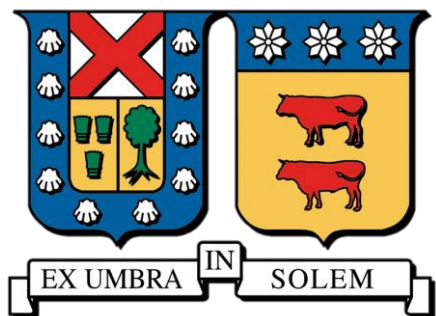


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AMBIENTAL
VALPARAÍSO – CHILE.



**INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES DE LIOFILIZACIÓN
EN LA REHIDRATACIÓN DE FRUTILLAS: EFECTO EN LA
TEXTURA**

BENJAMÍN DANIEL SUÁREZ CATALÁN

**MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL QUÍMICO**

PROFESOR GUÍA:

SERGIO ALMONACID MERINO

PROFESOR CORREFERENTE:

MARLENE PINTO FERNÁNDEZ

MAYO 2025



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título; ☐ Tesis de Postgrado;

Título del trabajo: INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES DE LIOFILIZACIÓN EN LA REHIDRATACIÓN DE FRUTILLAS: EFECTO EN LA TEXTURA

Nombre del candidato(a): BENJAMÍN DANIEL SUÁREZ CATALÁN

Carrera / Grado: INGENIERÍA CIVIL QUÍMICA / INGENIERO CIVIL QUÍMICO

Campus: Casa Central Valparaíso ; Departamento: IQA

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, SERGIO ALMONACID, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

☒ El trabajo **NO** contiene información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (embargo) por:

☐ 6 meses; ☐ 12 meses; ☐ 2 años; ☐ 3 años; ☐ 5 años; ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 13/08/2025

; Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 13/08/2025

; Firma:

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

Agradecimientos

En primer lugar, agradecer a mi profesor guía Dr. Sergio Almonacid, quien además de presentar la disposición de ayudar en cada etapa, ha hecho posible la realización de este documento, Asimismo agradecer a la profesora Marlene Pinto por sus contribuciones, revisiones y apoyo en general para la realización de los experimentos y escritos.

De igual manera, agradecer al proyecto FONDECYT N°1211980, por los recursos técnicos posibilitaron la realización de esta investigación.

Quiero manifestar mi más sincero agradecimiento a mi familia, sin ellos ninguna parte de mi vida sería igual.

A mis padres, Paola y Mauricio, gracias por el apoyo directo e indirecto durante todo el proceso, por formarme como persona y hacer de mí lo que soy.

A mis hermanos, Martín y Valentina, gracias por todos los momentos y experiencias vividas que forjaron carácter y determinación, espero que esto les sirva de prueba que, si se lo proponen, pueden lograr cumplir sus metas.

A mis abuelos, especialmente Paulina y Gustavo, por su apoyo incondicional incluso en las peores circunstancias, enseñándome que con esfuerzo se pueden mover montañas y doblarle la mano al destino.

Finalmente, agradecer a quienes me facilitaron conllevar las desventuras de la vida universitaria.

A mi grupo, Javiera, Valentina, Jennifer y Catalina, quienes siempre estuvieron para compartir penas y alegrías, ustedes sirvieron como un apoyo inestimable durante todo el proceso.

Mención especial para Javiera, gracias por tu cariño y apoyo incondicional en cada situación, gracias por siempre motivarme y sacar lo mejor de mí.

Índice General.

Índice General.....	3
Índice de Figuras.	4
Índice de Tablas.....	6
Resumen.	7
1 Introducción.....	8
2 Objetivos.....	9
2.1 Objetivo General.	9
2.2 Objetivos Específicos.....	9
3 Antecedentes Generales.	9
3.1 Frutillas.	9
3.2 Cosecha y Características de las Frutillas Cosechadas.....	10
3.3 Técnicas de Conservación Comunes.....	11
3.4 Conservación de Frutillas Enteras.....	14
4 Mercado de Frutillas.	15
4.1 Producción Mundial.....	15
4.2 Producción Nacional.	16
4.3 Producción de Fruta Liofilizada.	17
5 Liofilización.....	18
5.1 Descripción del proceso.....	18
5.2 Etapas del proceso	19
5.3 Parámetros del proceso:.....	20
5.4 Diferencias entre secado convencional y liofilización.....	21
5.5 Ventajas de liofilizar.....	22
5.6 Desventajas de liofilizar	23
6 Rehidratación.....	24
6.1 Ventajas de rehidratar:.....	24
6.2 Desventajas de rehidratar:	25
7 Metodología.....	25
7.1 Metodología general.	25
7.2 Métodos.	26
7.3 Selección y Preparación de Muestras.	26
7.4 Determinación Tiempo de Congelación.....	26
7.5 Proceso de Liofilización.	26
7.6 Determinación de Tiempo de Proceso.	27
7.7 Medición de Humedad.	27
7.8 Curva de Velocidad de Rehidratación.....	28
7.9 Calidad de Rehidratación.	29

7.10 Medición de Textura.	29
7.11 Medición de Color.	30
7.12 Experimentos a Distinta Presión.	31
8 Materiales y Equipos.	31
8.1 Materia Prima.	31
8.2 Equipos.	31
8.2.1 Liofilizador.	31
8.2.2 Ultra Congeladora.	32
8.2.3 Congelador Corriente.	33
8.2.4 Estufa de Laboratorio.	34
8.2.5 Colorímetro.	34
8.2.6 Texturómetro.	35
8.2.7 Balanza.	36
9 Resultados y Discusión.	36
9.1 Determinación del tiempo de congelación.	36
9.2 Determinación de Tiempo de Proceso de Liofilización.	37
9.3 Curva de Velocidad de Rehidratación.	39
9.4 Calidad de Rehidratación.	40
9.5 Efectos en el Color.	41
9.6 Efectos en la Textura.	42
9.7 Resultados del Experimento Adicional.	43
9.7.1 Curva de velocidad de Rehidratación:	43
9.7.2 Calidad de rehidratación.	44
9.7.3 Efecto en el Color.	45
9.7.4 Efecto en la Textura:	46
10 Conclusiones.	46
11 Recomendaciones.	47
Referencias	48
12 Anexos.	49

Índice de Figuras.

Figura 1: Morfología de una Frutilla.	10
Figura 2: Estados de maduración de las Frutillas.	11
Figura 3: Producción mundial de Frutillas 2003-2023 (FAO, 2024).	15
Figura 4: Producción Chilena de Frutillas 2013-2023 (FAO, 2024)	16
Figura 5: Ejemplos de Productos liofilizados en Chile.	17
Figura 6: Ejemplos de productos liofilizados en el mercado internacional.	17
Figura 7: Diagrama de Cambio de fase del agua (UCF, 2023).	19
Figura 8: Diferencias entre Congelación rápida y lenta (Flash Freeze, 2024).	19

Figura 9: Diferencias entre deshidratación por alta temperatura (izquierda) y liofilización (derecha) (Muesli2mix, 2024).....	22
Figura 10: Liofilizador Christ, modelo Alpha 2-4 LSCplus, usado en este estudio.	32
Figura 11: Ultra congeladora Alaska Miniturbo MT05, usada en este estudio.....	33
Figura 12: Congeladora de almacenamiento usada en este estudio.....	33
Figura 13: Estufa de laboratorio Memmert UM200, usada en este estudio.	34
Figura 14: Colorímetro Konica Minolta modelo CR-400, usado en este estudio.	35
Figura 15: Representación del espacio de color CIE-Lab*	35
Figura 16: Texturómetro TexturePro CT V1.2 Build 9, usado en este estudio.	36
Figura 17: Balanza analítica RADWIG modelo AS 200/C/2, usada en este estudio. ...	36
Figura 18: Arreglo de rehidratación en baño termorregulado.	28
Figura 19: Grafica de tiempo de congelación.	37
Figura 20: Resultados del tiempo de proceso.....	38
Figura 21: Grafica de Velocidad de rehidratación obtenida.....	39
Figura 22: Resultados de rehidratación.	40
Figura 23: diferencias visuales entre rehidratación a 20 °C y 4 °C, respectivamente.	42
Figura 24: Curva de velocidad, caso alta presión.....	44
Figura 25: Resultados de rehidratación, caso alta presión.....	44
Figura 26: Resultados de rehidratación, todos los casos.....	45
Figura 27: grafica original de estimación de tiempo de proceso..	49
Figura 28: Resumen de resultados de test de textura, todos los casos.....	49
Figura 29: Obtención de Curva Velocidad 30°C	50
Figura 30: Obtención de Curva Velocidad 40°C	50
Figura 31: Obtención de Curva Velocidad 50°C	51
Figura 32: Obtención de Curva Velocidad Alta Presión.	51
Figura 33: Test Frutillas Descongeladas	52
Figura 34: Test Frutillas Frescas	52

Índice de Tablas.

Tabla 1: Parámetros usados en el test de textura.	30
Tabla 2: Resumen de los tiempos de proceso a utilizar.	38
Tabla 3: Resumen de resultados de rehidratación.	40
Tabla 4: Resultados del efecto en el color	41
Tabla 5: Resumen de resultados del efecto en la textura.	42
Tabla 6: Resultados del efecto en el color, caso alta presión.	45
Tabla 7: Resultados del efecto en la textura, caso alta presión.	46

Resumen.

Actualmente, la conservación de alimentos juega un papel crucial para asegurar su disponibilidad y calidad a lo largo del tiempo. Entre las técnicas más avanzadas se destaca la liofilización, un proceso de deshidratación que elimina el agua por sublimación, preservando las propiedades organolépticas del producto. No obstante, este método conlleva altos costos operativos, especialmente durante el secado primario, la fase más crítica y prolongada del proceso. Para optimizar la eficiencia de la liofilización con respecto a la conservación de las propiedades organolépticas del alimento, es esencial analizar factores que influyen en la rehidratación, ya que este parámetro impacta directamente en la calidad final del producto. Una adecuada capacidad de rehidratación permite recuperar la textura, sabor y apariencia del alimento, favoreciendo así su aceptación por parte del consumidor.

El presente estudio evaluó la influencia de las condiciones de liofilización en la calidad de frutillas enteras rehidratadas, considerando la capacidad de rehidratación, textura y color como principales parámetros de calidad. Se realizaron pruebas con temperaturas de plato de 30, 40 y 50 [°C] y con una presión de 0.3 [mBar] y se realizó un experimento adicional a 40 °C y 0.6 [mBar], analizando el efecto de estas variables sobre las características finales del producto una vez rehidratado, se realizaron procesos de rehidratación a 20 y 4 [°C] emulando las condiciones de temperatura ambiente y temperatura de refrigeración respectivamente.

Los resultados indicaron que la temperatura de 40 [°C] optimiza la capacidad de rehidratación, especialmente cuando el proceso se realiza a 4 [°C], alcanzando un coeficiente de rehidratación (RC) de 59.16% en el caso a 0.3 [mBar]. En cuanto a la textura, las frutillas rehidratadas presentaron una firmeza inferior respecto a las frutillas frescas o descongeladas, sin variaciones notables al modificar la temperatura o la presión de liofilización, véase Tabla 5. Sin embargo, se evidenció una leve mejoría con el aumento de la presión cambiando los el valor promedio de $49.32 \pm 8.72\%$ a $54.95 \pm 7.16\%$, posiblemente atribuida a la variabilidad natural del fruto. A partir de lo anterior, se puede señalar que no se observaron diferencias significativas en general entre las presiones de 0.3 y 0.6 mBar, lo que sugiere que operar a presiones más altas podría reducir costos sin afectar la calidad.

Respecto al color, la liofilización a 40 °C junto con la rehidratación en refrigeración preservó mejor las tonalidades rojas y amarillas del fruto en comparación con el proceso de congelación y descongelación, sin afectar significativamente la calidad visual al operar a presiones más altas.

En conclusión, la combinación de una temperatura de liofilización de 40 °C y rehidratación en frío se presenta como la opción más adecuada para maximizar la calidad de frutillas enteras liofilizadas, posicionando esta técnica como una alternativa eficiente y sostenible para la conservación de alimentos con alta demanda en el mercado.

1 Introducción.

La liofilización es un proceso de conservación en el que se elimina el agua de un material, generalmente alimentos o medicamentos, aplicando temperaturas moderadas. Primero, el producto se congela a muy bajas temperaturas. Luego, se coloca en una cámara de vacío donde el agua congelada se sublima, es decir, pasa directamente de hielo a vapor, sin convertirse en líquido. El resultado es un material seco que puede durar mucho tiempo sin refrigeración y que se rehidrata fácilmente.

