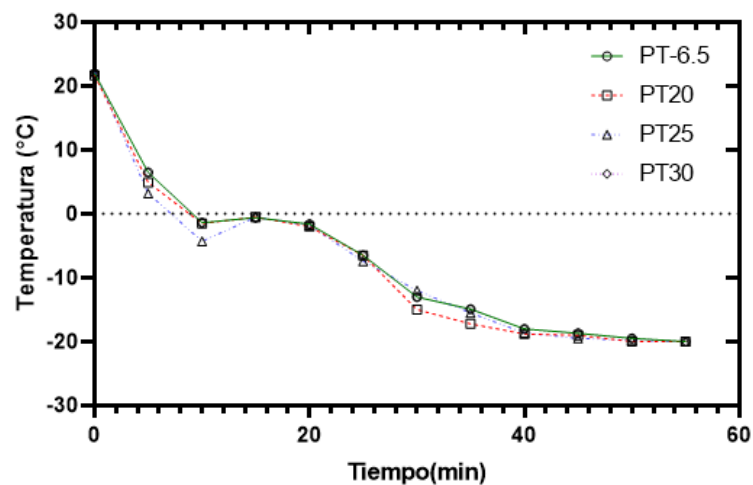


Figura 3. 3. Curva de congelación de pulpa de tomate con 6.5, 20, 25 y 30% sólidos

3.3.3 Determinación de las propiedades térmicas

A partir de las curvas de congelación y los sólidos totales del mesocarpio de sandía y de la pulpa de tomate, se determinaron las propiedades térmicas. Se aprecia que, al disminuir la temperatura hay un cambio de fase, las propiedades térmicas presentan una evolución diferente, como en la capacidad calorífica y densidad, siendo valores menores a medida que desciende la temperatura, esto es, menores

al agua líquida que va concentrándose en masa de hielo. En cuanto a la conductividad y difusividad térmica ocurre lo contrario, por el cambio de fase. Estas propiedades se pueden apreciar en la Tabla 3.5.

Tabla 3. 5. Propiedades térmicas del mesocarpio de sandía

Temperatura (°C)	Cp (kJ/kg °C)	ρ (Kg/cm ³)	K (W/m °C)	α (m ² /s)
20	3.905	1053.8	0.569	1.38x10 ⁻⁷
10	3.903	1049.9	0.554	1.32x10 ⁻⁷
4	3.903	1041.58	0.561	1.39x10 ⁻⁷
-4	2.223	962.23	1.266	1.01x10 ⁻⁶
-10	2.103	957.68	1.38	1.10x10 ⁻⁶
-18	2.071	956.39	1.42	1.18x10 ⁻⁶

El comportamiento de estas propiedades térmicas, se aprecia en las Figuras 3.4 y 3.5 para el mesocarpio de sandía y las Figuras 3.6 y 3.7 para la pulpa de tomate.

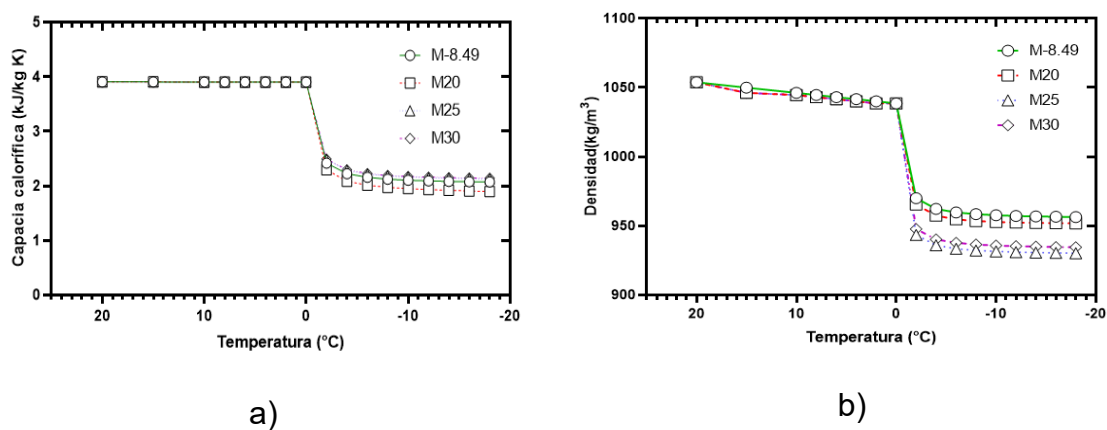


Figura 3. 4. Propiedades térmicas del mesocarpio de sandía experimental y teórica: a) Capacidad calorífica, b) densidad

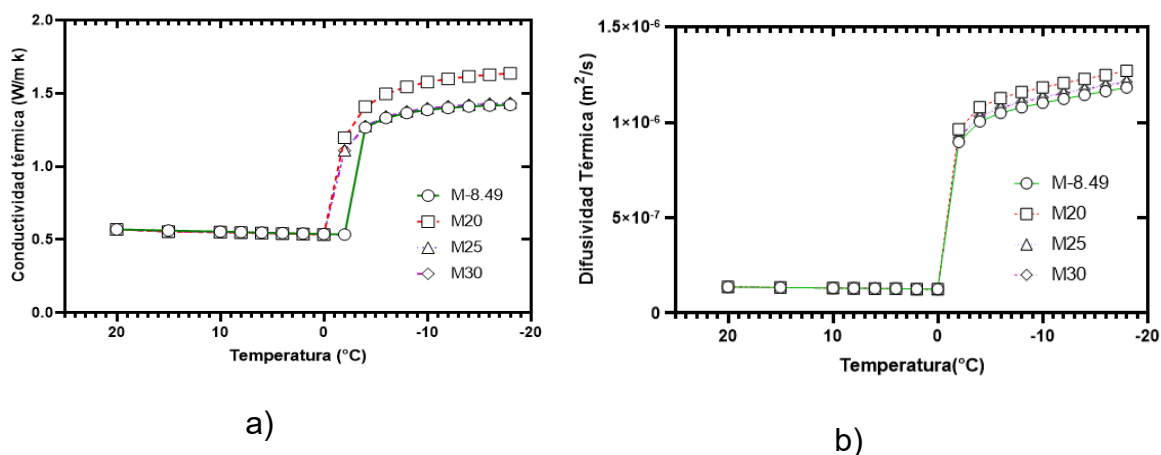


Figura 3. 5. Propiedades térmicas del mesocarpio de sandía experimental y teórica: a) Conductividad térmica, b) Difusividad térmica

En el caso de la pulpa de tomate, las propiedades térmicas se observan en la Tabla 3.6, observando que, al disminuir la temperatura, la capacidad calorífica y la densidad disminuyen, pero mientras estas propiedades disminuyen, la conductividad y la difusividad térmica aumentan por las propiedades del hielo.

Tabla 3. 6. Propiedades térmicas de la pulpa de tomate.

Pulpa de tomate	Cp	ρ	K	α
(%)	(kJ/kg °C)	Kg/cm³	(W/m °C)	m² /s
20	3.905	1053.8	0.569	1.38x10 ⁻⁷
10	3.903	1049.9	0.554	1.32x10 ⁻⁷
4	3.903	1041.58	0.561	1.39x10 ⁻⁷
-4	2.223	962.23	1.266	1.01x10 ⁻⁷
-10	2.103	957.68	1.38	1.10x10 ⁻⁷
-18	2.071	956.39	1.42	1.18x10 ⁻⁷

Menciona Geankoplis (1998) que la conductividad térmica de los alimentos sin congelar y con composiciones altas de agua, son cercanas al agua pura, pero, al congelarse, el hielo siendo mejor conductor que el agua, el alimento al congelarse, esta propiedad aumenta más que los alimentos sin congelar.

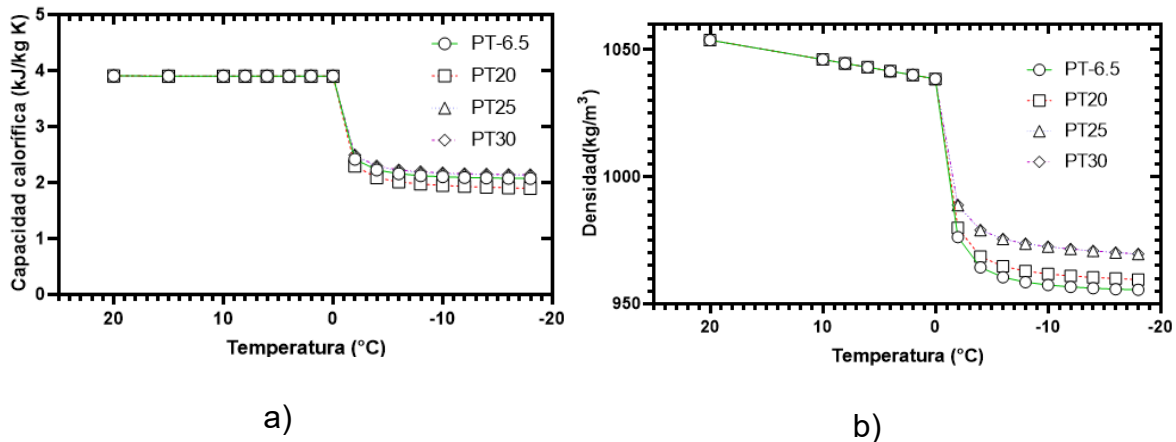


Figura 3. 6. Propiedades térmicas de la pulpa de tomate experimental y teórica: a) Capacidad calorífica, b) densidad

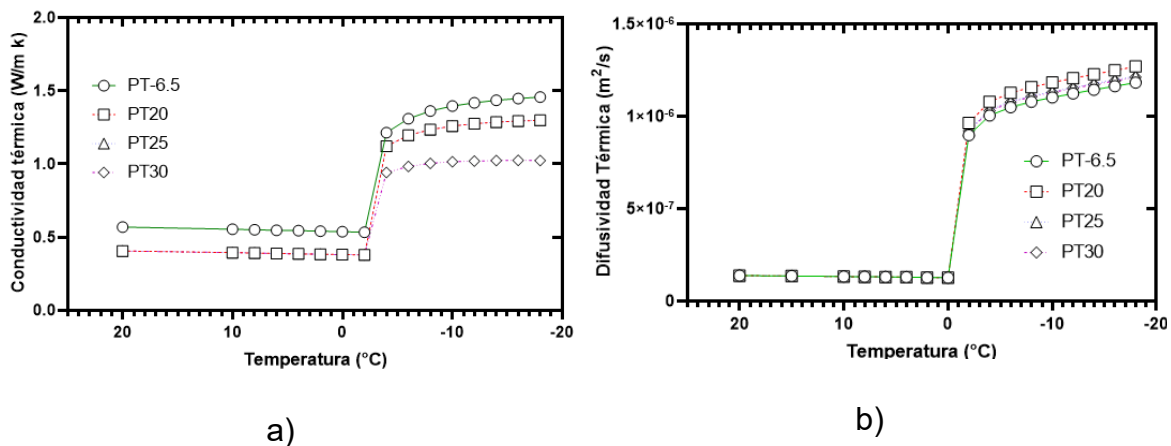


Figura 3. 7. Propiedades térmicas de la pulpa de tomate experimental y teórica: a) Conductividad térmica, b) Difusividad térmica

Las propiedades térmicas de un alimento, como la capacidad, la conductividad y la difusividad térmicas son clave para determinar cómo un alimento responde ante

procesos de transferencia de calor como la refrigeración y congelación. Su comportamiento no es constante; varían en función de la composición del alimento y las condiciones térmicas a las que se expone. Fellows (2009) señala que los cambios en el estado físico del agua durante la congelación modifican la estructura interna del alimento. A medida que el agua se transforma en hielo, disminuye la conductividad térmica del sistema, y esto puede favorecer la formación de cristales de hielo grandes y dañinos si el enfriamiento no es rápido. Este daño estructural compromete la textura, la capacidad de retención de agua y la calidad sensorial del producto final. De forma complementaria, Becker y Fricke (2003) indican que las propiedades térmicas de los alimentos deben considerarse cuidadosamente al diseñar procesos de congelación y equipos de refrigeración, afectando directamente la velocidad del proceso y su eficiencia. Si un alimento presenta baja difusividad o una caída significativa en conductividad durante la congelación, se requerirá mayor tiempo para alcanzar temperaturas seguras, lo que aumenta el riesgo de deterioro estructural y pérdidas de nutrientes.