Este proceso tiene sus raíces en la década de 1930, cuando se desarrolló como una técnica avanzada para conservar materiales biológicos sensibles. Durante la Segunda Guerra Mundial, su uso se expandió rápidamente debido a la necesidad de transportar medicamentos como la penicilina y el plasma sanguíneo a los frentes de batalla sin que se deterioraran. La capacidad de deshidratar productos sin dañarlos hizo que la liofilización fuera clave para conservar alimentos, productos farmacéuticos y muestras biológicas. A lo largo del tiempo, la tecnología fue perfeccionada y se extendió a diversas industrias, desde la alimentaria hasta la espacial, donde la necesidad de alimentos ligeros y duraderos impulsó su uso.

Uno de los principales beneficios de la liofilización es su gran capacidad para conservar las propiedades nutricionales y estructurales de los productos durante largos periodos de tiempo, sin necesidad de refrigeración. A diferencia de otros métodos de deshidratación, la liofilización no expone los materiales a altas temperaturas, lo que ayuda a preservar sabores, nutrientes y compuestos bioactivos. Además, los productos liofilizados son ligeros, lo que facilita su transporte y almacenamiento, un beneficio clave que se explotó desde sus primeros usos en la guerra y en la exploración espacial. Este proceso también permite rehidratar los productos rápidamente, devolviéndolos casi a su estado original, lo que lo convierte en una opción ideal para alimentos, medicamentos y muestras biológicas delicadas.

Es debido a estas características que se decide liofilizar frutillas para su almacenamiento y comercialización, ya que ofrece numerosas ventajas. Este proceso permite conservar su sabor, color y contenido nutricional casi intactos, lo que es esencial para mantener la calidad del producto. Al eliminar el agua, se reduce drásticamente el peso de las frutillas, lo que facilita su transporte y almacenamiento, además de prolongar su vida útil sin necesidad de refrigeración. Las frutillas liofilizadas también mantienen su forma y textura crujiente, lo que las hace atractivas para su uso en diversas aplicaciones, como snacks, cereales o ingredientes en productos de repostería. Además, la liofilización previene la proliferación de microorganismos, asegurando un producto más seguro y de alta calidad para el consumidor final.

Este tipo de procesamiento se hace especialmente atractivo para la exportación de frutillas, ya que un producto ligero y de larga vida útil es idóneo para transportar, además sus características permiten que este no requiera cadena de frío en su almacenamiento y transporte, haciendo esta parte del proceso notablemente más accesible.

2 Objetivos.

2.1 Objetivo General.

Estudiar y caracterizar la influencia de las condiciones de liofilización en la textura y color de frutillas una vez rehidratadas.

2.2 Objetivos Específicos.

- Realizar pruebas experimentales de liofilización y rehidratación de frutillas, variando la temperatura del plato del liofilizador.
- Realizar pruebas experimentales de liofilización y rehidratación, variando la presión del liofilizador.
- Caracterizar el color y la textura de las frutillas rehidratadas.
- Diseñar un modelo basado en los datos experimentales, para estimar los parámetros de textura de la frutilla rehidratada a partir de las condiciones de presión y temperatura a las cuales fue liofilizada.
- Comparar la textura y color de una frutilla liofilizada rehidratada con una frutilla descongelada comercial.

3 Antecedentes Generales.

3.1 Frutillas.

La frutilla, conocida científicamente como *Fragaria* × *ananassa*, es una planta herbácea perenne de la familia Rosaceae. Este fruto es el resultado del cruce natural entre dos especies de fresas silvestres, *Fragaria virginiana* de América del Norte y *Fragaria chiloensis* de Sudamérica, lo que dio origen a la frutilla moderna en el siglo XVIII en Europa (Mc Leod, Aguila, & Cárcamo, 2020). Su cultivo ha evolucionado significativamente desde entonces, adaptándose a diversas regiones y climas, lo que ha convertido a la frutilla en un alimento clave a nivel mundial, tanto en la gastronomía como en la industria agroalimentaria. Este fruto no solo destaca por su sabor y versatilidad, sino también por su alto contenido de antioxidantes, vitaminas y fibra. Además, ha sido objeto de estudio debido a su compleja genética, que incluye múltiples conjuntos de cromosomas. Entre los datos curiosos, se encuentra el hecho de que la frutilla es uno de los pocos frutos cuyas semillas se encuentran en el exterior, lo que contribuye a su inconfundible apariencia. La importancia de la frutilla en la economía y la salud humana sigue en aumento, posicionándose como una de las frutas más consumidas y valoradas a nivel global (Food and Agriculture Organization, 2024).

La frutilla no solo destaca por su sabor y su valor nutricional, sino también por su singular morfología que juega un papel clave en su desarrollo reproductivo y comercialización. El pedúnculo, una estructura alargada y delgada que conecta el fruto con la planta madre, no solo es fundamental para el transporte de nutrientes durante el crecimiento del fruto, sino que también influye en la facilidad de cosecha. Los aquenios, que parecen simples "semillas" en la superficie de la frutilla, en realidad son frutos secos que contienen las verdaderas semillas en su interior, y desempeñan un papel esencial en la reproducción de la planta. Estos aquenios

están incrustados en el hipanto, la parte carnosa y comestible que ha evolucionado para atraer a los dispersores de semillas. El hipanto, que en la frutilla es el órgano más conspicuo y consumido, tiene una textura jugosa y dulce que es clave en su popularidad comercial. Por otro lado, el eterio se refiere a la disposición colectiva de los aquenios sobre el receptáculo, lo que le otorga al fruto su apariencia característica. Finalmente, el cáliz, que está compuesto por sépalos que rodean el fruto durante su desarrollo inicial, permanece adherido al pedúnculo, actuando como una pequeña corona verde que facilita la identificación del fruto durante la cosecha y comercialización. Cada una de estas estructuras morfológicas cumple un rol esencial en el ciclo de vida de la planta y en su relación con el entorno.

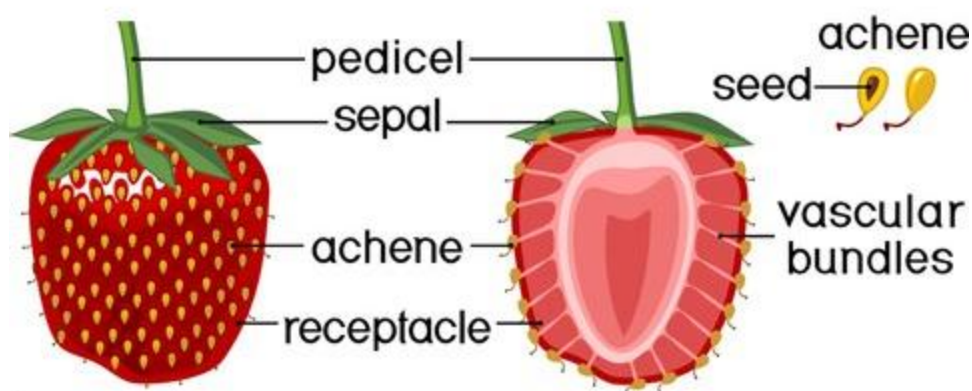


Figura 1: Morfología de una Frutilla (dreamstime.com, s.f.).

3.2 Cosecha y Características de las Frutillas Cosechadas.

La cosecha de la frutilla es una etapa fundamental que requiere técnicas cuidadosas para maximizar tanto la calidad del fruto como su durabilidad en el mercado. Dado que el hipanto, correspondiente a la parte carnosa y comestible es extremadamente delicado, la recolección de frutillas se realiza principalmente de forma manual, ya que métodos mecanizados podrían dañar la estructura del fruto, afectando su vida útil y su valor comercial. Las frutillas se cosechan en las primeras horas de la mañana, cuando las temperaturas son más bajas y el fruto conserva mejor su firmeza y frescura, minimizando el riesgo de que se ablanden o deterioren. El período de cosecha varía según la ubicación geográfica: en el hemisferio norte, esta se concentra en los meses de primavera y principios de verano, mientras que en el hemisferio sur se extiende desde la primavera hasta el verano austral, con variaciones según el clima y la altitud de cada región (Mc Leod, Aguila, & Cárcamo, 2020).

Los frutos se recolectan en distintos estados de maduración, lo cual depende de su destino comercial. Las frutillas completamente maduras, de color rojo intenso, suelen ser destinadas al consumo inmediato en mercados locales, ya que presentan el sabor más dulce y la textura óptima, pero tienen una vida útil más corta. Por el contrario, las frutillas cosechadas en etapas ligeramente menos maduras se destinan a mercados lejanos, dado que son más firmes y resisten mejor el transporte sin perder calidad. Además, cada estado de maduración influye

en los compuestos nutricionales del fruto, como su contenido de antioxidantes y vitaminas. Los métodos de cosecha y el momento preciso de recolección son factores determinantes para maximizar la frescura, calidad y atractivo comercial de la frutilla, adaptándose estos factores a las características climáticas y logísticas de cada región. Por estas razones, la cosecha de frutillas representa un proceso detallado que combina conocimiento agrícola y técnicas de manejo postcosecha para satisfacer la demanda de uno de los frutos más apreciados a nivel global (Rivulis, 2016).

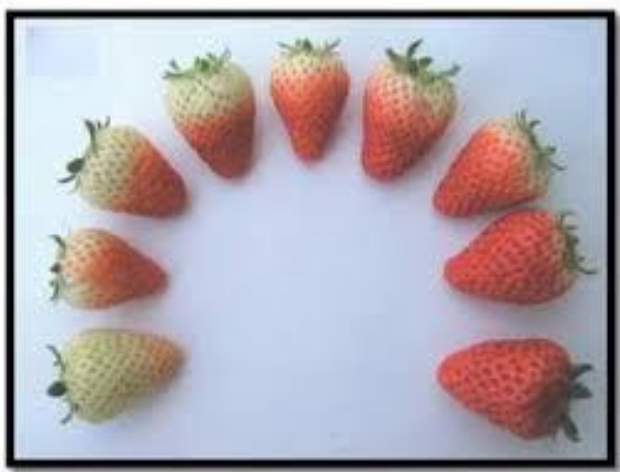


Figura 2: Estados de maduración de las Frutillas (Rivulis, 2016).

3.3 Técnicas de Conservación Comunes.

A continuación, se presentarán brevemente algunas de las técnicas de conservación más comunes aplicadas a frutillas:

3.3.1 Refrigeración

La refrigeración es un proceso de conservación que reduce la temperatura de los alimentos para disminuir la actividad microbiana y enzimática, prolongando así su vida útil. Este método se basa en el principio de ralentizar las reacciones bioquímicas y la proliferación de microorganismos que causan la descomposición de los productos frescos, lo que es especialmente importante en frutas como la frutilla, cuyo hipanto carnoso es altamente perecedero y susceptible a la deshidratación, el ablandamiento y el crecimiento de moho. Para la conservación de frutillas, la refrigeración se realiza a temperaturas que oscilan entre 0 y 2 °C, acompañada de un control de la humedad relativa para evitar la pérdida de agua y mantener la frescura y firmeza del fruto. Este proceso permite mantener las frutillas en óptimas condiciones de consumo durante varias semanas, preservando su color, sabor y contenido nutricional. La refrigeración en cadena, que consiste en mantener una temperatura constante desde la cosecha hasta el punto de venta, es esencial para asegurar que las frutillas lleguen al consumidor final con la mayor calidad posible. De esta forma, la refrigeración se ha convertido en un recurso clave en la industria agrícola para minimizar las pérdidas

postcosecha y garantizar la disponibilidad de frutillas frescas en mercados locales y de exportación (Terra Food Tech, 2022).

3.3.2 Congelación

La congelación es un método de conservación que consiste en reducir la temperatura de los alimentos por debajo de los 0 °C, con el fin de detener casi por completo la actividad microbiana y las reacciones enzimáticas que conducen a su deterioro. A diferencia de la refrigeración, que ralentiza estos procesos, la congelación los detiene al solidificar el agua presente en los alimentos, formando cristales de hielo que inhiben el crecimiento de microorganismos. En el caso de las frutillas, este proceso es particularmente útil para prolongar su vida útil, ya que estas frutas tienen un contenido de agua elevado y son muy perecederas. La congelación de frutillas se realiza generalmente a temperaturas de -18 °C o inferiores, asegurando que se conserven su sabor, color y valor nutricional durante meses o incluso años. Sin embargo, la clave para preservar la calidad del fruto durante la congelación está en la velocidad del proceso: una congelación rápida minimiza la formación de grandes cristales de hielo, que pueden dañar las paredes celulares del hipanto, provocando una textura blanda o pastosa al descongelarse. Las frutillas congeladas son ampliamente utilizadas en la industria alimentaria para la producción de jugos, mermeladas, postres y otros productos, permitiendo su disponibilidad durante todo el año y reduciendo significativamente las pérdidas postcosecha. La congelación se ha consolidado como uno de los métodos más eficientes y seguros para conservar las frutillas, garantizando su frescura y calidad en el largo plazo (Terra Food Tech, 2022).