3.4 Determinación de las condiciones de congelación en el ICSR

3.4.1 Validación del montaje del prototipo de congelación

A partir del sistema termoelectrico descrito en la metodología en la sección 2.4., se obtuvieron las curvas de congelación con y sin agitación. La Figura 3.8 mostró muestra las curvas correspondientes a concentraciones de 8.49, 20, 30 y 40% sin agitación para el mesocarpio de sandía. Se determinó el punto de congelación inicial para una concentración de 8.49% de sólidos fue de -0.73°C . Mientras que la Figura 3.9 se aprecia la curva con agitación del mesocarpio de sandía a las mismas concentraciones, el punto de congelación inicial de concentración de 8.49% a -0.73°C , 20, 30 y 40% fueron de -0.30 , -0.47 y -0.53°C .

Este comportamiento es explicado con base en lo reportado por Orrego (2003), quien destaca que al enfriar una solución líquida bajo condiciones de agitación, se favorece la formación de cristales de hielo más puros dentro de la matriz líquida. La agitación permite una cristalización controlada. Además, la agitación reduce el riesgo de nucleación espontánea irregular y permite mantener una distribución térmica más equilibrada en todo el sistema. Este aspecto tiene relevancia en

procesos de crio concentración, ya que, la eficacia del proceso depende de la separación eficiente entre los cristales de hielo y la solución concentrada.

El análisis de las curvas de congelación revela valores similares, atribuyendo la presencia de sólidos disueltos, principalmente azúcares. A medida que los sólidos aumentan, el punto de congelación experimenta una mayor depresión, reduciendo la cantidad de agua libre disponible. En contraste, en concentraciones más bajas de sólidos, la cantidad de agua libre es mayor, influyendo en el comportamiento térmico del sistema.

En la Tabla 3.7 presenta una comparación de la cantidad de sólidos en el mesocarpio de sandía a diferentes concentraciones con y sin agitación.

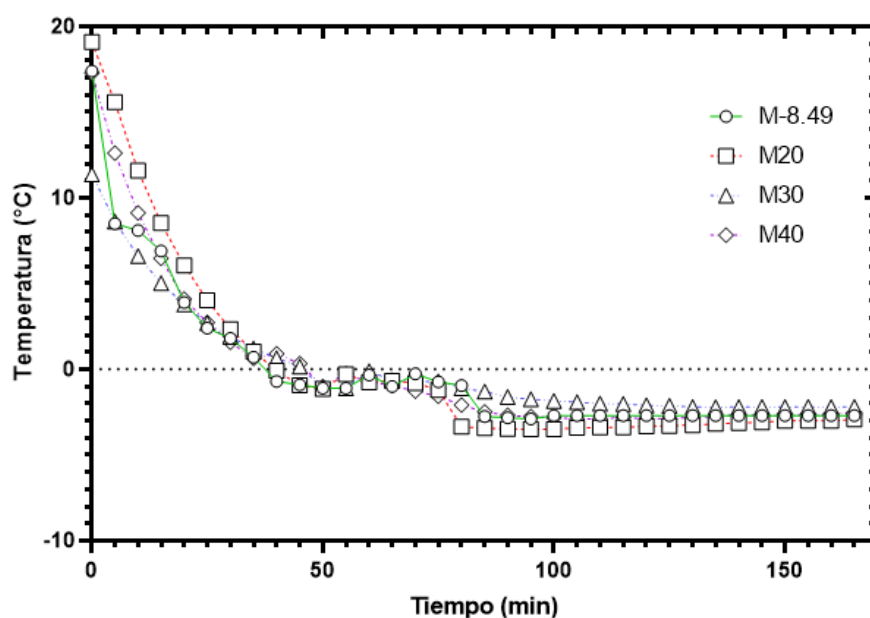


Figura 3. 8. Curvas de congelación del mesocarpio de sandía sin agitación a 8.5, 20, 30 y 40% sólidos.

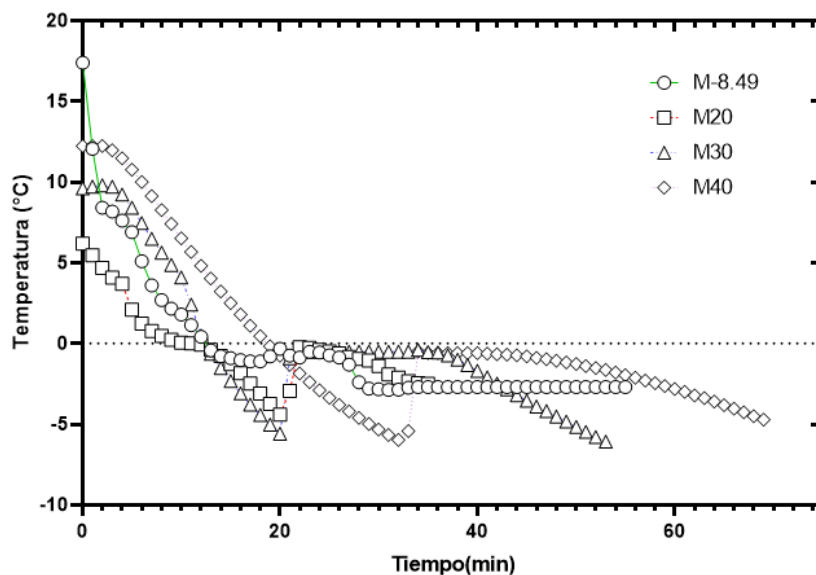


Figura 3. 9. Curvas de congelación del mesocarpio de sandía con agitación a 8.50, 20, 30 y 40% sólidos.

Tabla 3. 7. Temperatura de congelación inicial del mesocarpio de sandía en el ICSR

Concentración de mesocarpio de sandía (% sólido)	T _{c.i} (°C) (0 rpm)	T _{c.i} (°C) (5 rpm)
8.50	-0.73	-0.73
20	-0.1	-0.30
30	-0.2	-0.47
40	-0.26	-0.53

Esto demuestra que, la agitación a 5 rpm intensifica el subenfriamiento, especialmente a mayor concentración. Esto favorece una nucleación más controlada y homogénea, dando lugar a la formación de cristales más pequeños, lo cual, es deseable para conservar mejor la textura de las muestras.

De manera similar, en el caso del tomate, se obtuvieron las curvas de congelación con y sin agitación utilizando el mismo sistema termoelectrico descrito en la

metodología. La Figura 3.10 muestra las curvas correspondientes a concentraciones de 20, 30 y 40% con agitación. Se observó que el punto de congelación inicial a concentración de 6.5% sólidos es de -0.6°C . A concentraciones de 20, 30 y 40% son de -0.108 , -0.130 y -0.142°C . Mientras que, la figura 3.11 sin agitación a 6.5% sólidos fue de -0.6°C , en cuanto en las concentraciones de 20, 30 y 40% el punto de congelación inicial fueron de -0.12 , -0.392 y -0.458°C .

De acuerdo con Masuda *et al.* (2022) quienes mencionan que el efecto de la agitación en soluciones acuosas de sacarosa a diferentes concentraciones es un factor dominante para la transferencia de calor y la tasa de producción de hielo durante la congelación-concentración de suspensión. Además, concluyó que las muestras congeladas con mayor velocidad de agitación, se fundió a menor temperatura, afectando el grado de subenfriamiento, excepto en bajas concentraciones de sacarosa.

En la Tabla 3.8 presenta una comparación de la cantidad de sólidos en tomate a diferentes concentraciones con y sin agitación

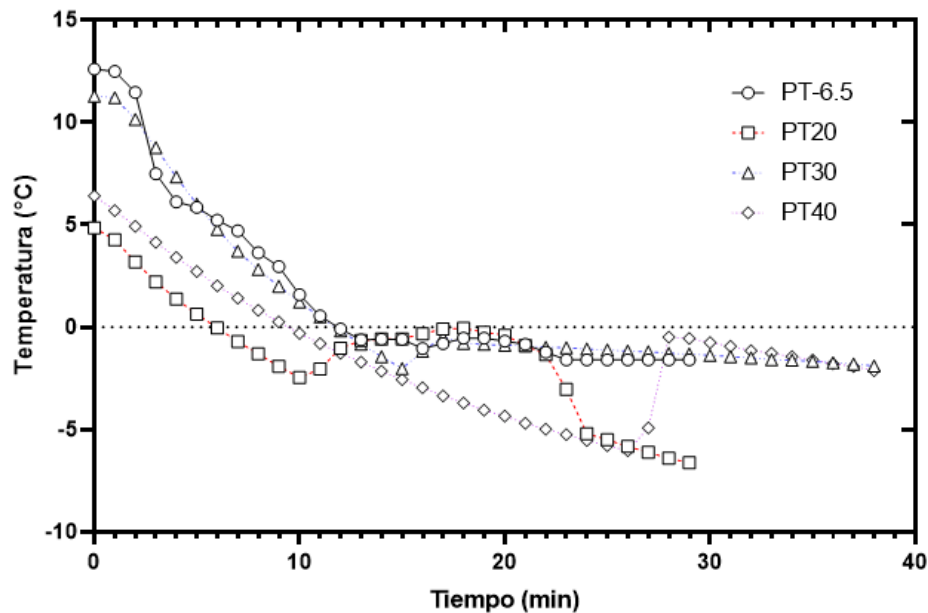


Figura 3. 10. Curvas de congelación de pulpa de tomate natural sin agitación a 6.5 sólidos, 20, 30 y 40%

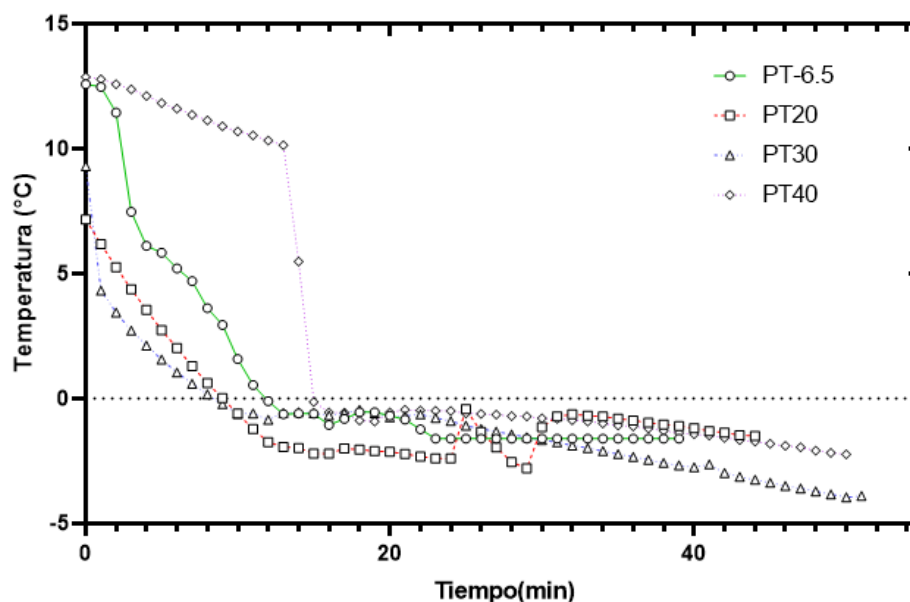


Figura 3. 11. Curvas de congelación de pulpa de tomate con agitación al 6.5, 20, 30 y 40% sólidos.

Tabla 3. 8. Temperatura de congelación inicial en pulpa de tomate en el ICSR

Muestra de pulpa de tomate (% sólidos)	T _{c.i} (°C)	T _{c.i} (°C)
	(0 rpm)	(5 rpm)
6.5	-0.6	-0.6
20	-0.108	-0.12
30	-0.13	-0.392
40	-0.142	-0.458

Se puede observar que, al aplicar agitación, permite mejorar la eficiencia de nucleación y una congelación constante. Indicando que el ICSR favorece la homogeneidad térmica, promoviendo una cristalización más controlada, conservando la estructura celular y los compuestos bioactivos durante el proceso.

De acuerdo a Jayawardena *et al.* (2017), mencionan que la disminución del punto de congelación está directamente relacionada con la concentración de solutos

disueltos en el solvente. Es por eso por lo que, el comportamiento del punto de congelación en el mesocarpio de sandía y en la pulpa de tomate puede explicarse en función de su composición química, particularmente el contenido de azúcares y sólidos solubles, además de la influencia de la agitación durante la congelación. De acuerdo con Auleda *et al.*, (2008) hace una comparación de manzana, pera y durazno, concluye que, la depresión del punto de congelación a medida que aumenta la concentración de sólidos solubles ($^{\circ}$ Brix). Esto se debe a la presencia de azúcares como glucosa, fructosa y sacarosa, los cuales interfieren en la formación de cristales de hielo y provocan una disminución de la temperatura a la cual ocurre la congelación. Esto observado en el mesocarpio de sandía, el contenido de azúcares contribuyó una mayor depresión del punto de congelación. A medida que se incrementó la concentración de sólidos, hubo una disminución en la $T_{c,i}$, lo cual, se asocia directamente en el efecto coligativo de estos solutos.