3.3.3 Mediante aditivos

La conservación de alimentos mediante aditivos consiste en el uso de sustancias químicas, naturales o artificiales, que prolongan la vida útil de los productos al inhibir el crecimiento microbiano, retrasar la oxidación o evitar la descomposición enzimática. Los aditivos conservantes funcionan interfiriendo en los procesos que causan el deterioro de los alimentos, como la proliferación de bacterias, mohos y levaduras, así como las reacciones químicas que provocan cambios en el sabor, el color o la textura. En el caso de las frutillas, los aditivos son utilizados en diferentes formas para preservar su frescura y calidad. Entre los conservantes más comunes se encuentran los ácidos orgánicos, como el ácido cítrico y el ácido ascórbico, que se añaden para reducir el pH y crear un entorno menos favorable para el crecimiento microbiano. Además, antioxidantes como el ácido ascórbico también ayudan a prevenir la oxidación que causa el oscurecimiento y la pérdida de calidad visual del fruto. Los recubrimientos comestibles, que contienen conservantes, también se utilizan para proteger las frutillas durante su almacenamiento y transporte. Estos métodos permiten que las frutillas mantengan su apariencia fresca, su sabor y su valor nutricional durante más tiempo, haciéndolas más atractivas para los mercados locales e internacionales. La aplicación de aditivos conservantes, tanto en su forma natural como sintética, es una herramienta clave

en la industria agroalimentaria para reducir el desperdicio y asegurar la disponibilidad del producto en óptimas condiciones (Terra Food Tech, 2022).

3.3.4 Desechado

El desecado es un método de conservación de alimentos que consiste en reducir el contenido de agua del producto, inhibiendo así el crecimiento de microorganismos y la actividad enzimática responsables del deterioro. En el caso de las frutillas, el desecado puede llevarse a cabo a diferentes rangos de temperatura, dependiendo del método utilizado. El desecado a bajas temperaturas (entre 30 y 50 °C) es el más adecuado para preservar las propiedades nutricionales y sensoriales de las frutillas, ya que minimiza la degradación de vitaminas y compuestos antioxidantes. En este proceso, el agua se evapora lentamente, permitiendo que las frutillas mantengan su color, sabor y textura característicos. A temperaturas medias (50-70 °C), el proceso de secado es más rápido, pero puede provocar una leve pérdida de nutrientes sensibles al calor, aunque sigue siendo eficiente para la conservación a largo plazo. El desecado a altas temperaturas (superiores a 70 °C) se utiliza para un secado rápido, pero puede comprometer la calidad del fruto, dando lugar a una textura más dura y una pérdida significativa de nutrientes.

El secado al sol, un método tradicional y natural, es muy utilizado para la conservación de frutillas en climas cálidos y secos. Las frutillas se extienden en bandejas o superficies limpias y se exponen directamente al sol, aprovechando las temperaturas ambientales elevadas para deshidratar el fruto. Este proceso puede llevar varios días y depende de las condiciones climáticas, siendo más efectivo en regiones con bajo nivel de humedad. Aunque este método es económico y no requiere de equipos especializados, es más difícil de controlar, y las frutillas pueden perder parte de su calidad si no se secan uniformemente o si están expuestas a contaminación ambiental. En cualquiera de estos métodos, el desecado reduce el peso y el volumen de las frutillas, lo que facilita su almacenamiento y transporte, permitiendo su consumo fuera de temporada y su uso en productos como snacks, mezclas secas o repostería. Este enfoque de conservación, además de prolongar la vida útil de las frutillas, responde a una creciente demanda de productos naturales y sin aditivos (Terra Food Tech, 2022).

3.3.5 Liofilización

La liofilización es un método de conservación de alimentos que consiste en la eliminación del agua por sublimación, lo que impide el desarrollo de microorganismos y la actividad enzimática que ocasionan el deterioro. En el caso de las frutillas, este proceso se realiza en varias etapas, comenzando con la congelación del producto a temperaturas extremadamente bajas (-30 °C o inferiores), seguida de la eliminación del agua en estado sólido mediante un proceso donde se aplica vacío y se le entrega energía en forma de calor a la materia que se secará, es importante destacar que este calor es bajo, llegando usualmente a los 30 o 40 grados Celsius. La liofilización permite conservar casi intactas las propiedades nutricionales y sensoriales de las frutillas, manteniendo su color, sabor y estructura celular sin daños significativos. A diferencia de otros métodos de deshidratación, la liofilización evita la

degradación de compuestos sensibles al calor, como vitaminas y antioxidantes, también permite conservar muy bien la morfología de la materia al secar teniendo al finalizar el proceso leves variaciones en la forma, lo que la convierte en una de las técnicas más eficaces para la preservación de alimentos de alta calidad. Aunque el proceso puede ser más costoso y requiere equipamiento especializado, los productos liofilizados tienen una vida útil prolongada y son livianos, lo que facilita su almacenamiento y transporte. Su versatilidad los hace ideales para su consumo directo como snacks, la elaboración de productos en polvo o su rehidratación para uso en repostería y otras preparaciones culinarias. La creciente demanda de alimentos naturales y mínimamente procesados ha impulsado el uso de la liofilización como una alternativa moderna y efectiva en la industria alimentaria. (Hammami & René, 1997)

3.4 Conservación de Frutillas Enteras.

Los métodos tradicionales de conservación de frutillas enteras han sido empleados durante siglos para prolongar su vida útil, manteniendo su estructura, sabor y propiedades nutricionales. Estas técnicas, que no requieren de tecnología avanzada, se basan en el uso de ingredientes naturales y procesos físicos que inhiben el crecimiento microbiano y la actividad enzimática, permitiendo preservar las frutillas sin alterar significativamente su forma original. Uno de los métodos más utilizados es la conservación en almíbar, donde las frutillas se sumergen en una solución concentrada de azúcar que reduce la actividad de agua, creando un entorno desfavorable para los microorganismos. Este método permite mantener las frutillas enteras con su textura y sabor característicos, siendo comúnmente utilizado para el consumo directo o como ingrediente en postres.

Otra técnica tradicional es la conservación en vinagre, también conocida como encurtido, que emplea soluciones ácidas para prevenir la proliferación microbiana, manteniendo las frutillas intactas y aportando un sabor agri dulce característico. La inmersión en aguardiente o licores es otra práctica que permite preservar las frutillas enteras durante largos períodos, aprovechando las propiedades antimicrobianas del alcohol, además de proporcionar un producto con valor gastronómico y artesanal. (Terra Food Tech, 2022)

El congelamiento doméstico es también una alternativa accesible para conservar las frutillas enteras, especialmente cuando se realiza mediante el congelamiento rápido, que minimiza la formación de cristales de hielo y ayuda a preservar la textura de la fruta. Asimismo, el escaldado previo seguido de la conservación en almíbar o jarabe ligero es una técnica tradicional que combina un tratamiento térmico suave con la acción del azúcar, lo que permite mantener la estructura del fruto y prolongar su vida útil.

Estos métodos, aunque simples, permiten conservar las frutillas enteras con una calidad sensorial aceptable, contribuyendo a la reducción de desperdicios y al aprovechamiento de la fruta fuera de temporada. Además, su bajo costo y la posibilidad de emplear ingredientes

naturales los convierten en una alternativa sostenible y valorada en la producción artesanal, alineándose con la creciente demanda de alimentos tradicionales y libres de aditivos.

La liofilización se ha consolidado como una de las técnicas más eficientes para la conservación de frutillas enteras, ya que permite preservar la estructura, sabor, color y valor nutricional de la fruta de manera casi intacta (Meda & Ratti, 2005). A diferencia de los métodos tradicionales, la liofilización elimina el agua por sublimación en condiciones de baja temperatura y presión, evitando la degradación térmica de compuestos sensibles como vitaminas y antioxidantes. Esta técnica ofrece la ventaja de mantener la textura y forma original de las frutillas, obteniendo un producto ligero, con larga vida útil y fácil rehidratación. Además, los productos liofilizados no requieren conservantes ni refrigeración, lo que los convierte en una alternativa altamente demandada dentro de la industria alimentaria, especialmente en el desarrollo de alimentos saludables, snacks y productos gourmet.

4 Mercado de Frutillas.

4.1 Producción Mundial.

Debido a varias de las características nombradas anteriormente, las frutillas se han posicionado como una de las frutas más demandadas, lo que se refleja en su constante crecimiento de producción reportado por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (Food and Agriculture Organization, 2024), llegando a producir más de 9.000.000 toneladas de esta a nivel mundial en el año 2022 y 10.000.000 toneladas en el año 2024.

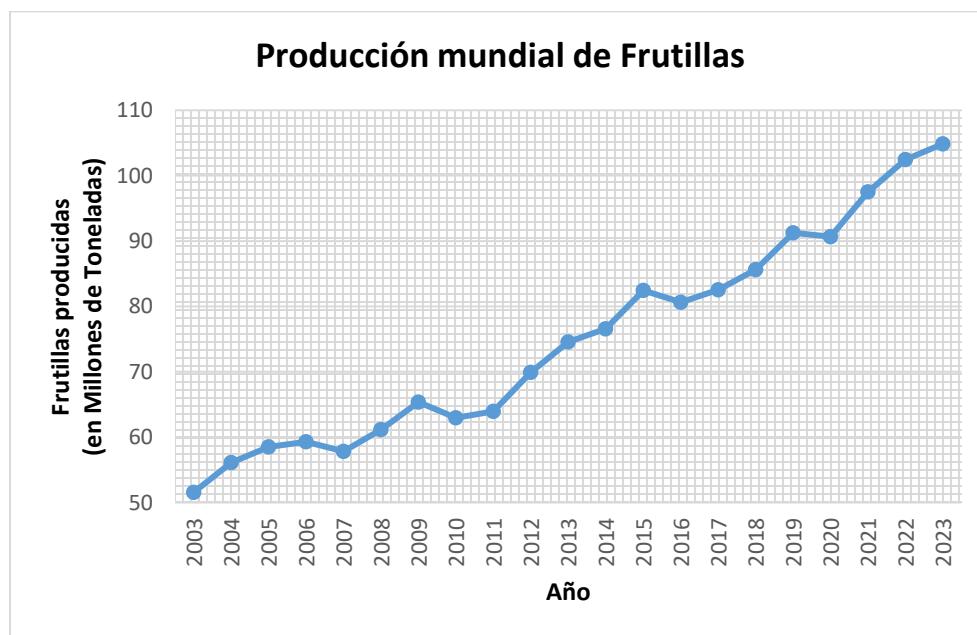


Figura 3: Producción mundial de Frutillas 2003-2023 (FAO, 2024).

El principal productor de frutillas del mundo en 2023 fue China, produciendo alrededor del 40% de la producción mundial aumentando su producción en aproximadamente un 6% respecto al anterior año, en segundo lugar, de la producción global están los Estados Unidos, que produjeron alrededor de un 12% (Food and Agriculture Organization, 2024).

Si revisamos con más ahínco la producción de China en los últimos años, es sencillo darnos cuenta de que su cultivo de frutillas ha tenido un alza mantenida por la mayor parte de 20 años, lo que una vez más nos da una pista de la importancia de este fruto tanto a nivel mundial, y también habla de la importancia dentro de una de las economías más importantes del mundo.