En el tomate, a diferencia del mesocarpio de sandía, contiene cantidades diferentes de compuestos que afectan la forma en el que agua se separa durante la formación de hielo, modificando el punto de congelación inicial y la eficiencia del proceso. De acuerdo con Liu *et al.* (1999), el aumento de velocidad de agitación y la reducción de la velocidad de avance del frente de hielo disminuye la constante partición efectiva y mejora el rendimiento de la congelación-concentración.

3.4.2 Tiempo de congelación inicial y fracción hielo

Diversos autores como Arias-Giraldo *et al.* (2020) y Machado-Velasco *et al.* (2008), implementaron ecuaciones en la predicción de tiempo de congelado, la cantidad de hielo y el punto de congelación inicial. A partir de las curvas experimentales de mesocarpio de sandía y pulpa de tomate (Figura 3.2 y 3.3), se determinó el tiempo necesario de congelación por medio de la ecuación de Plank (Ec. 2.16). El tiempo de congelación inicial experimental del mesocarpio de sandía fue a los 15 min, mientras que, por la ecuación de Plank se estimó a los 10 min, dando así, un margen de error del 33%. En el caso de la pulpa de tomate, por medio de la ecuación de Plank se estima $t_{c,i}$ de 8 min 30 s es el punto de congelación inicial, mientras que experimental, se aprecia que el punto inicial de congelación es de 15 min, dando un margen de error del 44.6%.

Dos factores que influyen en los resultados es el estado de madurez del fruto y las condiciones de la congelación. Al disminuir la temperatura el agua que compone los frutos, al entrar a un cambio de fase, hace que el agua que está disuelta se cristalice dando un aumento en fracción hielo y así, el agua no congelada, disminuye. En la Tabla 3.10 se aprecian los datos obtenidos de tiempo de congelación, fracción hielo y el porcentaje de error que tiene la ecuación de Plank mencionada anteriormente.

Tabla 3. 9 Tiempo de congelación inicial en mesocarpio de sandía y pulpa de tomate.

Muestra	T inicial	t _{c,i} teórico (min)	t _{c,i} experimental (min)	% Error	X _{m,hielo}
Mesocarpio de sandía	8	10	15	33	0.304
Pulpa de tomate	8	8.3	15	44	0.313

La formación de hielo está determinada por la interacción entre el agua disponible y los sólidos disueltos presentes en la mezcla. A medida que aumenta la concentración de sólidos, como en los casos de 30 y 40%, se observa una mayor resistencia a la cristalización, debido a los solutos que provocan la depresión del punto de congelación, dando el inicio a la formación de hielo. Esto afecta a la forma y tamaño de los cristales de hielo. Cuando se somete en congelación y se encuentra en estado estacionario las condiciones físicas como temperatura y concentración permanecen constantes, esto tiende a ser más uniforme. Mientras que, con agitación las condiciones se vuelven dinámicas debido al movimiento continuo permitiendo cristales pequeños siendo más firmes y uniformes, además que la agitación mejora la transferencia térmica.

Esto se puede observar en la Figura 3.12 y Figura 3.13. Sin agitación se ve una estructura más uniforme y hay niveles de opacidad diferentes. Con agitación se observan estructuras más distribuidas y patrones radiales debido a la cuchilla, permitiendo una mayor redistribución del agua dentro del mesocarpio durante la congelación. El efecto de la agitación genera estructuras más dispersas y menos

uniformes, permitiendo una mezcla homogénea y una mejor distribución de cristales.

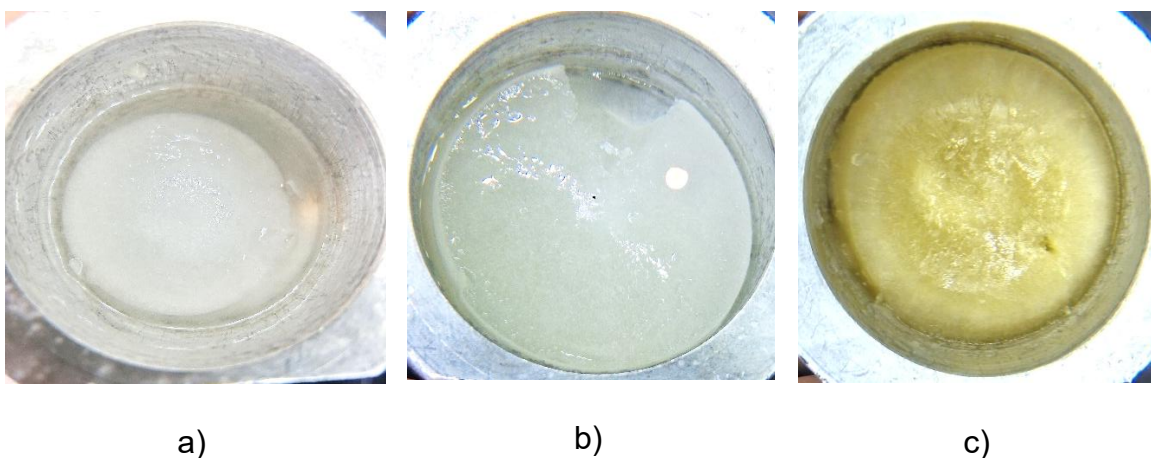


Figura 3. 12. Mesocarpio de sandía sin agitación: a) 20, b) 30 y c) 40%

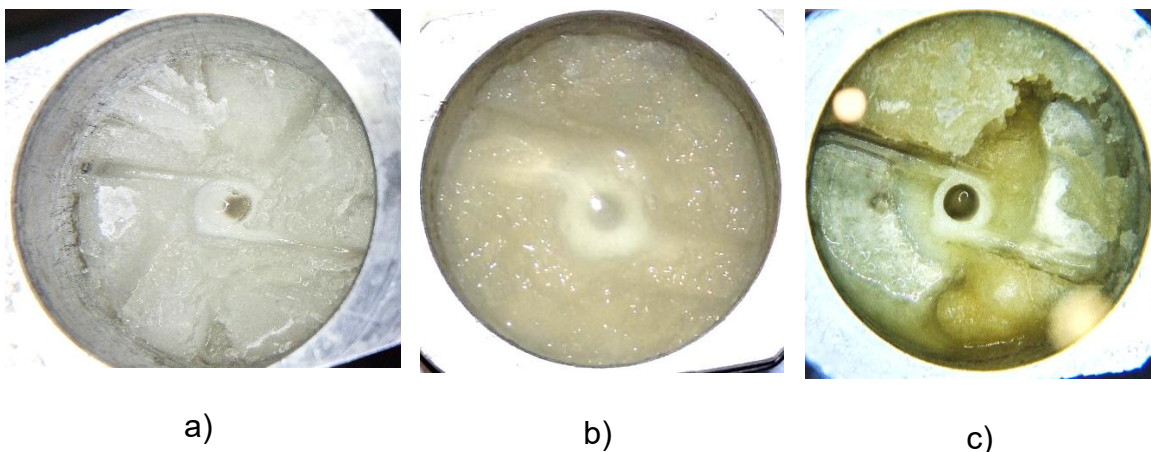


Figura 3. 13. Mesocarpio de sandía con agitación: a) 20, b) 30 y c) 40%

En la pulpa de tomate, se aprecia en las Figuras 3.14 y 3.15 observaciones notorias, sin agitación, la concentración, se aprecia que hay una separación entre el líquido y los sólidos. En (c) hay mayor acumulación de sólidos y la textura es más densa. En cuanto con agitación se aprecian los patrones radiales, señalando la redistribución del agua y los sólidos. En (c) se aprecia la muestra más fragmentada y una textura más homogénea, debido a la formación de cristales de hielo distribuidos y la composición densa del tomate.

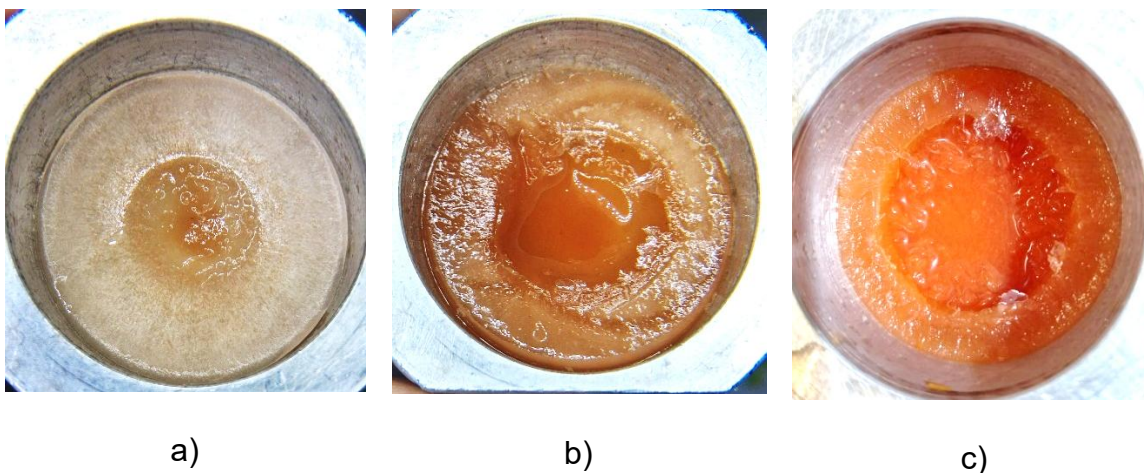


Figura 3. 14. Pulpa de tomate sin agitación: a) 20, b) 30 y c) 40%

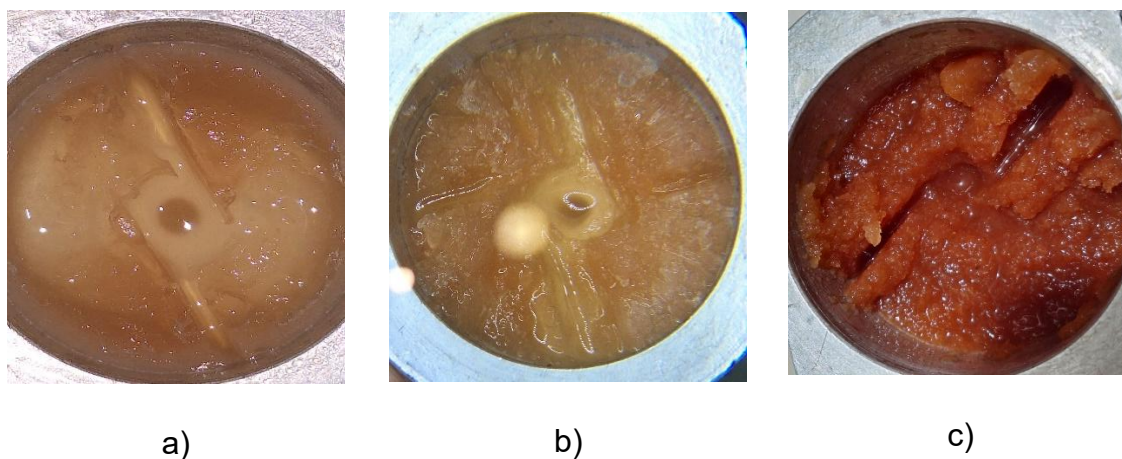


Figura 3. 15. Pulpa de tomate con agitación: a) 20, b) 30 y c) 40%

Para el análisis morfológico de los cristales de hielo que se formaron durante el proceso de congelación, se empleó un microscopio óptico equipado con un objetivo de 10x, lo que permitió observar detalles en estructura de los cristales en cuanto a su formación. Se ajustó cuidadosamente para resaltar la estructura de los cristales generados en cuanto la concentración de sólidos disueltos y el uso de la agitación.

Las imágenes capturadas permitieron apreciar la morfología y la homogeneidad de los cristales de mesocarpio de sandía y pulpa de tomate. Se muestran cómo las

condiciones experimentales afectan el tamaño y la distribución de cristales, lo cual es crucial para comprender dicho comportamiento.