4.2 Producción Nacional.

Al examinar la producción nacional de Chile notamos que esta ha variado en los últimos años (Food and Agriculture Organization, 2024) tal como se puede ver a continuación:

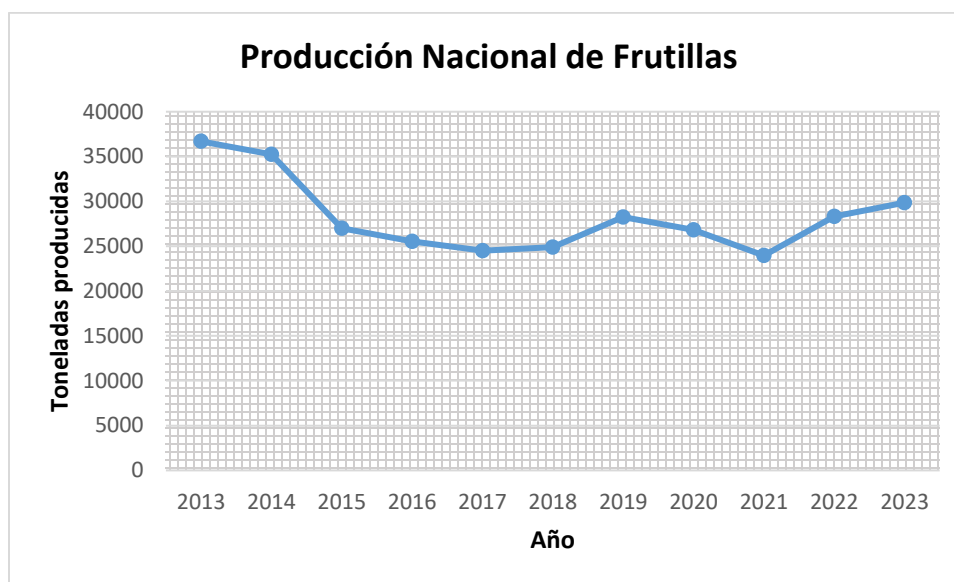


Figura 4: Producción Chilena de Frutillas 2013-2023 (FAO, 2024)

Si bien la producción de Chile ha sufrido una baja en comparación con los valores de hace 10 años, en los últimos años esta se ha experimentado un alza importante, y considerando la demanda mundial en ascenso la posición geográfica de Chile y sus condiciones idóneas para el cultivo de frutos de estas características, podemos decir que la producción de frutillas en el país seguirá al alza o en el peor de los casos se mantendrá constante generando una buena oportunidad para el mercado de frutillas congeladas o con otros métodos de conserva.

En Chile la cosecha de frutillas se lleva a cabo en las estaciones de verano y otoño lo que corresponde a los meses de diciembre a mayo, esto se contrapone con la cosecha de los mayores productores del mundo (PRC y USA) lo que nos permite llenar un nicho en el periodo de menor producción, valorizando aún más las posibilidades de producción nacional.

4.3 Producción de Fruta Liofilizada.

En el mercado nacional si bien no existen muchos competidores, también podemos encontrar 2 empresas que producen fruta liofilizada, estas empresas son “Isofrut” y “Tribu” ambas producen varios tipos de chips de fruta liofilizada que son vendidos como snack en el retail, tanto nacionalmente como internacionalmente algunos ejemplos de sus productos se pueden ver a continuación:



Figura 5: Ejemplos de Productos liofilizados en Chile.

Es importante mencionar que, aunque hay producción nacional, el mercado aún es pequeño, y tampoco se proyecta mucho crecimiento de este sector en Chile o Latinoamérica (MordorIntelligence, 2021), sin embargo, el escenario cambia al mirar hacia países mas desarrollados como estados unidos o países europeos.

En el escenario internacional, existen grandes productores de fruta liofilizada, entre los que destacan empresas como “European Freeze Dry”, “Chaucer Foods”, “Mercer Foods, LLC” entre otros; Estas empresas producen una gran variedad de productos liofilizados, como frutas, verduras, MREs, Polvos deshidratados, y varios otros, algunos ejemplos se pueden ver a continuación.



Figura 6: Ejemplos de productos liofilizados en el mercado internacional.

La expectativa de mercado de los productos liofilizados en los países más desarrollados es al alza, debido a la alta duración de los productos sus características naturales, la carencia de aditivos y su característico e intenso sabor.

5 Liofilización.

La liofilización o Freeze Drying en inglés, corresponde a un proceso de secado que elimina la humedad mediante la sublimación, para esto se utilizan bajas presiones en combinación con temperaturas bajas para permitir una mejor conservación de las propiedades organolépticas de los alimentos sometidos a este proceso. Este procedimiento es usado en un gran abanico de industrias, principalmente las industrias farmacéuticas, alimentaria y médica (Hammami & René, 1997), ya que genera un producto de gran calidad, bajo peso y larga duración, lo que lo hace ideal para el almacenamiento y distribución de alimentos como café instantáneo y MREs o para implementos de laboratorio como reactivos, medios de cultivo u organismos como bacterias y otros.

Debido a las características antes mencionadas, este proceso es muy atractivo para la conservación de frutillas, tanto enteras, en trozo o como polvo, sin embargo, el procedimiento de liofilización demanda mucho tiempo y genera altos costos energéticos, lo que dificulta su industrialización, frente a este escenario, se hace atractivo investigar como disminuir el tiempo de proceso y los costos de este, por lo que analizaremos el proceso más a fondo a continuación.

5.1 Descripción del proceso

El proceso de liofilización cuenta con 3 etapas principales, Congelación, Secado Primario y Secado Secundario, estas con el objetivo de la eliminación de humedad de una matriz mediante la sublimación, o, en otras palabras, convertir hielo en vapor de agua sin pasar por el estado líquido, para esto empleamos una cámara acondicionada donde controlamos presión y temperatura, generando un producto estable, que mantiene su estructura y propiedades casi intactas.

Para poder llevar a cabo la sublimación es mandatorio mantener un entorno con una muy baja presión por debajo del punto triple del agua, en adición, es necesaria temperatura para suministrar el calor latente del hielo, el proceso se lleva a cabo siguiendo la flecha azul en el siguiente diagrama:

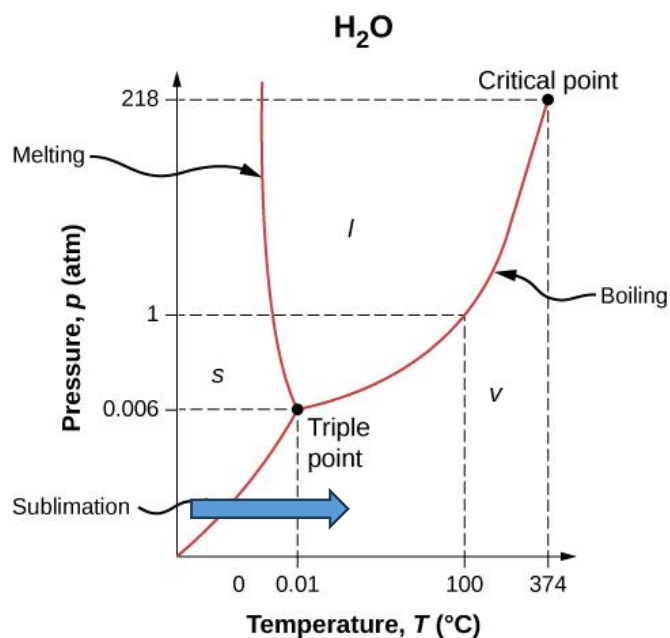


Figura 7: Diagrama de Cambio de fase del agua (UCF, 2023).

5.2 Etapas del proceso

5.2.1 Congelación:

Para iniciar el proceso es mandatorio bajar la temperatura de la muestra a liofilizar, esto con el objetivo de congelar la totalidad del agua presente en esta, esto a menudo se logra manteniendo la temperatura de la muestra por debajo de los -20 [$^{\circ}C$], también es muy importante la velocidad de congelación en esta parte del proceso, ya que mientras más lenta la congelación, se generan grandes cristales de hielo que afectan negativamente la preservación de la forma y las propiedades de la muestra para entender mejor este fenómeno podemos apoyarnos de la siguiente imagen.



Figura 8: Diferencias entre Congelación rápida y lenta (Flash Freeze, 2024).

Es por esto que se emplean equipos de congelación rápida como super congeladoras o ultra congeladoras, ya que con una mayor velocidad de congelación se genera una mayor porosidad dentro de la matriz de la muestra a liofilizar, facilitando la sublimación y logrando

de esta manera una mejor conservación de la forma, estructura y propiedades de la muestra una vez liofilizada.

5.2.2 Secado Primario

El secado primario es la etapa más larga del proceso de liofilización y consiste en la eliminación de la mayor parte del agua presente en la muestra a liofilizar, esto mediante la aplicación de vacío en una cámara controlada, simultáneamente se le suministra energía a la muestra para que el hielo presente pase a estado gaseoso. Durante el secado primario se busca eliminar entre el 90% y 95% de la humedad de la muestra (Hu, Sun, Xiao, & Yang, 2024).

En el caso de esta investigación se usa un plato termorregulado suministrar energía a la muestra, es muy importante que durante el proceso la temperatura se controle cuidadosamente, ya que en caso de una aplicación de calor excesiva esto puede generar un deterioro en las propiedades organolépticas del alimento.

5.2.3 Secado secundario

El secado secundario es la fase final de la liofilización, donde se busca eliminar el agua ligada o residual de la matriz que se está liofilizando esto ya que parte del agua presente en el alimento puede estar químicamente unida a algunas moléculas o ha quedado adsorbida en las porosidades de la matriz, para la eliminación de esta agua se mantienen las condiciones de vacío y comúnmente se aumenta la temperatura, este secado es importante ya que aumenta la estabilidad y la duración del producto liofilizado.

5.3 Parámetros del proceso:

Como todo proceso, la liofilización depende de varios parámetros que determinan su resultado y eficacia, los cuales analizaremos a continuación:

5.3.1 Temperatura eutéctica.

La temperatura eutéctica es un parámetro crítico en la liofilización, ya que representa la temperatura más baja a la que una mezcla de solutos y solvente puede coexistir en equilibrio en estado sólido y líquido. Durante la liofilización, es esencial que la muestra se mantenga por debajo de su temperatura eutéctica para evitar el colapso estructural, la pérdida de calidad del producto y la pérdida de sus propiedades organolépticas. Si la temperatura excede este punto durante la sublimación, se pueden formar fases líquidas transitorias que comprometen la estabilidad de la matriz a liofilizar. Por esta razón, la determinación precisa de la temperatura eutéctica es clave para optimizar los parámetros del proceso y garantizar la conservación de las propiedades físicas y químicas, pudiendo con este parámetro generar procesos de liofilización a medida que sean más eficientes.

5.3.2 Temperatura de colapso.

La temperatura de colapso se define como la máxima temperatura que puede mantener un material permaneciendo estructuralmente estable, esto es ya que al superar esta temperatura

la matriz a liofilizar comienza a deformarse dañando la integridad de la matriz y disminuyendo su capacidad de rehidratación (Tang & Pikal, 2004).

Es importante destacar que el colapso de la estructura no necesariamente va de la mano con un colapso macro (visible) de la matriz de liofilización, en otras palabras, un producto liofilizado puede sufrir “microcolapso” en la estructura sin que esto se note en un colapso de la macroestructura.

5.3.3 Temperatura de transición vítrea.

La temperatura de transición vítrea habitualmente denominada “Tg”, corresponde a una temperatura de pseudotransición termodinámica, donde un material aparentemente rígido comienza a comportarse como un fluido, en el caso de la liofilización, es necesario que el proceso se desarrolle lo más cercano posible a esta temperatura, o idealmente por debajo de esta, para de esta forma mantener la estructura de la matriz a liofilizar y minimizar la fusión parcial, esto con el objetivo una vez más de mantener las propiedades estructurales y organolépticas de la matriz a liofilizar (Tang & Pikal, 2004).

Para el caso de las muestras orgánicas, la temperatura de transición vítrea es dependiente de la humedad del producto a liofilizar, en este caso el agua actúa como un “ agente plastificante” lo que provoca una mayor tendencia a fluir cuando la matriz posee una humedad mayor, lo que disminuye la temperatura de transición vítrea, dificultando la conservación de propiedades al liofilizar.

5.3.4 Porosidad.

La porosidad esta definida como la proporción de vacíos en la estructura del material en relación con su volumen total, esta porosidad es generada en parte por los espacios dejados por los cristales de hielo sublimados durante el proceso de liofilización, por lo que este parámetro esta influenciado por la velocidad de congelación, tamaño de los cristales de hielo presentes en la matriz congelada, tiempo de almacenamiento de la matriz congelada y el perfil de secado aplicado (Ratti, 2001).

Se busca que la matriz porosa sea homogénea ya que este tipo de matriz mejora los índices de rehidratación, mantiene la estructura y forma de la matriz lo que se traduce en una mejor calidad de producto final.

5.4 Diferencias entre secado convencional y liofilización

El secado convencional y la liofilización son dos métodos de deshidratación utilizados en diversas industrias, pero presentan diferencias significativas en su mecanismo y efectos sobre el producto final. El secado convencional, que incluye técnicas como el secado al aire caliente o por convección revisadas anteriormente, elimina el agua mediante la evaporación a temperaturas elevadas. Este proceso puede ocasionar cambios en la estructura, color, sabor y composición nutricional del material debido a la exposición al calor, sin embargo, es un proceso relativamente simple y rápido. En contraste, la liofilización es un proceso que

implica la congelación del producto seguida de la sublimación del hielo bajo condiciones de vacío, lo que permite la eliminación del agua sin pasar por el estado líquido. Como resultado, la liofilización preserva mejor la textura, los compuestos volátiles y los nutrientes, lo que la hace ideal para alimentos, productos farmacéuticos y materiales biológicos sensibles al calor (Ratti, 2001). Sin embargo, este método es más costoso y requiere un mayor consumo energético en comparación con el secado convencional.