En las micrografías de mesocarpio de sandía (Figuras 3.16 y 3.17), se observa que, sin agitación, los sólidos se encuentran más dispersos, y con formas y tamaños variados. En cambio, bajo condiciones de agitación, el resultado mecánico favorece la redistribución y homogeneización de los solutos. Este proceso da lugar a estructuras más uniformes, donde los compuestos adoptan una morfología esférica y tamaños similares

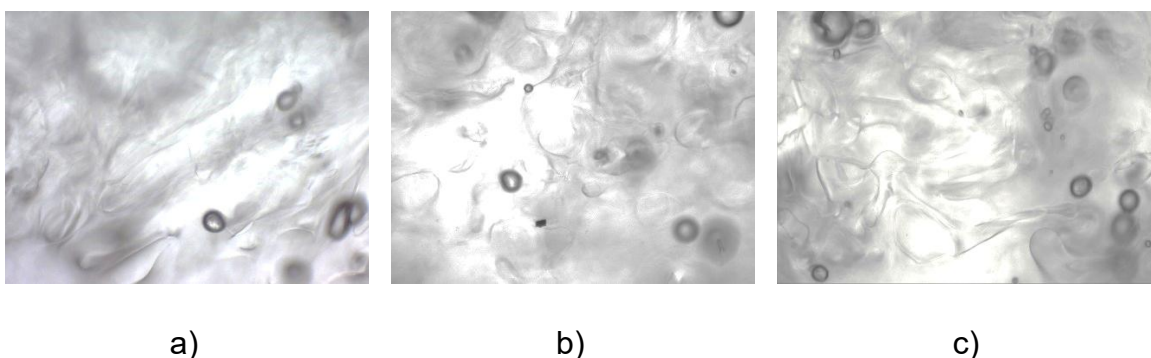


Figura 3. 16. Micrografías de mesocarpio de sandía sin agitación: a) 20, b) 30 y c) 40%

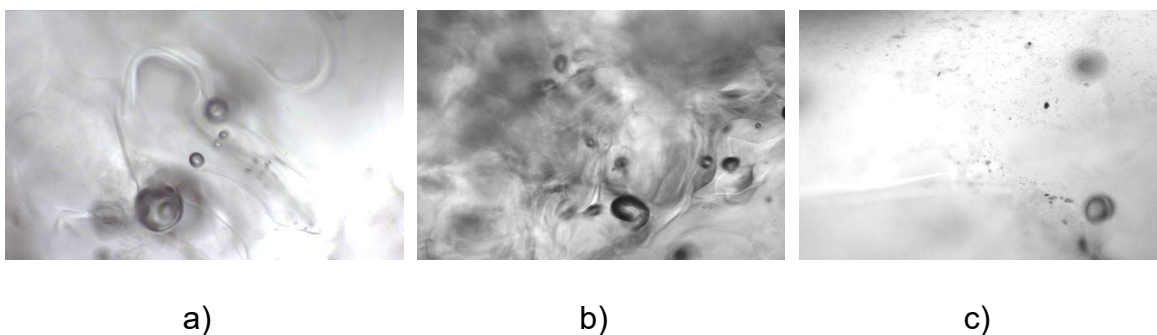


Figura 3. 17. Micrografía de mesocarpio de sandía con agitación: a) 20, b) 30 y c) 40%

En el caso del tomate, se aprecia, en las micrografías (Figura 3.18) sin agitación y con agitación (Figura 3.19), diferencias significativas en la disposición y distribución de los componentes estructurales indicando que la agitación influye en la microestructura de la pulpa. En las muestras sin agitación, las esferas que

representan la concentración son de tamaños diferentes y juntos como se observa en la concentración de 40%, las esferas son más grandes y menos dispersas, lo que puede estar asociado a la tensión interfacial entre los componentes del tomate que le dan una textura aceitosa. Mientras con agitación, se observa las esferas al mismo tamaño, indicando una reducción a la tensión interfacial. Esto evidencia que la agitación tiene un papel importante en cuanto a la estabilidad estructural, modificando la interacción entre las fases.

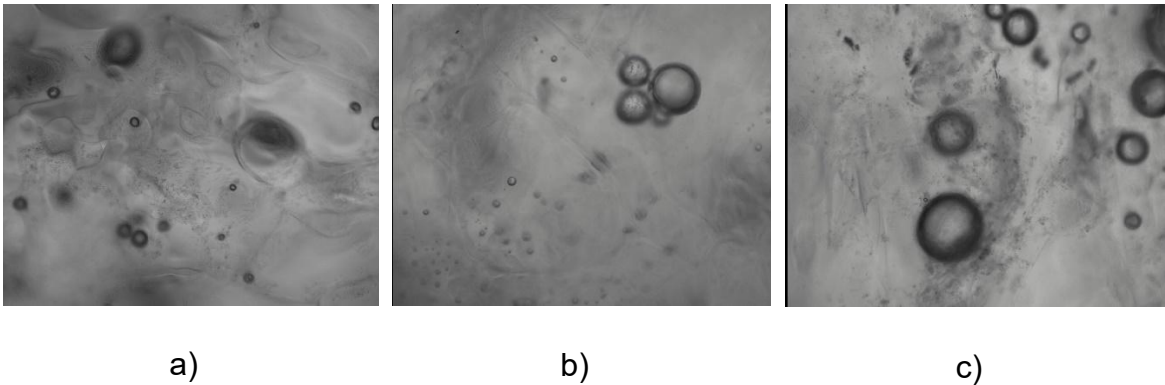


Figura 3. 18. Micrografía de pulpa de tomate sin agitación: a) 20, b) 30 y c) 40%

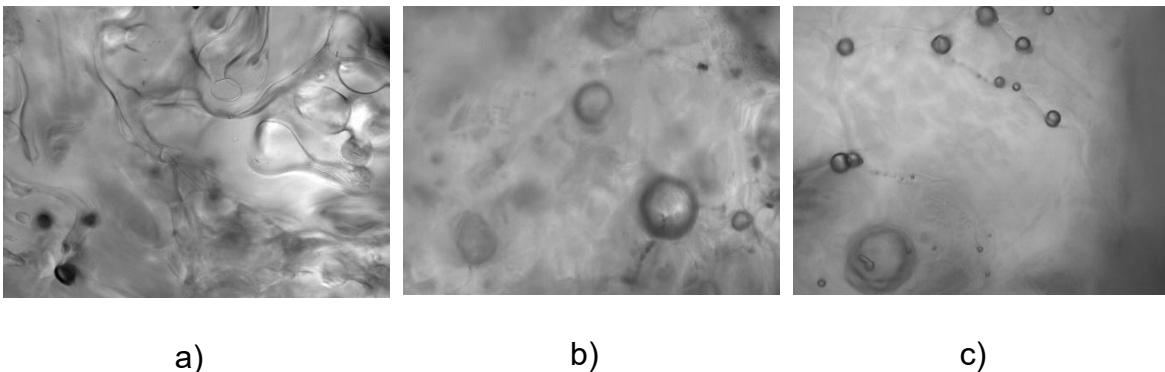


Figura 3. 19. Micrografía de pulpa de tomate con agitación: a) 20, b) 30 y c) 40%

Para determinar si existen diferencias significativas en la estructura tanto de mesocarpio de sandía y pulpa de tomate con y sin agitación, se realizó prueba t de Student para comparar las características microestructurales observadas en las micrografías en donde se analizaron variables el tamaño de las esferas dispersas.

Con base en los resultados, para mesocarpio de sandía a 20% al tener un valor p en la prueba de dos colas (0.3782) es mayor que 0.05 indica que no hay diferencia significativa entre las muestras a comparación de 30%, el valor p es de 0.8451, demostrando que no hay un cambio notable en la estructura del mesocarpio pero, a 40% el valor p fue de 0.0153 indicando una diferencia entre las muestras con y sin agitación, indicando que la agitación tuvo un efecto importante en la estructura el mesocarpio, relacionando a la distribución celular, contenido de sólidos y separación de fases.

Los resultados obtenidos en pulpa de tomate, en 20, 30 y 40% de sólidos, los valores de p fueron 0.115, 0.07 y 0.522, respectivamente. Estos valores son mayores a 0.05, lo que indica que no hubo diferencias significativas entre las condiciones evaluadas, es decir, que la agitación no tuvo un efecto notable sobre la variable analizada en estos casos.

Sin embargo, a pesar de la falta significancia estadística, las micrográficas de las esferas en diferentes concentraciones de pulpa de tomate mostrando diferencias visuales en términos de tamaño y forma. En las imágenes obtenidas, se observaron cambios sutiles en la estructura de las esferas con el aumento de concentración, aunque no fueron suficientemente grandes como para generar una diferencia estadísticamente significativa.

3.5 Validación por FTIR del contenido de nutrientes

En el análisis de los espectros de mesocarpio de sandía, se evaluó la presencia de compuestos fenólicos antes y después de almacenarse como se observa en la Figura 3.20, donde existe presencia de licopeno en el rango de número de onda de 1029 cm^{-1} , de acuerdo con Earlyna (2018), reportaron presencia de este compuesto en una longitud de 960 a 1498.86 cm^{-1} y de acuerdo a lo reportado, los datos experimentales se validan, señalando que existe presencia de licopeno luego de ser almacenado en tiempo estándar. En cuanto a los compuestos fenólicos, los datos reportados de Bichi *et al.* (2022) reportan presencia de polifenoles en longitud de onda de $3819\text{-}3946\text{ cm}^{-1}$, en los datos experimentales no se aprecia a simple vista, realizando el área bajo la curva permitió detectar la presencia de estos compuestos,

antes de almacenar es de 0.104 y después de almacenar es de 0.084, demostrando que en las curvas existe presencia de compuestos fenólicos que no son fácilmente visibles.

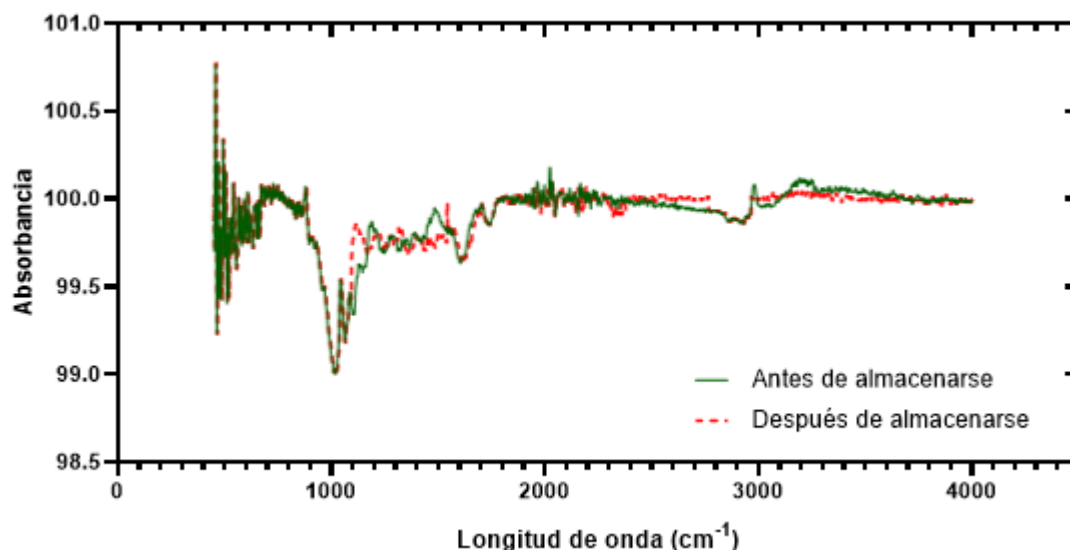


Figura 3.20. Espectros FTIR de mesocarpio de sandía antes y después de almacenarse

De la misma forma, se analizaron los espectros de pulpa de tomate (Figura 3.21), en la determinación de licopeno en la longitud de onda, se obtuvo un valor de 10319 cm⁻¹. Con los datos reportados por Earlyna (2018) encontraron presencia en longitud de onda en 960 cm⁻¹, además de entre 1498 a 1537 cm⁻¹. En cuanto a la identificación de compuestos fenólicos, hay ligera presencia entre los rangos de 2700 a 3100 cm⁻¹. Los datos reportados de Muhammad *et al.* (2022), reportan que hay presencia de compuestos fenólicos en tomate en la longitud de onda entre 3000 a 3100 cm⁻¹, comparando con los datos experimentales, se determinó el área bajo la curva en la determinación de estos compuestos, observando que, si hay presencia de nutrientes que a simple vista no se aprecian. Realizando el área bajo la curva permitió detectar la presencia de estos compuestos, antes de almacenar es de 0.1048 y después de almacenar es de 0.0089, demostrando que en las curvas existe presencia de compuestos fenólicos que no son fácilmente visibles.

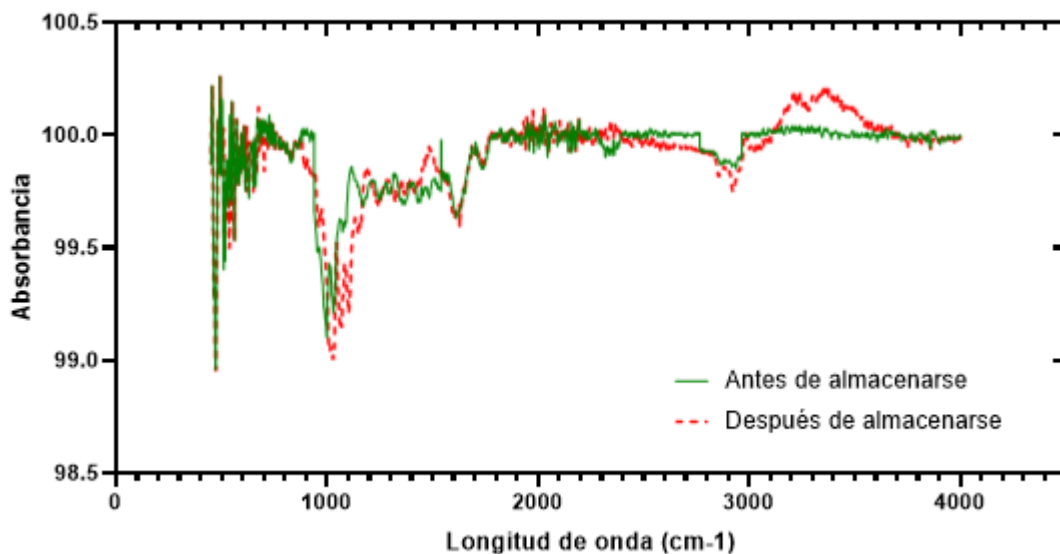


Figura 3. 21. Espectros FTIR de pulpa de tomate antes y después de almacenarse

En la tabla 3.4 se presenta los componentes identificados en el mesocarpio de sandía, proporcionando detalles como el número de onda y el tipo de pico asociado a cada componente identificado y en la tabla 3.5 los compuestos identificados para la pulpa de tomate.

Cabe mencionar que, la acidez del alimento, así como el contenido de sólidos solubles, influyen directamente en su composición en la pérdida y extracción de compuestos fenólicos en la velocidad de reacción. (Price-Passalcqua *et al.* 2017).

3.6 Regresión lineal

El color es un factor importante en cuanto a la valoración física para mediciones y obtener valores comparables en medición de color para el almacenamiento a largo. A continuación, en la Figura 3.22 la comparativa entre L^* , a^* y b^* para mesocarpio de sandía, y 3.23 para pulpa de tomate.

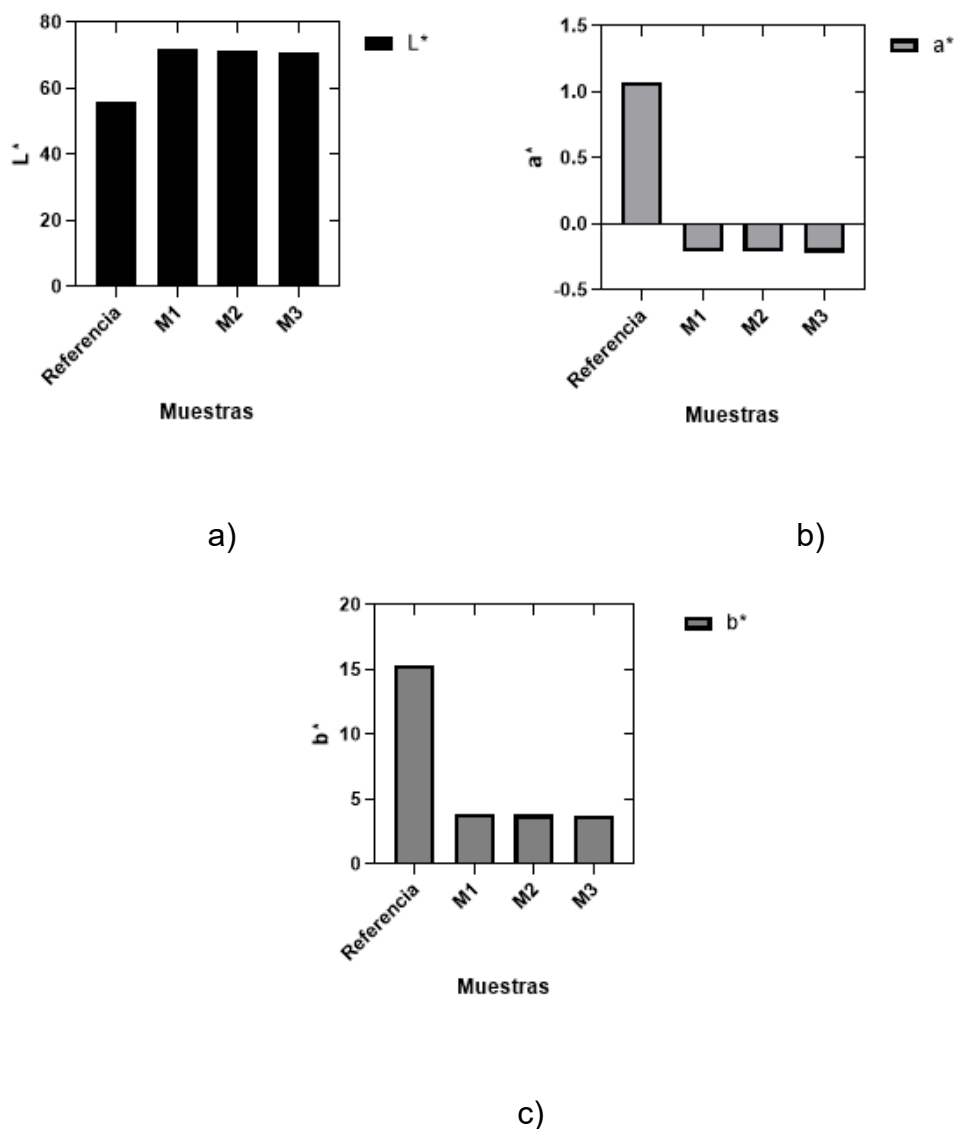


Figura 3. 22. Medición de color de mesocarpio de sandía fresco como referencia y muestra por triplicado de congelación donde: a) Luminosidad, b) tonalidades verdes a rojas y c) azul a amarillo

En luminosidad, las muestras congeladas demuestran tener mayor luminosidad y una desviación estándar de 7.71, indicando que si hay diferencia entre las muestras y el dato referencia, a partir de la luminosidad, las mediciones en a^* hay una disminución de color rojo a verde con una desviación de 0.64 y b^* hay disminución en la tonalidad amarilla hacia el azul, con una desviación de 5.75. Esto indica que

depende a las condiciones que se encuentra y a su almacenamiento, puede tener ligeras pérdidas de color.

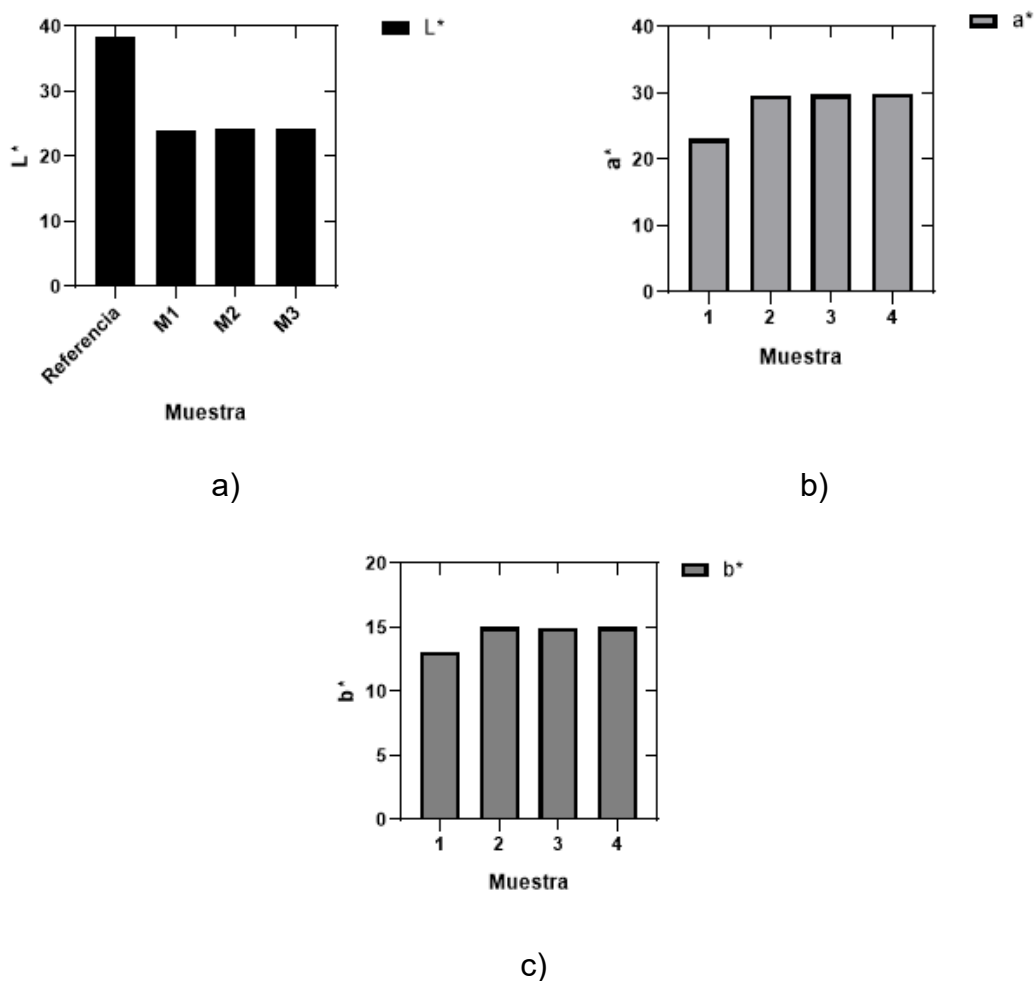


Figura 3. 53. Medición de color de pulpa de tomate fresco como referencia y muestra por triplicado de congelación donde: a) Luminosidad, b) tonalidades verdes a rojas y c) azul a amarillo.

Para la pulpa de tomate, la luminosidad disminuye en cuanto es sometido a congelación con una desviación de 7.06, mientras la tonalidad roja es mayor que la referencia con una desviación de 3.304 de la misma manera sucede con la tonalidad amarilla con la diferencia de 0.955, esto demuestra que, la pulpa de tomate mantiene su tonalidad durante la congelación.