Figura 9: Diferencias entre deshidratación por alta temperatura (izquierda) y liofilización (derecha) (Muesli2mix, 2024).

A la izquierda podemos visualizar las frutillas deshidratadas, las cuales presentan un oscurecimiento característico de los secados por altas temperaturas, además no se distingue bien la morfología de la frutilla, en contraste, a la derecha se pueden ver trozos de frutilla liofilizada, que mantiene mucho mejor el color rojo característico, y se pueden apreciar las partes de la frutilla original como el hipanto, eterio y achenios.

5.5 Ventajas de liofilizar

La liofilización ofrece ventajas muy atractivas para distintos objetivos, públicos y mercados, ya que presenta una amplia gama de beneficios que otras técnicas de conservación no pueden alcanzar, esto la transforma en una de las opciones más llamativas para la conservación de productos de alta calidad, también tiene un nicho en los productos que se benefician de tener el menor peso posible, algunas de las ventajas comparativas más prominentes que ofrece la liofilización se listan a continuación.

1. **Larga vida útil o Shelf Life:** los productos liofilizados poseen una humedad muy baja lo que minimiza el crecimiento de microorganismos, la acción enzimática y la oxidación, lo cual garantiza un producto estable frente a grandes tiempos de almacenaje, siempre y cuando este tenga un packaging adecuado.
2. **Mantenimiento de nutrientes:** los productos liofilizados preservan los valores nutricionales de los alimentos frescos, ya que esta se realiza a temperaturas bajas, no hay muchas oportunidades de degradación para los compuestos bioactivos

3. **Preservación de las propiedades organolépticas:** Los productos liofilizados conservan muy bien los factores como forma, color y sabor frente a las otras alternativas de conservación esto es debido a una mezcla entre las bajas temperaturas del proceso, lo poco invasivo de este y la carencia de un estado líquido durante el proceso.
4. **Minimización de peso y volumen:** Los productos liofilizados son extremadamente ligeros debido a su baja humedad, además productos como polvos liofilizados utilizan también un espacio mucho menor que sus contrapartes hidratadas.
5. **Rehidratación rápida:** Los productos liofilizados se rehidratan muy rápidamente debido a su alta porosidad, lo que puede generar rápidamente un producto muy similar al fresco.

5.6 Desventajas de liofilizar

Si bien la liofilización tiene varias ventajas que la transforman en un proceso muy llamativo para la conservación de alimentos y otros productos, también posee desventajas u obstáculos difíciles de ignorar, principalmente en los aspectos de costos y tiempos de proceso, los considerados más relevantes se enumeran a continuación:

1. **Tiempo de proceso:** La liofilización es un proceso muy lento en comparación con la gran mayoría de los otros procesos de conservación.
2. **Costo de inversión:** La liofilización es una tecnología muy avanzada que requiere una gran inversión en equipamiento para poder ser llevada a cabo, teniendo un costo de entrada bastante mayor a otros procesos de conservación.
3. **Costo de operación:** La liofilización requiere, en muchos casos, de horas de proceso en las cuales se deben mantener bajas temperaturas y entornos de vacío, lo que genera altos costos energéticos.
4. **Envasado del producto:** La liofilización genera un producto altamente higroscópicos que tienden a absorber humedad del ambiente muy rápido y empeorar la calidad del producto, es por esto que los alimentos liofilizados deben almacenarse en contenedores herméticos de interior seco durante su almacenamiento.
5. **Productos oleosos:** La liofilización se basa en el proceso de sublimación del agua, el cual es mucho más difícil de llevar a cabo en productos oleosos, por lo que la liofilización no genera resultados satisfactorios cuando se le es aplicada a este tipo de productos.

6 Rehidratación.

La rehidratación es un aspecto fundamental en la liofilización, ya que permite restaurar en gran medida las propiedades originales del material deshidratado. Este proceso consiste en la reincorporación de agua a la muestra liofilizada, lo que facilita la recuperación de su estructura, textura y funcionalidad. Una de las principales ventajas de la liofilización es que preserva la porosidad del producto, lo que permite una rápida y eficiente rehidratación sin alterar significativamente sus características físicoquímicas. Esto es especialmente importante en sectores como la industria alimentaria, donde se busca mantener el sabor, el aroma y los nutrientes de los productos deshidratados, así como en el ámbito farmacéutico y biotecnológico, donde la estabilidad y la actividad de compuestos sensibles, como proteínas y enzimas, dependen de una rehidratación adecuada. Además, la facilidad con la que un material liofilizado puede reconstituirse con solo agregar agua lo convierte en una opción ideal para aplicaciones donde la rapidez y la simplicidad en la preparación son esenciales, como en la alimentación para expediciones espaciales, emergencias o en la formulación de medicamentos inyectables.

6.1 Ventajas de rehidratar:

La rehidratación en la liofilización presenta múltiples ventajas que la convierten en un proceso altamente beneficioso en diversas aplicaciones:

1. Rápida recuperación de la textura y estructura original: esto debido a la alta porosidad generada durante la sublimación, lo que facilita la absorción de agua sin provocar alteraciones significativas.
2. Preserva el sabor, aroma y nutrientes: el proceso completo minimiza la degradación de compuestos sensibles al calor o a la oxidación. Lo cual es esencial en la industria alimentaria y farmacéutica.
3. Facilita la preparación y el consumo: los productos liofilizados pueden ser reconstituidos con solo añadir agua, lo que los hace ideales para situaciones donde se requiere rapidez y practicidad, como en alimentos instantáneos o medicamentos inyectables.
4. Mantiene la estabilidad y viabilidad de sustancias biológicas: este aspecto es crucial en productos como vacunas, probióticos y enzimas, asegurando que su funcionalidad no se vea comprometida tras la rehidratación.
5. Prolonga la vida útil sin el uso de conservantes: lo que nos permite almacenar los productos durante largos períodos sin necesidad de refrigeración y garantizando su calidad hasta el momento de su uso, con una reconstitución fácil, rápida y sin perder propiedades.

6.2 Desventajas de rehidratar:

A pesar de sus múltiples beneficios, la rehidratación en la liofilización también presenta ciertas desventajas que deben considerarse:

1. Tiempo de rehidratación variable: Aunque suele ser rápida, algunos productos pueden tardar más en absorber agua completamente, dependiendo de su composición y estructura porosa.
2. Pérdida parcial de textura o estructura: En algunos casos, la rehidratación no logra restaurar al 100% la firmeza o consistencia del material original, especialmente en productos con estructuras celulares complejas.
3. Costo elevado del proceso previo: La liofilización es un método costoso en comparación con otras técnicas de deshidratación, lo que puede hacer que los productos rehidratables sean menos accesibles.
4. Requiere disponibilidad de agua: Para la rehidratación es imprescindible contar con agua limpia y suficiente, lo que puede ser una limitación en entornos donde el acceso a este recurso es restringido.
5. Posible alteración de propiedades funcionales: Algunos compuestos sensibles, como proteínas o emulsiones, pueden no recuperarse completamente tras la rehidratación, afectando su funcionalidad o estabilidad.

7 Metodología.

7.1 Metodología general.

Esta investigación se enfoca en evaluar y comparar las características organolépticas de frutillas rehidratadas tras haber sido sometidas a diferentes temperaturas. El estudio comenzó con la caracterización de las frutillas, con el objetivo de asegurar que los datos obtenidos fueran representativos y comparables. Posteriormente, las muestras fueron previamente congeladas para favorecer la formación de una estructura adecuada que permitiera una correcta sublimación durante la etapa de secado primario. Esta etapa se llevó a cabo a una presión constante de 0.3 [mbar], aplicando tres temperaturas distintas (30, 40 y 50 [°C]) y, adicionalmente, se realizó una prueba complementaria a 40 [°C] y 0.6 [mbar]. En este proceso, se registraron los tiempos requeridos para completar el secado en cada condición. Una vez finalizado el proceso de liofilización, las frutillas fueron rehidratadas mediante inmersión en agua a 20 y 4 [°C], y posteriormente se evaluaron su capacidad de rehidratación (RC), así como parámetros relacionados con la textura y el color.

En la Figura 10 se puede observar un diagrama simplificado de la metodología general.

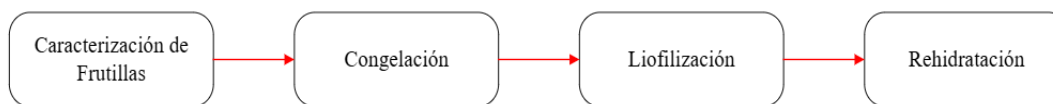


Figura 10, Diagrama de la metodología general.

7.2 Métodos.

7.3 Selección y Preparación de Muestras.

En primer lugar, para la preparación de las muestras, se lavó con agua corriente las frutillas y se secaron usando papel absorbente, luego se les removió pedúnculo de la frutilla y se cortaron procurando dejar una sección en el diámetro mayor de la base de la frutilla.

Posteriormente para la caracterización de las muestras, se pesaron las frutillas secas y sin pedúnculo y luego se separaron las frutillas en grupos de pesos y formas similares, esto con el objetivo de estandarizar lo más posible las pruebas subsecuentes. Una vez segregadas las frutillas se envasaron de forma individual en bolsas herméticas anotando el respectivo gramaje e identificado a la frutilla con un ID único.

Los paquetes de frutilla individuales se congelaron a -35°C en una Ultra Congeladora, para posteriormente mantenerlo refrigerarlo usando una congeladora común, en esta última también se mantuvieron los platos del liofilizador durante 15 minutos, antes de cada uso para ambientarlos.

7.4 Determinación Tiempo de Congelación.

Para la determinación del tiempo de congelación se usó una Ultra Congeladora, la cual se configuró a una temperatura de -35°C , a su vez también se usaron termocuplas, las cuales se pusieron en el centro de la frutilla, una vez el equipo alcanzó la estabilidad en la temperatura programada, se introdujeron las frutillas con termocuplas, y se documentó el perfil de temperatura que estas experimentaron, se dio por terminado el experimento cuando ambas frutillas alcanzaron los -35°C ya que esa fue la temperatura de congelación previamente definida.

7.5 Proceso de Liofilización.

Cada ciclo de liofilización cuenta con 2 platos y 7 frutillas, las cuales se disponen con 1 frutilla en el plato superior y 6 en el inferior, donde cada una se encuentra caracterizada e identificada en la distribución del plato, posteriormente se siguen los siguientes pasos descritos a continuación.

Acondicionamiento del equipo: verificar que el equipo se encuentre drenado y a presión atmosférica. Luego se pone la tapa y se cierran válvulas de aireación y drenado, para luego iniciar el programa Warm-Up del equipo, esto con el objetivo de estandarizar las condiciones iniciales de cada experimento y procurar un buen cuidado del equipo.

Preparación de las muestras: se ordenan e identifican las frutillas de cada plato procurando una distribución que mantenga espacio entre ellas, a ambos platos se les conecta una termocupla para poder monitorear el proceso.

Programación del equipo: Se genera un programa en el equipo con los parámetros acorde a las pruebas a realizar, configurando la temperatura a 30, 40 o 50 [°C] según corresponda y la presión a 0.3 [mBar], adicionalmente se genera un programa fijando la temperatura a 40[°C] y la presión a 0.6 [mBar] para el experimento adicional.

Inicio del proceso: Se introducen los platos con las frutillas previamente identificadas y distribuidas al liofilizador, se selecciona el programa a seguir durante el ciclo de liofilizado y se inicia el proceso.

Término del secado: para saber cuándo termina el secado primario del alimento se utiliza el test de presión (PRT en inglés), cuando este marque un 10% de cambio en la presión, se concluye que termina el proceso. (United States of America. Patente nº US2994132A, 1957)

7.6 Determinación de Tiempo de Proceso.

Para esta investigación se contará el tiempo de proceso en el fin del secado primario, y para determinar el fin del secado primario, se utilizará el método del test de diferencial de presión, este método consiste en medir el cambio de presión en la cámara de liofilización, aislada del resto del sistema, durante 30 segundos, este test se realiza periódicamente cada una hora en cada ciclo de liofilización, y se determina que el secado primario ha terminado cuando la diferencia de presión en estos 30 segundos es menor a un 10%, esto ya que en este caso, la sublimación del agua en este periodo ha sido muy baja debido a la poca humedad remanente en la muestra.