Estas propiedades térmicas, cambian con respecto al cambio de fase, y en consecuencia puede haber variaciones dependiendo lo analizado. A partir de los datos experimentales, se determinó una regresión no lineal en la conductividad térmica del mesocarpio de sandía y pulpa de tomate. Las ecuaciones obtenidas son las siguientes:

$$k = -1.080e^{-0.05T^2} + 0.001767 T + 0.5381 \quad (3.1)$$

$$k = -6.42e^{-6T^2} + 0.001712 T + 0.5382 \quad (3.2)$$

Y por medio de la ecuación de Fikiin, se tabuló y se ajustaron los datos experimentales mediante regresión no lineal con respecto a la temperatura, como se puede observar en la figura 3.24 para mesocarpio de sandía y pulpa de tomate.

$$k = 1.429 \left(1 - \frac{T_f}{T}\right) \quad (3.3)$$

$$k = 1.437 \left(1 - \frac{T_f}{T}\right) \quad (3.4)$$

De esta forma, se determinaron estimaciones de capacidad calorífica utilizando las ecuaciones ya empleadas para ambas muestras, obteniendo un ajuste en las curvas, coincidiendo con los datos experimentales, como se observa en la Figura 3.25

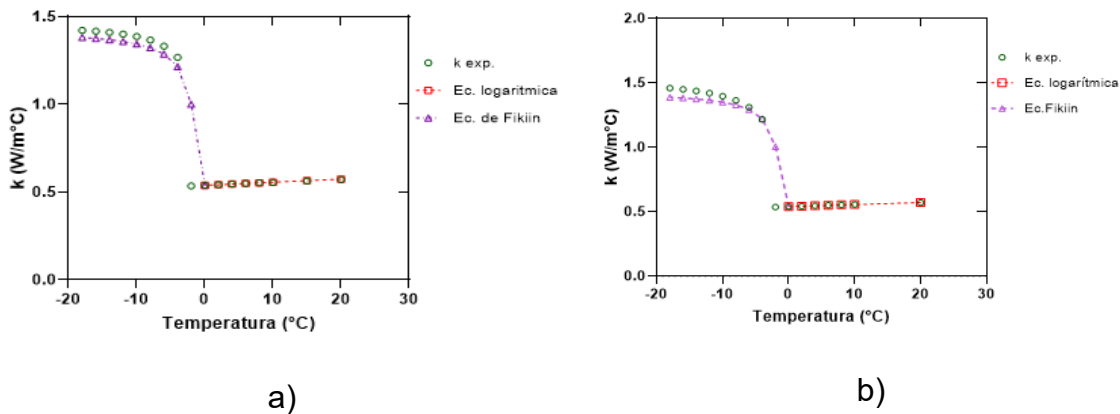


Figura 3. 64. Comparación entre los datos experimentales y teóricos de la conductividad térmica de mesocarpio de sandía y pulpa de tomate a diferentes temperaturas

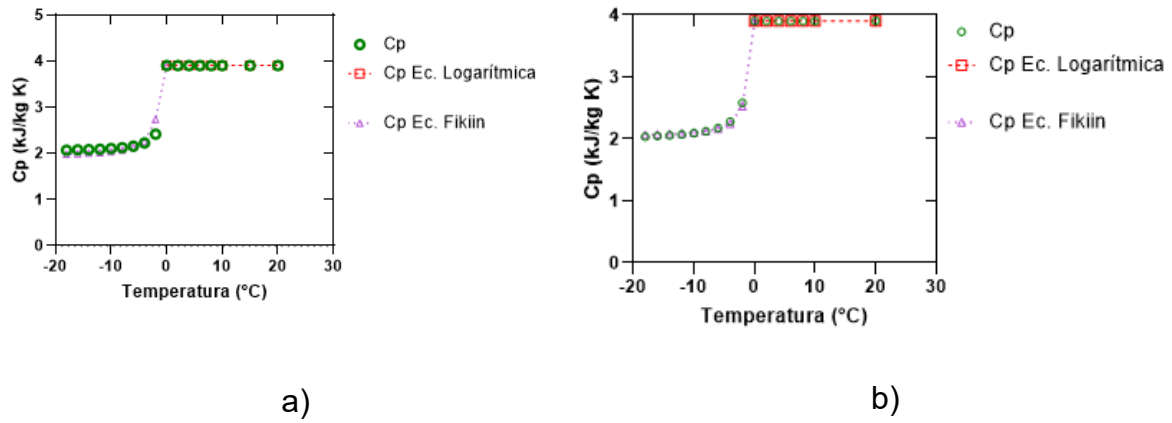


Figura 3. 25. Comparación entre los datos experimentales y teóricos de la capacidad calorífica de mesocarpio de sandía y pulpa de tomate a diferentes temperaturas.

CONCLUSIONES

Se analizaron los nutrientes mediante la determinación de carotenoides totales, antocianinas, polifenoles de 5.01, 34.32, 0.027 y 0.008 en soluciones de mesocarpio de sandía y 5.14, 29.39, 0.027 y 0.062 en pulpa de tomate natural. La determinación del licopeno en las muestras se realizó mediante FTIR, se identificó el licopeno y compuestos fenólicos en mesocarpio de sandía de 1029 cm^{-1} y entre $3819\text{-}3946\text{ cm}^{-1}$ a pequeña cantidad después de almacenar y en pulpa de tomate fue de 10319 cm^{-1} y entre $3000\text{-}3100\text{ cm}^{-1}$. La determinación de las propiedades termodinámicas en soluciones monofásicas y difásicas fueron teóricas en función de la concentración de sólidos del 20, 30 y 40%, en mesocarpio de sandía, su C_p , ρ , k y α fueron de 2.223 J/kg K , 962.23 Kg/cm^3 , 1.266 W/m K y $1.01 \times 10^{-6}\text{ m}^2/\text{s}$, mientras que pulpa de tomate 2.23 J/kg K , 962.23 Kg/cm^3 , 1.266 W/mK y $1.10 \times 10^{-7}\text{ m}^2/\text{s}$. Esto permite comprender, los cambios de estado y transferencia de calor, estimar parámetros teóricos como tiempo de congelación, punto de congelación inicial, fracción de masa de hielo y fracción líquida restante de la suspensión en congelación.

El desarrollo y validación de un intercambiador de calor de superficie raspada (ICSR) acoplado a un sistema termoeléctrico (TEM) tipo Peltier permitió obtener una herramienta eficiente para estudiar la congelación de suspensiones alimenticias como el mesocarpio de sandía y la pulpa de tomate en distintas concentraciones de sólidos. Se emplearon muestras de mesocarpio con concentraciones de 8.49, 20, 30 y 40% (M-8.49, M20, M30 y M40) y de pulpa de tomate con 6.5, 20, 30 y 40% (PT-6005, PT20, PT30 y PT40). El monitoreo con sensores de temperatura permitió registrar curvas de congelación con y sin agitación, evidenciando diferencias significativas en la formación de cristales de hielo y la disipación de calor.

El mesocarpio de sandía, se observó una depresión del punto de congelación conforme aumentó la concentración de sólidos, con una $T_{c,i}$ de -0.73°C para M-8.49 sin agitación y de -0.30 , -0.47 y -0.53°C para M20, M30 y M40 con agitación respectivamente. Este comportamiento confirma el fenómeno en el punto de

congelación, resultado del incremento de solutos como azúcares. De igual forma, en pulpa de tomate, la $T_{c,i}$ para PT-6.5 fue de -0.6°C sin agitación mientras que PT20, PT30 y PT40 se registraron de -0.12 , -0.392 y -0.458 , confirmando también la influencia directa del contenido de sólidos con respecto a la temperatura.

Las micrografías obtenidas revelaron que, en condiciones sin agitación, los sólidos mostraron una dispersión irregular con tamaños variados, mientras que, con agitación, hubo mayor homogeneidad, presencia de estructuras esféricas de tamaño uniforme, indicando un control térmico más eficiente durante la cristalización. Demostrando que añadir velocidad en agitación, mejora la eficiencia en la formación y separación de cristales.

Las condiciones experimentales del ICSR con sistema TEM permitió la congelación del sistema hasta -9°C en 3h 30min, este sistema permite controlar la temperatura para frutas y verduras entre -0.2 a -1.2°C aunque es factible de utilizar en jugos o concentrados de proteínas de carnes y pescado -4°C , esto para asegurar la cadena de la congelación de soluciones y suspensiones alimentarias, por lo que, se pueden realizar infinidad de ensayos para otras matrices alimentarias (sopas, caldos, etc). Esta tecnología es segura y eficiente para la caracterización de sistemas difásicos no necesariamente alimentarios.

RECOMENDACIONES

1. Realizar ensayos con un motor reductor de mayor capacidad de torque ($5 < N < 30$ rpm), asegurar la linealidad del eje ante el incremento de N , es importante para evitar forzar el motor ante un roce con la pared.
2. Proporcionar otros termopozos para incrementar las señales de temperatura en la pared de intercambio, así como un mejor aislamiento de la cara caliente del resto del equipo.
3. Acoplar y validar una segunda celda Peltier para incrementar la rapidez de congelación.
4. Adecuar el contenedor de acero inox. con termopozos para utilizar en otros ensayos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Abdel-Rahman, A. (1982). Nutritional value of some canned tomato juice and concentrates. *Food Chemistry*. 9(4) 303-306. DOI: [https://doi.org/10.1016/0308-8146\(82\)90082-6](https://doi.org/10.1016/0308-8146(82)90082-6)
2. Afshari F.(2020). Experimental Study for Comparing Heating and Cooling Performance of Thermoelectric Peltier. *Politeknik Dergisi*, 23(3) 889-894. DOI: <https://doi.org/10.2339/politeknik.713600>
3. Agnieszka, C., Julita, F., Hanna, K., Jolanta, K., Sabina, G., Agata, M. y Ewa, D. (2021). The effect of Pre-Treatment (Blanching, Ultrasound and Freezing) on Quality of Freeze-Dried Red Beets. *Foods* 2021. 10(1), 132. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods10010132>
4. Ahsen, R. E., Murat, Y. y Taner, B. (2020). The effects of the novel home freezing system on microstructure, color, antioxidant activity and microbiological properties of strawberries. *International Journal of Refrigeration*. 12(1), 228-234. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijcefrig.2020.10.013>
5. Ali, Y., Ali A., Saif, S., Nessa, L., Tanvir, E.M., Kabir, A., Khalil, I. y Hua, S. (2020). Nutritional Composition and Bioactive Compounds in Tomatoes and Their Impact on Human Health and Disease. *Foods* 2020 Dec. 10(1) 45. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods10010045>
6. Ameyalli, R. (2023). Cuál es el PH de los alimentos y su importancia en la alimentación. *Animal Gourment*. <https://www.animalgourment.com/2024/01/03/cual-es-el-ph-de-los-alimentos-sy-importancia>. (Consultada en Abril 2024).
7. Ángeles, R. A. y Márquez, J. E. (2005). Estudio de las características de los sistemas termoeléctricos y su aplicación en refrigeración. Tesis de Licenciatura. Instituto Politécnico Nacional.
8. Arias-Giraldo, S., Ceballos, A.M, Gutiérrez, L.F. (2020). Evaluación de los parámetros del proceso de congelación para la pulpa de Acaí. *Tecnológicas*, Vol. 22, No.46. 2019. Colombia. ISSN: 0123-7799, DOI: 10.224430/22565337.1117

-
9. ASHRAE (2018). Propiedades térmicas de los alimentos. En ASHRAE Handbook – Refrigeración (Capítulo 19). Sociedad Americana de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado. <https://www.ashrae.org>. (Consultado en Abril 2024)
 10. Asyiqin, N.A., Fadzly, M.K. y Amarul T.(2019). Thermoelectric portable mini fridge using Arduino Uno Temperature Control. AIP Conference Proceedings. 2129 (1)1-8 . DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5118153>
 11. Augustia, VAS., Oktaviani, II y Setyati, W. (2020). Anthocyanin and Flavonoid Extracted from Watermelon rind (*Citrullus lanatus*) with two Different Colors of Watermelon Flesh: Yellow and Red. Materials Science Forum, 998, 261-265. DOI: [10.4028/www.scientific.net/MSF.998.261](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.998.261)
 12. Auleda, J. M., Hernández, E. y Raventós, M. (2008). Modelo para la predicción de puntos de congelación de Zumos. Congreso Español de Ingeniería de Alimentos. pp. 1-8.
 13. Badui, S. (2006). Química de los alimentos. Cuarta edición. PEARSON EDUCACIÓN. 14-15. ISBN: 970-26-0670-5
 14. Barreiro, J.A. y Sandoval, A, J. (2006). Operaciones de conservación de alimentos por bajas temperaturas. Editorial EQUINOCCIO. ISBN: 980-237-210-2
 15. Becker, B. R., y Fricke (2003). FREEZING | Principles. Encyclopedia of Food Sciences and Nutrition, 2706-2711. DOI: <https://doi.org/10.1016/b0-12-227055-x/00521-6>
 16. Belscak-Cvitanovic, A., Durgo, K., Hudek, A, Bacun-Druzina, V. y Komes, D. (2018). Overview of polyphenols and their properties. Polyphenols: Properties, Recovery and Application, 3-44. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813572-3.00001-4>
 17. Berthomieu, C. y Hienerwadel, R. (2009). Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy. Photosynth Res. 101(2-3) 157-170. DOI: [10.1007/s11120-009-9439-x](https://doi.org/10.1007/s11120-009-9439-x).
 18. Bhattacharjee, C., Dutta, S. y Saxena, V. K. (2020). A review on biosoptive removal of dyes and heavy metals from wastewater using watermelon rind as