Es importante señalar que este método de medición perturba el sistema, y puede generar resultados variables tanto en el resultado del test como en el resultado de liofilización, sin embargo, debido a limitaciones de equipo, es el método más robusto al que tuvimos acceso.

7.7 Medición de Humedad.

El proceso de medición de humedad utilizado fue la metodología 934.06 de la AOAC (Association of Official Analytical Chemists), que consiste en poner las muestras a medir, en este caso frutillas recién terminado su proceso de liofilización y registrar su peso usando una balanza, posteriormente estas se depositan en desecadores con gel de sílice y generando un vacío de 300 [mBar] al interior de los desecadores, luego estos desecadores con las muestras posteriormente son introducidos a un horno mufla a 70 [°C], las muestras se mantienen al interior del horno por 24 horas, posteriormente se retiran y se pesan nuevamente para determinar la diferencia la cual corresponde a la masa de agua remanente de las frutillas liofilizadas. (Clifford, 1934)

Para el cálculo de la humedad porcentual de las muestras se aplica la siguiente fórmula:

$$\%Humedad = \frac{Peso\ húmedo - Peso\ seco}{Peso\ húmedo} \cdot 100$$

7.8 Curva de Velocidad de Rehidratación.

El proceso de elaboración de la curva de velocidad de rehidratación es un método propio que consiste en una prueba de rehidratación a temperatura constante, donde se colocan las frutillas a medir al interior de un vaso de precipitado con agua, con otro vaso de precipitado sobre la frutilla, esto con el objetivo que la frutilla se mantenga totalmente sumergida, para esto el vaso superior también debe tener una pequeña cantidad de agua, para que se mantenga una temperatura constante, se sumergen los vasos de precipitado en un baño termorregulado como se puede ver a continuación.



Figura 11: Arreglo de rehidratación en baño termorregulado.

El proceso inicia cuando se sumergen las frutillas completamente en agua, luego se esperan intervalos de tiempo definidos, al pasar estos intervalos se retira la frutilla del agua, se escurre ligeramente y se pesa, la diferencia de peso entre el intervalo “n” y el intervalo “n + 1” nos permite la cantidad de agua reabsorbida por la frutilla, y con varios puntos podemos generar un estimado de la velocidad de absorción, es importante señalar que, una vez terminado el pesaje de la frutilla esta se devuelve al vaso con agua para esperar al siguiente intervalo.

Los intervalos utilizados para este proceso fueron decididos con la hipótesis que la absorción de agua sería mas rápida al inicio del proceso e iría decayendo conforma va pasando el tiempo, los intervalos seleccionados fueron de 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 90 y 120 minutos.

Para el cálculo del estimado de velocidad, se ajustará una curva a los resultados obtenidos, procurando que esta presente un buen ajuste, posteriormente se derivará la función de la curva

ajustada para obtener una nueva función de velocidad donde se ingresarán los datos de los intervalos para estimar la velocidad de rehidratación en ese punto.

Estas pruebas se llevaron a cabo a temperaturas de 4[°C] y 20[°C], para los 3 casos de liofilización, cada una de ellas en triplicado, por lo que se hicieron 6 pruebas de 3 frutillas cada una.

7.9 Calidad de Rehidratación.

El proceso de rehidratación consta de poner las frutillas liofilizadas en un recipiente con agua, con algún objeto sobre la frutilla que mantenga a la frutilla completamente sumergida, en este caso en específico se utilizaron 2 vasos de precipitado con agua, uno grande y uno pequeño, uno dentro de otro.

La rehidratación se hizo a temperatura constante en 2 modalidades, a temperatura ambiente definida como 20 [°C] y en refrigeración a 4 [°C] esto ya que son 2 formas de inmersión en agua simples que se pueden replicar con insumos muy básicos, para el caso de 20 [°C] se usó un baño termostático de la misma forma que en la Figura 11, y para el caso de refrigeración se utilizó un refrigerador programado a 4 [°C] el periodo de rehidratación fue de 24 h en ambos casos.

Para la determinación de la rehidratación se utilizará un valor de Coeficiente de Rehidratación o RC por sus siglas en inglés, el método de cálculo se detalla a continuación:

$$RC = \frac{P_r - P_l}{P_0 - P_l} \cdot 100$$

Donde P_r , P_l y P_0 corresponden a el peso de la muestra rehidratada, el peso de la muestra liofilizada y el peso inicial de la muestra respectivamente.

7.10 Medición de Textura.

Para la medición de textura se usa el texturómetro TexturePro CT V1.2 Build 9, aplicando test de fuerza que modelan los puntos de quiebre de la muestra, esto con el objetivo que cuantifique la fuerza necesaria para deformar o morder el fruto, expresado en Newtons. Según lo expuesto por Muñoz & Vega (Muñoz & Vega, 2014), la dureza de un alimento corresponde a la fuerza necesaria para deformar un alimento entre los molares y en el caso de la prueba de textura que llevaremos a cabo, esta dureza corresponderá a la fuerza máxima registrada durante la prueba aplicando el test de compresión cuando la frutilla llega a un 30% de compresión.

Para efectos de la investigación, se entenderá como textura del alimento la dureza que presente este en el test de compresión, y a su vez esta dureza corresponderá a la fuerza máxima registrada por el texturómetro durante el test de compresión.

Se le midió la textura a frutillas frescas, descongeladas y rehidratadas, todas usando el mismo tipo de test, con la misma sonda de prueba cilíndrica y el mismo programa para la prueba,

variando únicamente las dimensiones de la frutilla (muestra) siendo los parámetros de operación los que se muestran a continuación

Tabla 1: Parámetros usados en el test de textura.

Parámetro	Valor
Tipo de muestra	Bloque
Largo de muestra [mm]	Variable
Diámetro de muestra [mm]	Variable
Tipo de test	Compresión
Deformación [%]	30
Carga de activación [N]	0.07
Velocidad Test [mm/s]	1
Sonda	TA11/1000
Contador de ciclos	1
Tiempo de recuperación [s]	0

7.11 Medición de Color.

Las mediciones de color comienzan por calibrar el equipo al blanco, esto mediante una placa de calibración provista por el fabricante, se realizan 3 pruebas de calibración al inicio para minimizar errores y asegurar la robustez de los datos.

Para las frutillas, se realizaron 3 mediciones en el plano ecuatorial, para poder sacar un color promedio en del fruto, registrando las coordenadas de color (L^* , a^* , b^*) que marcaba el instrumento (Konica Minolta, 2007).

Con las coordenadas de color registradas es posible operar para conseguir el Tono (o Hue) que nos permite describir la percepción del color e identificar al tendencia cromática de la muestra. También podemos conseguir el valor del croma (o saturación), que nos ayuda a concluir de la intensidad del color exhibido, los métodos de cálculo para los valores anteriormente mencionado se presentan a continuación.

$$Hue_{ab} = \arctg\left(\frac{b^*}{a^*}\right)$$

$$Croma_{ab} = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2}$$

La prueba de medición de color se le aplico a los siguientes grupos de muestras:

- Frutillas frescas.
- Frutillas descongeladas.
- Frutillas liofilizadas a 30 [°C] y rehidratadas.
- Frutillas liofilizadas a 40 [°C] y rehidratadas.
- Frutillas liofilizadas a 50 [°C] y rehidratadas.

7.12 Experimentos a Distinta Presión.

Una vez terminados los experimentos anteriores, se seleccionará la temperatura que haya obtenido los resultados más favorables y se efectuará una ronda de experimentos al doble de presión en la cámara de liofilización, esto con el objetivo de evaluar la injerencia de la presión de proceso en los factores de calidad antes mencionados, los experimentos incluirán:

- Curva de velocidad de Rehidratación.
- Rehidratación Completa.
- Efecto en el Color.
- Efecto en la Textura.

8 Materiales y Equipos.

8.1 Materia Prima.

Para esta investigación, la única materia prima utilizada fueron frutillas, estas fueron adquiridas en un formato de 300 gramos en caja de plástico, de la marca Hortifrut en un supermercado local, esto con el objetivo de estandarizar las frutillas a utilizar.

8.2 Equipos.

8.2.1 Liofilizador.

Para el desarrollo de este proyecto, se utiliza in liofilizador marca Christ, modelo Alpha 2-4 LSCplus, cuyos sistemas claves se indican a continuación:

1. Condensador del Equipo: se utiliza para retener los vapores condensables que puede albergar la cámara de liofilización, esto con el objetivo que estos salgan de la atmosfera controlada y que estos vapores condensables no lleguen al sistema de vacío.
2. Sistema de Vacío: se utiliza para proporcionar una atmósfera de baja presión para poder hacer posible la sublimación del agua, y así llevar a buen puerto el secado primario, este sistema de vacío lo proporciona una bomba de vacío de la marca Vacuubrand, modelo Aggregat RZ 6.
3. Cámara de Liofilización: es el lugar donde se dispone el producto a liofilizar, en este caso consiste en un domo cilíndrico donde se genera vacío, además cuenta con platos

donde se colocan las muestras, estos platos cuentan con un sistema de control de temperatura que proporciona la energía para la sublimación.

8.2.1.1 Sensores de Temperatura:

El Liofilizador cuenta con termocuplas asociadas a los platos que miden la temperatura del plato, a su vez se pueden introducir termocuplas al interior de las muestras para monitorear el perfil de temperatura del objeto de estudio, sin embargo, esto último queda fuera de los alcances del trabajo.

8.2.1.2 Sensores de Presión:

El equipo cuenta con 2 sensores de presión:

Sensor Capacitivo: es un sensor de presión que funciona especialmente bien en vacíos bajos, el cual se basa en el movimiento de una membrana para medir la presión.

Sensor Pirani: es un sensor de presión que está diseñado para operar en vacío bajo y medio, por lo que posee un rango de acción mayor que el capacitivo, este genera una medición en función a la velocidad de disipación de calor de un hilo al interior del sensor, sin embargo, este no se encuentra correctamente calibrado, por lo que no será muy útil para el proyecto.



Figura 12: Liofilizador Christ, modelo Alpha 2-4 LSCplus, usado en este estudio.

8.2.2 Ultra Congeladora.

Para congelar las frutillas de una forma rápida, y así disminuir los daños a la estructura, se utiliza una Ultra congeladora modelo Miniturbo MT05 de la marca Alaska S.R.L.

Este equipo se utilizó para la congelación rápida de las frutillas una vez adquiridas y para hacer la medición del tiempo de congelación de estas, ambas con una configuración de -30 $^{\circ}\text{C}$.



Figura 13: Ultra congeladora Alaska Miniturbo MT05, usada en este estudio.

8.2.3 Congelador Corriente.

Una vez congeladas las frutillas, se usa un congelador corriente para almacenar las muestras congeladas, ya que este posee menor oscilación térmica que la Ultra Congeladora usada para congelar el producto además de poseer más espacio para poder almacenar más muestras de forma cómoda, el equipo es de la marca Mabe modelo “FHV7SWWWM C.C. ST.” Y se mantuvo programado a -30 $^{\circ}\text{C}$ durante toda la duración de los experimentos.



Figura 14: Congeladora de almacenamiento usada en este estudio.

8.2.4 Estufa de Laboratorio.

Para las pruebas de humedad, se utiliza una estufa de laboratorio Memmert UM200, el cual cuenta con un volumen interno de 32 [L] y una temperatura máxima de 220 [°C], este es utilizado ya que es el equipo disponible que mejor se adecua a las necesidades de los experimentos a realizar.



Figura 15: Estufa de laboratorio Memmert UM200, usada en este estudio.

8.2.5 Colorímetro.

El colorímetro utilizado para la medición del color es el Konica Minolta CR-400, equipo que puede medir las coordenadas de color en varios espacios cromáticos, para esta investigación se utilizan el espacio cromático CIE-Lab* el cual tiene las siguientes coordenadas:

- L*: Corresponde a la luminosidad de la muestra siendo valores positivos el blanco y valores negativos el negro.
- a*: Corresponde al eje rojo-verde de la muestra, siendo los valores positivos el rojo y los valores negativos el verde.
- b*: Corresponde al eje amarillo-azul de la muestra, siendo los valores positivos el amarillo y los valores negativos el azul



Figura 16: Colorímetro Konica Minolta modelo CR-400, usado en este estudio.

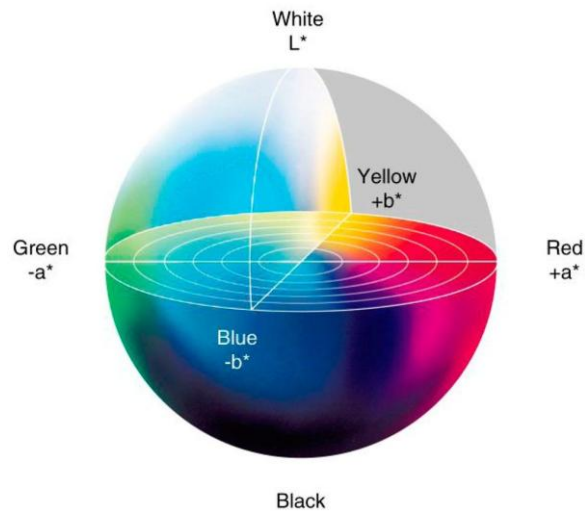


Figura 17: Representación del espacio de color CIE-Lab*

8.2.6 Texturómetro.

Para las mediciones de textura se utiliza un texturómetro TexturePro CT V1.2 Build 9, este equipo puede realizar distintas pruebas para textura, entre las cuales podemos destacar Compresión, Penetración, Deformación, entre otras. En este caso se utilizarán pruebas de compresión para determinar la fuerza necesaria para comprimir la muestra.

El equipo es controlado mediante un computador externo conectado mediante un cable y operado por un software provisto por el fabricante, en este software se puede programar el tipo de prueba a realizar y los parámetros de esta, asegurando repetibilidad y precisión.



Figura 18: Texturómetro TexturePro CT V1.2 Build 9, usado en este estudio.

8.2.7 Balanza.

Para saber los pesos de las muestras se usó una balanza analítica de precisión, las muestras fueron pesadas a 3 decimales de certeza, y antes de comenzar los experimentos la balanza fue calibrada usando masas patrón.

El equipo corresponde a una balanza analítica de precisión RADWIG “AS 200/C/2”, con una capacidad máxima de 220 gramos y una legibilidad de 0.1 miligramos.

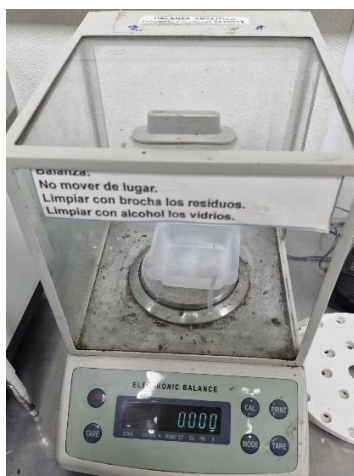


Figura 19: Balanza analítica RADWIG modelo AS 200/C/2, usada en este estudio.

9 Resultados y Discusión.

9.1 Determinación del tiempo de congelación.

A continuación, se presentan los resultados de tiempo de congelación graficados:

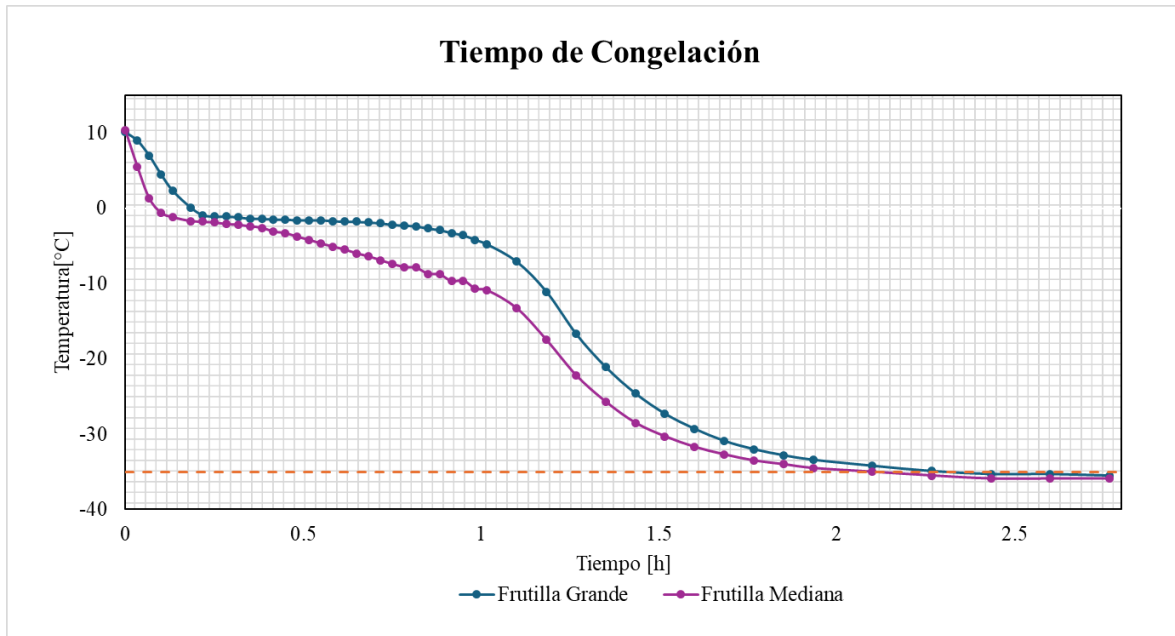


Figura 20: Gráfica de tiempo de congelación.

En la Figura 20, se pueden apreciar claramente 3 etapas, un enfriamiento inicial, donde ambas muestras bajan rápidamente a 0 [°C], luego un periodo donde las muestras se enfrían lentamente que se le atribuye al calor latente requerido para el cambio de fase, y posteriormente se vuelve a un enfriamiento rápido hasta alcanzar la estabilidad alrededor de los -35 [°C], las diferencias de las gráficas son atribuidas a una diferencia de tamaño entre las muestras.

Finalmente, para garantizar que todas las frutillas lleguen a -35°C en su centro, se define que las frutillas están completamente congeladas luego de 2 horas y 30 minutos en la Ultra Congeladora, y este es el tiempo de congelación que se utilizará para las pruebas de liofilización.

9.2 Determinación de Tiempo de Proceso de Liofilización.

Como se describió anteriormente, la determinación del tiempo de proceso se calculará en función del test de presión, los resultados procesados del test de presión se muestran en la Figura 21 (gráfica original en el anexo):

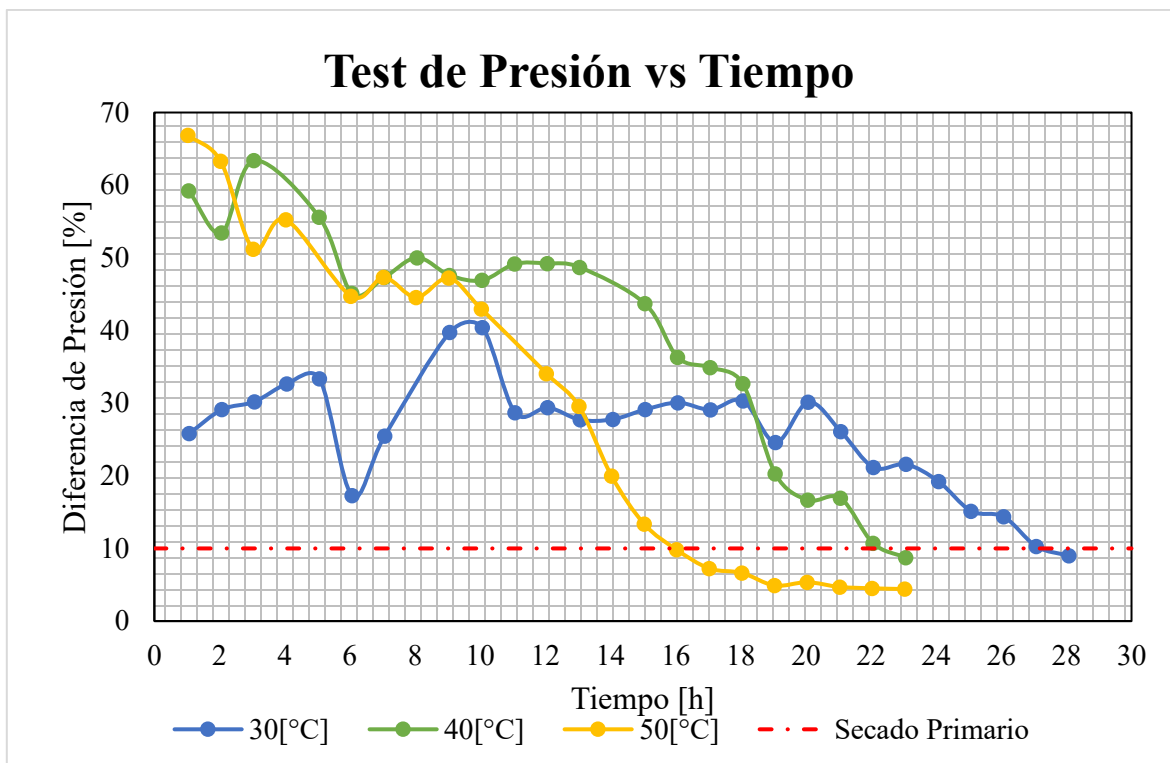


Figura 21: Resultados del tiempo de proceso.

De estos datos podemos estimar los tiempos de secado primario para las distintas temperaturas, los valores obtenidos se muestran en la Tabla 2:

Tabla 2: Resumen de los tiempos de proceso a utilizar.

T° de Liofilización:	Tiempo de Proceso:
30[°C]	28 horas
40[°C]	23 horas
50[°C]	16 horas

Los resultados obtenidos son congruentes con lo expuesto por Meda y Ratti, donde se señala que el tiempo de proceso para la liofilización de frutillas fue de 28 horas. (Meda & Ratti, 2005)

9.3 Curva de Velocidad de Rehidratación.

Los resultados obtenidos de la curva de velocidad se pueden visualizar en la Figura 22.

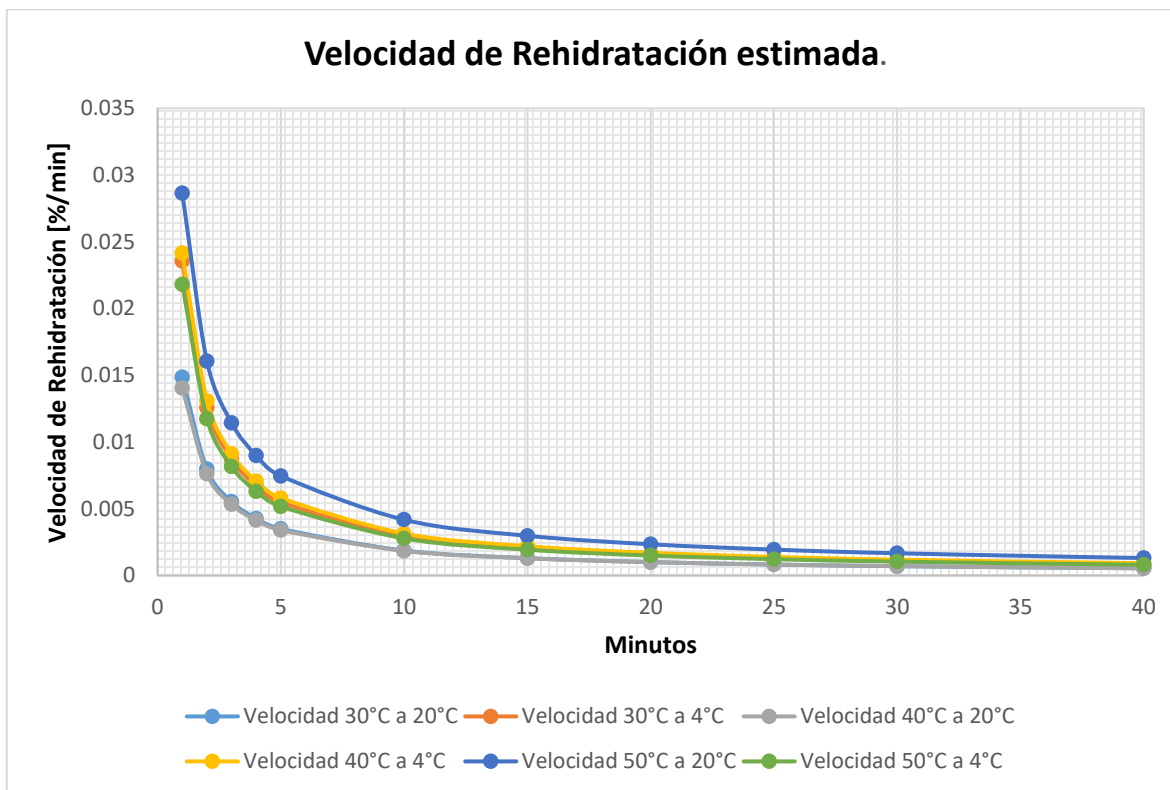


Figura 22: Grafica de Velocidad de rehidratación obtenida.