-
- biosorbent. *Environmental Advances*. 2(1), 2666-7687. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.envadv.2020.100007>
19. Bichi, S. A., Abdulmumin, Y., Abdulmumin, T. M., Muhammad, I.A., Murtala, M., Dalhatu, M. M., Amina, L. A., Sarki, S. I., Danjaji, H. I. y Mustapha, R. K. (2022). GC- MS and FTIR analysis of Aqueous Extract of *Citrullus lanatus* (watermelon) Rind. *Scholars International Journal of Biochemistry*. 5 (4), 57-66. DOI: <https://doi.org/10.36348/sijb.2022.v05i04.001>
20. Cantero, M. E., Romagoza, R. P., De la Quadra, V. M, Haim, L. A., Ramón, A. J. y Villalobos, R. A. (2018). Conversión de calor en trabajo mediante unidad termoelectrica Peltier. Academia. https://www.academia.edu/42982104/conversion_de_calor_en_trabajo_mediante_unidad_termoelectrica_peltier. (Consultado en Abril 2024).
21. Carbajal, A. (2013). Manual de Nutrición y Dietética. Universidad Complutense de Madrid. Link: <https://www.ucm.es/nutricioncarbajal/>
22. Castellón, J. K y Talavera, R. J. (2012). Sistema de Producción Agrícola.. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua
23. Carranco, M.E., Calvo, M. y Pérez, F. (2011) Carotenoides y su función antioxidante: Revisión. *ALAN*. 61(3) 233-241. ISSN: 0004-0622
24. Cengel, Y. A. (2007). Transferencia de calor y masa. McGraw-Hill Interamericana. ISBN-13: 978-970-10-6173-2. Pp. 3-4.
25. Chavan, P., Sidhu, G.K., Jaiswal, A.K. (2022). Performance Evaluation of Mobile Liquid Cooled Thermoelectric Refrigeration System for Storage-Cum-Transportation of Fruit and Vegetables. *Foods*. 11 (13) 1-18. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods11131896>
26. Chen, X.D. y Chen, P. (1996). Freezing of aqueous solution in a simple apparatus designed for measuring freezing point. *Food Research International*, 29(8) 723-729. ISSN: 0963-9969. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0963-9969\(97\)0.0008-2](https://doi.org/10.1016/S0963-9969(97)0.0008-2).
27. Cruz, R.M., González, J. y Sánchez, P. (2013). Propiedades funcionales y beneficios para la salud del licopeno. *Nutrición Hospitalaria*. 28(1) 6-15. DOI: <https://dx.doi.org/10.3305/nh.2013.28.1.6302>

-
28. Dalmau, E., Araya-Farias, M. y Ratti, C. (2024). Cryogenic Pretreatment Enhances Drying Rates In Whole Berries. *Foods* 2024. 13(10), 1-17. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods13101524>
29. Dani, A. B., Oktiani, R. y Ragadhita, R. (2019). How to read an interpret FTIR Spectroscope of organic material. *Indonesian Journal of Science & Technology*. 4 (1), 97-118. DOI: <https://doi.org/10.17509/ijost.v4i1.15806>
30. Degwale, A., Asrat, F., Eniyew, K., Asres, D., Tesfa, T. y Ayalew, A. (2022). Influence of Dehydration Temperature and Time on Physicochemical Properties of Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) Powder. *Front. Sustain. Food Syst.* 6 (22) 1-9 DOI: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.839385>
31. De la Rosa, X., García-León, I., Hernández-Mendoza, J., Morales-Baquera, J. y Quiroz-Velásquez, J. D. (2022). Antocianinas, propiedades funcionales y potenciales aplicaciones terapéuticas. *Revista Boliviana de Química*. 39 (5), 1-9. DOI: <https://doi.org/10.34098/2078-3949.39.s1>
32. Del Campo, M. (2022). Generar frío con una celda Peltier cerámica TEC1-12706. Panamahitek. Link: <https://panamahitek.com/generar-frio-con-una-celda-peltier-ceramica-tec1-12706/>. (Consultado en Enero 2024).
33. Delgado, A., Liyung, Z. y Da-Wen, S., (2009). Influence of Ultrasound on Freezing Rate of Immersion-frozen Apples. *Food Bioprocess Technol.* 2(3) 263-270. DOI: 100.1007/s11947-008-0111-9
34. Díaz, N. A., Bárcena, J., Fernández, Galván, A., Jorrín, J., Peinado, J., Meléndez-Valdés, F. T. y Túnez, I. (2010). 8. Espectrofotetría: Espectros de absorción y cuantificación colorimétrica de Biomoléculas y Biología Molecular. Universidad de Córdoba, pp. 1-8.
35. Downey, G. (1998) Food and food ingredient authentication by mid-infrared spectroscopy and chemometrics, *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 17(7) 418-424. ISSN: 0165-9936. DOI: [https://doi-org.org/10.1016/S0165-9936\(98\)00042-9](https://doi-org.org/10.1016/S0165-9936(98)00042-9).
36. Duchitanga-Torres, P. G. (2018). Análisis de la capacidad antioxidante de frutas y verduras sometidos a congelación y liofilización. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencia y Tecnología.

-
37. Earlyna, S. D. (2018). The new procedure of isolation a Lycopene Compound in Tomatoes (*Lycopersicum Esculentum*) by using chloroform solution. IOSR Journal of Applied Chemistry. 11 (7), 81-83. DOI: <https://doi.org/10.9790/5736-1107018188>
38. Escorza, J. I. (2023). Evaluación del proceso de enlatada sobre las características funcionales y fisicoquímicas de mandarina (*Citrus reticulata*) en almíbar. Tesis de licenciatura. Universidad Técnica del Norte.
39. Esteban-Valdez, H. C. (2018). Manejo de verduras congeladas durante la etapa de venta al detalle-consumo. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.
40. Fairuz, M., Ezzah, N., Shawal, S., Husin, H., Fauzi, M. y Singh, B. (2020). Experimental study of a mini cooler by using Peltier thermoelectric cell. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 788(1) 1-14. DOI: 10.1088/1757-899X/788/1/012076
41. Fellows, P.J. (2009). Heat processing. Food Processing Technology, 339-366. DOI: <https://doi.org/10.1533/9781845696344.3.339>
42. Geankoplis, C.J. (1998). Procesos de transporte y operaciones unitarias. CECSA. University of Minnesota. pp. 244-246.
43. Gobierno de México. (2020). Jitomate, vérsatil y nutritivo. Procuraduría Federal del Consumidor. www.gob.mx/proteco/articulos/jitomate-versatil-y-nutritivo?state=published. (Consultada en Enero 2023).
44. Gutiérrez, I. (2014). Evaluación de los efectos de los ciclos de congelación-descongelación en carne de res mediante técnicas histológicas y electroforéticas. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.
45. Hernández-Guzmán, C. (2015). Bioconversión de flavonoides cítricos utilizando células microbianas enteras. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma Metropolitana.
46. Ilahy, R., Tlili, I., Siddiqui, M. W., Hdider, C. y Salvatore, M. (2019). Inside and Beyond Color: Comparative Overview of Functional Quality of Tomato and

47. Ilzarbe, L., Tanco, M., Viles, E. y Álvarez M.J. (2007). El diseño de experimentos como herramienta para la mejora de los procesos. Aplicación de la metodología al caso de una catapulta. *Tecnura*, 10(20), 127-138. ISSN: 0123-921X. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
48. Jamiul, K. M., Jehan, M., Tahshin, R. y Rahath, M. (2024). A Smart Jacket with Portable Thermoelectric Cooling System. *IOP Conference Series: Science and Engineering*. 1305 (1) 1-11. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/1305/1/012007>
49. Jaramillo, O. A. (2007). Intercambiadores de calor. Centro de Investigación de energía. Universidad Nacional Autónoma de México. pp. 5-6.
50. Jayawardena, J., Vanniarachchi, M. y Wansapala, M. (2017). Freezing point depression of different Sucrose solutions and coconut water. *International Journal of Food Science and Nutrition*. 2(3) 68-71. ISSN: 2455-4898
51. Karoui, R., Downey, G. y Blecker, C. (2010). Mid-infrared Spectroscopy Coupled with Chemometrics: A tool for the Analysis of Intact Food Systems and the Exploration of Their Molecular Structure-Quality Relationships- A review. *Chemical Reviews*. 110(10) 6144-6168. DOI: <https://doi.org/10.1021/cr100090k>
52. Kistriyani, L., Alvi-Ramadhani, A. y Puji-Resphaty, D. (2019). Encapsulation of Anthocyanin and Flavonoid from Watermelon Rind (*Citrullus lanatu*) as a Natural Food Preservative. *Key Engineering Materials*. 818 (1), 50-55. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.818.50>
53. Kulawik, A., Cielecka-Piontek, J. y Zalewski, P. (2023). The Importance of Antioxidant Activity for the Health-Promoting Effect of Lycopene. *Nutrients*. 15(17) 1-25. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu15173821>
54. Kumar, U., Patel A., Deepak, A., Gautam, D. y Choudhary, P. (2018). Solar Refrigeration using Peltier Module. *International Journal of Engineering and Techniques*, 4 (2) 102-112. ISSN: 2395-1303.
55. Lee-Hon, H., Ramli, N. F., Thuan-Chew, T., Muhamad, N. y Mohd, N. H. (2018). Effect of Extraction Solvents and Drying conditions on total phenolic content and

-
- Antioxidant properties of watermelon rind powder. *Sains Malaysiana*. 47(1), 99-107. DOI:<http://dx.doi.org/10.17576/jsm-2018-4701-12>
56. Liu, J., Hefni, M. E. Y Witthoft, C. M. (2020). Characterization of flavonoid compounds in common Swedish berry species. *Foods*. 9 (3), 358. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods9030358>
57. Liu, L., Miyawaki, O. y Hayakawa, K. (1999). Progressive Freeze-Concentration of Tomato Juice. *Food Science and Technology Research*, 5 (1), 108-112. DOI: <https://doi.org/10.3136/fstr.5.108>
58. Logvinov, G. N., Ángeles-Fragoso, O. y Gurevich, Y. G. (2007). Principios de termodinámica fuera de equilibrio en teoría de fenómenos termoeléctricos y electrotérmicos. *Superficies y vacío*. 20(2) 17-23. ISSN: 1665-3521
59. López-Luengo, M. T. (2002). Flavonoides. *Fitoterapia*. 21 (4). 108-114.
60. Machado-Velasco, K. M. y Velez-Ruiz, J. F. (2008). Estudio de propiedades físicas de alimentos mexicanos durante la congelación y el almacenamiento congelado. *Rev. Mex. Ing. Quím.* 7(1), 41-54. ISSN: 1665-2738
61. Mao, J., Chen, G. & Ren, Z. (2020). Thermoelectric cooling materials. *Nat. Mater.* 20(1), 454-461. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41563-020-00852-w>
62. Maoka, T. (2019). Carotenoids as natural functional pigments. *Journal of Natural Medicines*, 74 (1) 1-16. 2019. DOI: 10.007/s11418-019-01364-x
63. Martín, F. (2015). Cambios y alteraciones en los alimentos durante el proceso de congelación (II). *Restauración colectiva*. <https://www.restauracioncolectiva.com/n/cambios-y-alteraciones-en-los-alimentos-durante-el-proceso-de-congelacion-ii>. (Consultado en Abril 2024).
64. Marti, R., Leiva-Brando, M., La hoz, I., Campillo, C., Cebolla-Cornejo, J. y Roselló, S. (2018). Polyphenols and L-ascorbic acid content in tomato as influenced by high lycopene genotypes and organic farming at different environments. *Food Chemistry*. 239 (1), 148-156. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.06.102>
65. Masuda, H. Ryuzaki, T. e Iyota, H. (2022). Role of agitation in the freezing process of liquid foods using sucrose aqueous solution as a model liquid. *Journal*

-
- of Food Engineering. 330 (1) 1-41. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2022.111100>
66. Mathias-Rettig y An-Hen, K. (2014). El color de los alimentos un criterio de calidad medible. Agro. Sur. 42 (2), 57-66. DOI: <https://doi.org/10.4206/agrosur.v42n2-07>
67. Mayela, L. (2017). Manual Técnico del cultivo de tomate *Solanum lycopersicum*. Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria. ISBN: 978-9968-586-27-6, pp. 98-108.
68. Meléndez-Martínez, A. J., Vicario, I. S. Y Heredia, F. J. (2021). Estabilidad de los pigmentos carotenoides en los alimentos. ALAN. 54 (2). ISSN: 0004-0622
69. Mendoza, M.A. (2016). Modelado físico y computacional del proceso de congelación de alimentos mediante convección forzada. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Nuevo León.
70. Merve, B., Ozgur, B., Emrah, K. y Alev, B. (2018). Effect of freezing rate and storage on the texture and quality parameters of strawberry and green banana frozen in home type freezer. International Journal of Refrigeration. Vol. 88, pp. 360-369. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2018.02.030>
71. Morales, E.F. (2023). Cálculo del tiempo de congelación. Ingeniería de procesos, Instituto de Ciencia y Tecnología de los alimentos (ICYTAL). Universidad Austral de Chile.
72. Moreiras, A. (2020). Aplicación del método crioscópico para determinación de masas moleculares. Tesis de Licenciatura. . Universidad de Oviedo
73. Muhammad N., Maham N., Kashif A. y Farzana S. (2022). Watermelon nutrition profile, antioxidant activity, and processing. Research gate. Korean J Food Preserv. 29 (4), 531-545. DOI: <https://doi.org/10.11002/kjfp.2022.29.4.531>
74. Mundo Huerto. (2018). Tomate. Como se reproduce el tomate. Mundohuerto.com/cultivos/tomate/como-se-reproduce. (Consultada en Enero 2023)
75. Naczki, M y Shahidi, F. (2006). Phenolics in cereals, fruits and vegetables: Occurrence, extraction and analysis. Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis, 45 (5) 1523-1542. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpba.2006.04.002>

-
76. Neglo, D. Tetley, C.O., Essuman, E.K., Kortei, N.K, Boakye, A.A., Hunkpe, G., Amarh, F., Kwashie, P y Devi, W.S. (2020). Comparative antioxidant and antimicrobial activities of the peels, rind, pulp and seeds of watermelon (*Citrullus lanatus*) fruit. Scientific African, 11 (1) 1-8. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00582>
77. Nonga, H. E., Simtorian, E. A. y Ndabikunze, B. K. (2014). Assessment of physicochemical characteristics and hygienic practices along the value chain of raw fruit juice vended in Dar es Salaam City, Tanzania. Tanzania Journal of Health Research. 16 (4), 269-279. DOI: <https://doi.org/10.4314/thrrb.v16i4.3>
78. Novales, A. (2010). Análisis de Regresión. Universidad Complutense de Madrid. <https://www.ucm.es/data/cont/docs/518-2013-11-13-Analisis%20de%20Regresion.pdf>
79. Orellana, J.; Moreno-Villoslada, I.; Bose, R.K.; Picchioni, F.; Flores, M.E.; Araya-Hermosilla, R. (2021). Self-Healing Polymer Nanocomposite Materials by Joule Effect. Polymers. 13 (4) 649. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym13040649>
80. Orrego, C. E. (2003). Procesamiento de alimentos. Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales. ISBN: 958-9322-80-8. Pp. 245-255, 256-262.
81. Orrego, C. E. (2008). Congelación y Liofilización de Alimentos. ISBN: 978-958-44-4436-3. Pp. 1-7, 16-28
82. Pathare, P. B. y Al-Dairi, M. (2021). Effect of Simulated vibration and storage on Quality of Tomato. Horticulturae. 7 (11), 1-19. DOI: <https://doi.org/10.3390/horticulturae7110417>
83. Peñarrieta, J.M., Tejeda, L., Mollinedo, P., Villa, J.L, Bravo, J.A.,(2014). Compuestos fenólicos y su presencia en alimentos. Revista Boliviana de Química, 31(2), 68-81. DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.50.18.1840>
84. Perveen, R., Rasul, H.A., Muhammad, F., Sadiq M., Pasha, I. y Ahmad, S.(2015). Tomato (*Solanum lycopersicum*) Carotenoids and Lycopenes Chemistry; Metabolism, Absorption, Nutrition and Allied Health Claims-A Comprehensive Review. Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 55 (7), 919-929. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408398.2012.657809>

-
85. Plank, R. (2005). El Empleo del Frío en la Industria de la Alimentación. Editorial Reverté. ISBN: 84-291-8010-9, pp. 2-3.
86. Price-Passalacqua, D. S., Luque-Castañeda, E. J. y Meza-Davey, B. (2017). Efecto del refrigerado y congelado en el contenido de polifenoles totales, antocianinas y actividad antioxidante de arándanos (*Vaccinium Carymbosum*, variedad "Biloxi") cultivados en diferentes microclimas de Perú. Tesis de Licenciatura. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas.
87. Ramírez-López, C. (2010). Optimización de Módulos Peltier para Refrigeración. Tesis de Maestría. Instituto Politécnico Nacional.
88. Rochenszwalb, R. y Figueroa, L. (2023). Comparación de la concentración de hipoclorito de Sodio en la atención dental entre dentistas generales y especialistas en Endodoncia. Avances en Odontoesmatología. 39 (5), 230-240. ISSN: 2340-3152
89. Rodríguez-Saona, LE; Allendorf, ME. (2011). Use of FTIR for Rapid Authentication and Detection of Adulteration of Food. Annual Review of Food Science and Technology, 2 (1), 467-483. DOI: 10.1146/annurev-food-022510-133750
90. Santes, A., Villaseñor, Y., Tejero, J y Cerecero, R. (2019). Retention of phenolic compounds in slices of watermelon dried by refractance window. Meeting of Food Engineering. 3 (3): 28-32. ISSN: 2617-3387. ISBN: 2617-3387
91. Seisuke, K. y Neelima, S. (2014). Tomato (*Solanum lycopersicum*): a model Fruit-Bearing Crop. CSH Protoc.2008. 3(1), 1-10. DOI:<https://doi.org/10.1101/pdb.emo105>
92. Serrano, J. L. (2009). Espectroscopia infrarroja. Universidad Politécnica de Cartagena, pp. 2-35.
93. Sorokina, M., McCaffrey, K.S., Deaton, E. E., Ma, G., Ordovás, J.M., Perkins-Veazier, P. M., Steinbeck, C., Levi, A., Parnell, L.D. (2021) A Catalog of Natural Products Occurring in Watermelon-*Citrullus lanatus*. Frontiers in Nutrition. 8 (1), 1-18. DOI: 10.3389/fnut.2021.729822
94. Shafei, N., Harun, M. N., Annuar, K. A. M., Halim, M. F. A, Aras M. S. M., Azahar, A. H. (2016). Developmnet of Portable Air Conditioning System Using Peltier and

-
- Seebeck Effect. Journal of Telecommunication, Electronic Engineering. 8(7), 97-100. ISSN: 2180-1843.
95. Singh, R. P., Heldman, D. R. (2009). Introduction to Food Engineering. Elsevier Inc. pp. 501-513. ISBN: 978-0-12-370900-4
96. Smoot, J. (2018). Choosing and Using Advance Peltier Modules . DigiKey. Link: <https://www.digikey.com/es/articles/choosing-using-advanced-peltier-modules-thermoelectric-cooling>. (Consultado en Abril 2024).
97. Smoot, J. (2020). Factores importantes para mejorar la fiabilidad del módulo Peltier. DigiKey. Link: <https://www.digikey.com/es/articles/important-factors-for-improved-peltier-module-reliability>. (Consultado en Abril 2024)-
98. Tamasi, G., Pardini, A., Bonechi, C., Donati, A., Pessina, F., Marcolongo, P., Gamberucci, A., Leone, G., Consumi, M. Magnani, A. y Rossi, C. (2019). Characterization of nutraceutical components in tomato Pulp, skin and locular gel. European Food Research and Technology. 245(1), 907-918. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00217-019-03235-x>
99. Thakkar, M. (2016). A report on “Peltier (thermoelectric) cooling module”. Tesis de Maestría. Pandit Deendayal Petroleum University.
100. Téllez Mesa, C., (2019). Aplicaciones de la espectroscopía infrarroja en el análisis de alimentos. Tesis de Licenciatura. Universidad de Sevilla.
101. Torres A. (2012). Caracterización física, química y compuestos bioactivos de pulpa madura de tomate de árbol (*Cyphomandra betacea*) (Cav.) Sendth. Archivos Latinoamericanos de Nutrición. 62 (4), 381-388. ISSN: 0004-0622
102. Umaña, E. (2011). Conservación de alimentación por frío. Fundación para la Innovación Tecnológica Agropecuaria-FIAGRO.
103. USDA (US Department of Agriculture). 2019. Watermelon, raw. Food Data Central. <https://fdc.nal.usda.gov/fdc-app.html#/> (consultada en febrero, 2023).
104. Valeriy Babushkin, Alexander Spiridonov y Alexey Kozhukhar. (2016). Application of NIR and FTIR in Food Analysis. Journal of Physical Science and Application 6 (2), 47-50. Doi: 10.17265/2159-5348/2016.02.007

-
105. Van de Voort, F. R. (1992). Fourier transform infrared spectroscopy to food analysis. *Food Research International*. 25(5), 397-403. DOI: [https://doi.org/10.1016/0963-9969\(92\)90115.L](https://doi.org/10.1016/0963-9969(92)90115.L)
 106. Valle-Peñarrie, M.F., Durán-Baron, R., Quintero-Gamero, G. y Valera, R. (2020). Caracterización fisicoquímica, químico proximal, compuestos bioactivos y capacidad antioxidante de pulpa y corteza de sandía (*Citrullus lanatus*). *Inf. Tecnol.* 31 (1), 21-28. DOI: <http://doi.org/10.4067/S0718-07642020000100021>
 107. Wen-Hao., S. y Da-Wen, S. (2019) Mid-infrared (MIR) Spectroscopy for Quality Analysis of Liquid Foods. *Food Eng. Rev.* 11 (1), 142-158. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12393-019-09191-2>.
 108. Wiharti, W., Abadi, A., Mayura, Y. e Indriana, F. (2024). Design of Portable Air Conditioner Cooling Combination System Using Thermo Electric Cooler and Water Cooler Based of Arduino Uno. *International Journal of Advanced Computing Science and Engineering*. 5 (3), 210-219. ISSN: 2714-7533. DOI: <https://doi.org/10.62527/ijasce.5.3.168>
 109. Wiles, C. L., Gurupatham, S. K., Sooklal, V. K., Hanseul y Kitchel, J. (2020). The influence of rind of watermelon in the heat transfer calculation. *5th Thermal and fluids engineering conference*. 1 (1), 235-241. DOI: <http://dx.doi.org/10.1615/TFEC2020.ewf.031668>
 110. You T., Zi Z., Zhiwei, Z. y Da-wen, S. (2021). Effects of nano-bubbles and constant/variable-frequency ultrasound-assisted freezing on freezing behavior of viscous food model systems. *Journal of Food Engineering*. 292 (1), 1-9. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110284>
 111. Yu. G. Gurevich y Logvinov G.N. (2007). Theory of thermoelectric cooling in semiconductor structures. *Revista Mexicana de Física*. 53(5), 337-349. ISSN: 0035-001X
 112. Zempoalteca-Apango, B.R. (2024). Modelación y simulación del proceso de congelación en alimentos. Tesis de Ingeniería en Alimentos. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
 113. Zhiwei, Z., Peizhi, Z., Da-Wen, S. (2019). Effects of Multi-Frequency Ultrasound on Freezing Rate and Quality Attributes of Potatoes. *Ultrasonics*

Sonochemistry, 60 (1), 1-31. ISSN: 1350-4177. DOI:
<https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104733>

ANEXOS

Apéndice A

Picos de espectro de FT-IR en mesocarpio de sandía

#	Tipo de pico	Compuesto
1024	S=O tensión	Sulfóxido
1026	S=O tensión	Sulfóxido
1033	S=O tensión	Sulfóxido
1069	C-O tensión	Alcohol primario
1102	C-O tensión	Éster aromático
1250	C=O tensión	Alqueno conjugado
1624	C-H flexión	Compuestos Aromáticos
2900	C-H tensión	Alcano
2909	C-H tensión	Alcano
2924	C-H tensión	Alcano
2945	O-H tensión	Alcohol
2952	O-H tensión	Alcohol
2957	O-H tensión	Alcohol

Picos de espectro de FT-IR en pulpa de tomate

#	Tipo de pico	Compuesto
1026	S=O tensión	Sulfóxido
1033	S=O tensión	Sulfóxido

1075	C-O tensión	Alcohol primario
1105	C-O tensión	Éster aromático
1250	C=O tensión	Alqueno conjugado
1624	C-H flexión	Compuestos Aromáticos
2900	C-H tensión	Alcano
2909	C-H tensión	Alcano
2924	C-H tensión	Alcano
2945	C-H tensión	Alcohol