La Figura 22 muestra que las velocidades de rehidratación de los distintos casos siguen el mismo patrón, no se incluyeron los últimos intervalos para poder apreciar mejor las diferencias entre las curvas.

Se puede argumentar que la rehidratación a baja temperatura tiene ligeras ventajas en velocidad que su contraparte a temperatura ambiente, pero para resultados más concluyentes es necesario elaborar un estudio con mayor cantidad de muestras.

9.4 Calidad de Rehidratación.

En la Figura 23 se presentan los resultados de los coeficientes de rehidratación o RC para los casos estudiados.

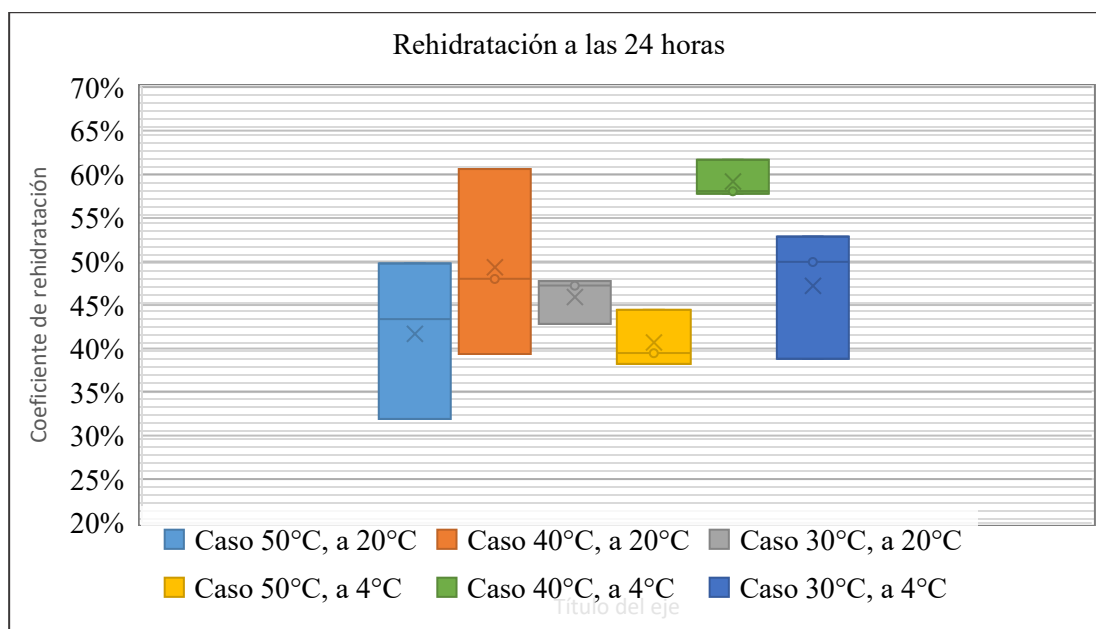


Figura 23: Resultados de rehidratación.

En este caso es posible apreciar que la mejor situación de rehidratación en frutillas liofilizadas a 40 [°C] y 4 [°C], siendo los coeficientes de rehidratación promedio los siguientes:

Tabla 3: Resumen de resultados de rehidratación.

Caso de Rehidratación	Coefficiente de Rehidratación [%]
30 [°C] rehidratado a 20 [°C]	45.93
30 [°C] rehidratado a 4 [°C]	47.22
40 [°C] rehidratado a 20 [°C]	49.32
40 [°C] rehidratado a 4 [°C]	59.16
50 [°C] rehidratado a 20 [°C]	41.70
50 [°C] rehidratado a 4 [°C]	40.71

De esto podemos decir que el liofilizado a 40[°C] tiene una mejora en la capacidad de rehidratación en ambos casos, siendo más notorio cuando las muestras son rehidratadas a 4 [°C], aparte de esto se puede ver que la rehidratación a 4 [°C] presenta leves mejorías frente a la rehidratación a temperatura ambiente, resultados similares fueron obtenidos por Meda y Ratti (Meda & Ratti, 2005).

9.5 Efectos en el Color.

A continuación, se presentan los resultados del análisis de color de la muestras:

Tabla 4: Resultados del efecto en el color

Muestra	L*	A*	B*	Tono (Hue)	Croma
Fresca	33.67	28.15	17.72	32.19	33.26
Descongelada	31.18	25.99	16.56	32.50	30.82
Caso 30°C, a 20°C	35.64	28.35	17.95	32.34	33.56
Caso 30°C, a 4°C	36.29	32.40	21.74	33.85	39.02
Caso 40°C, a 20°C	34.29	29.23	18.45	32.25	34.56
Caso 40°C, a 4°C	31.55	30.45	18.16	30.81	35.46
Caso 50°C, a 20°C	38.38	32.77	21.64	33.43	39.27
Caso 50°C, a 4°C	35.35	32.07	18.50	29.99	37.02

Análisis Muestra a Muestra respecto de la frutilla fresca:

- Descongelada: Presentan una luminosidad disminuida, en conjunto con virajes al verde y al azul, lo que nos comunica menor calidez en los colores, que se puede traducir también en una menor vivacidad o saturación, idea reforzada por la disminución en el croma.
- Caso 30°C, a 20°C: En este caso se evidencia un aumento de la luminosidad, conservando bastante más los valores de rojo y amarillo de la muestra.
- Caso 30°C, a 4°C: Se puede apreciar un alza notable en la luminosidad de la muestra, como también un aumento de las tonalidades rojas y amarillas de la muestra, lo que una vez más se traduce en un aumento importante en la saturación o vivacidad del color.
- Caso 40°C, a 20°C: Presenta un leve aumento de luminosidad, incluyendo un aumento notable en las tonalidades roja y amarilla de las muestras, conserva un valor de tono similar al original y presenta una saturación mayor.
- Caso 40°C, a 4°C: En este caso existe una disminución en la luminosidad, siendo la única muestra liofilizada que presenta estas características, sin embargo, presenta un viraje al rojo y al amarillo, en congruencia con el resto de las muestras liofilizadas.
- Caso 50°C, a 20°C: Esta muestra es la que experimento un mayor cambio de color promedio de toda la serie de pruebas, aumentando bastante su luminosidad, intensidad de rojo, e intensidad de amarillo.
- Caso 50°C, a 4°C: Se pueden apreciar variaciones muy similares a la otra muestra de 50°C solo que en este caso con menor magnitud.

En promedio podemos decir que la baja temperatura de rehidratación ayuda a minimizar el cambio de color de las muestras, así como también una menor temperatura de liofilización también ayuda a conservar las coordenadas de color en general.

Como acotación subjetiva, al realizar las pruebas, las frutillas que fueron rehidratadas en refrigeración se notaban con un color similar al esperado, y el agua donde fueron rehidratadas era bastante más transparente que en la contraparte a temperatura ambiente, la comparativa se puede ver en la Figura 24.



Figura 24: Diferencias visuales entre rehidratación a 20 °C y 4 °C, respectivamente.

9.6 Efectos en la Textura.

Luego de realizar las pruebas de compresión a cada una de las muestras en triplicado, se determinó la fuerza máxima de cada uno de los test de compresión, para posteriormente determinar el promedio de la fuerza máxima en Newtons, los resultados obtenidos se pueden en la siguiente tabla.

Tabla 5: Resumen de resultados del efecto en la textura.

Muestra	Promedio Fuerza Máxima [N]
Fresca	31.32
Descongelada	5.99
Caso 30°C, a 20°C	0.77
Caso 30°C, a 4°C	0.80
Caso 40°C, a 20°C	0.69
Caso 40°C, a 4°C	0.96
Caso 50°C, a 20°C	0.54
Caso 50°C, a 4°C	0.54

Como es de esperar el caso que presenta mejor firmeza es el la frutilla fresca, ya que en ese punto la estructura está intacta, conservando una buena consistencia, siendo su dureza de 31.32 [N] bastante superior al resto de muestras analizadas.

Respecto de las frutillas descongeladas, estas vienen en segundo lugar, teniendo una firmeza bastante inferior a la muestra fresca, y contando con una fuerza máxima de 5.99 [N], esto da indicios que la estructura interior de la frutilla ha perdido estabilidad, siendo este fenómeno atribuido a la formación de cristales de hielo en su interior, que posteriormente se descongelaron generando alteraciones en la estructura.

Sobre las frutillas liofilizadas se puede decir que son las que más deterioro de textura sufrieron, llegando a tener una fracción de la dureza de las frutillas descongeladas, el mejor exponente de este grupo registró una fuerza promedio de 0.96 [N].

Los resultados también dejan entrever que cuando la frutilla es sometida a 50[°C] durante la liofilización esta pierde firmeza respecto a sus contrapartes liofilizadas a temperatura menor, no se registran diferencias significativas entre las frutillas liofilizadas a 30 [°C] y 40 [°C].

La temperatura de rehidratación tampoco parece afectar a la firmeza de las frutillas ya que las diferencias se encuentran dentro del rango de error esperado.

Por todo lo anterior, podemos señalar que el proceso de congelación perjudica en gran medida la textura o firmeza de las frutillas, asimismo, el proceso de liofilización y rehidratación también generan una pérdida importante en la textura o firmeza, lo cual dice relación con expuesto por Meda y Ratti. (Meda & Ratti, 2005)

9.7 Resultados del Experimento Adicional.

Para los experimentos de alta presión se decidió usar la temperatura de 40 [°C] ya que fue la que obtuvo los resultados más satisfactorios en la mayoría de las pruebas anteriormente descritas, y la presión utilizada para los experimentos es de 0.6 [mBar], el doble de la presión anterior.

9.7.1 Curva de velocidad de Rehidratación:

Los resultados de la curva de velocidad para el caso de alta presión son los siguientes:

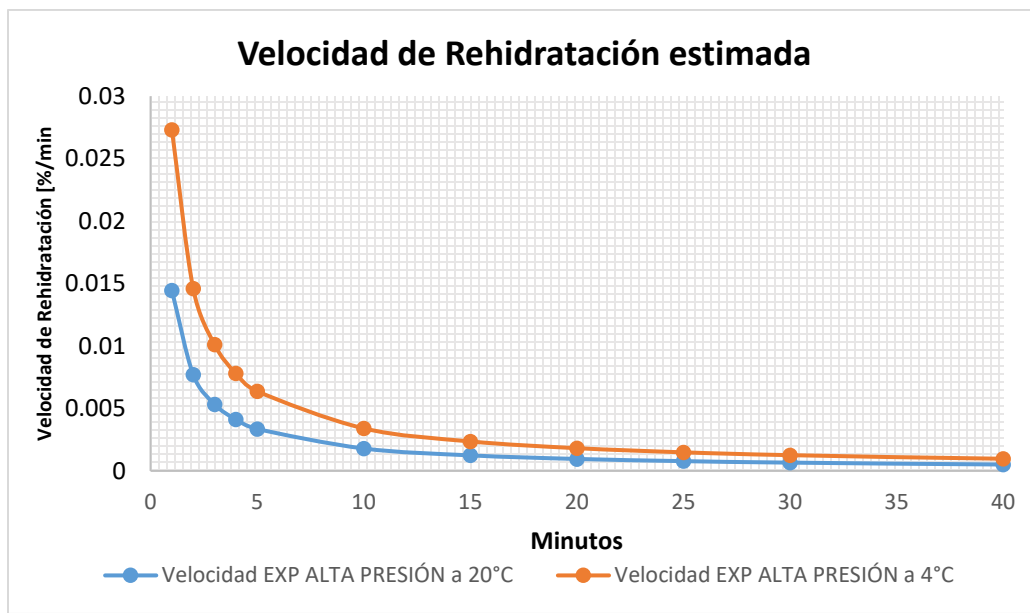


Figura 25: Curva de velocidad, caso alta presión.

Estos datos apoyan la idea anteriormente planteada, ya que la velocidad de rehidratación es mayor en el caso de temperaturas bajas, sin embargo, las muestras consideradas son relativamente pequeñas, lo que dificulta generar una conclusión sólida respecto a la relación entre la velocidad de rehidratación y la temperatura de la rehidratación.

Adicionalmente se puede decir que en esta oportunidad la muestra que fue tratada con presión más alta tuvo resultados más favorables que el promedio de las muestras a temperaturas más bajas.

9.7.2 Calidad de rehidratación.

A continuación, se presentan los resultados de los coeficientes de rehidratación o RC para los casos de alta presión, también se incluye un compendio de los resultados de rehidratación completa de todos los experimentos llevados a cabo.

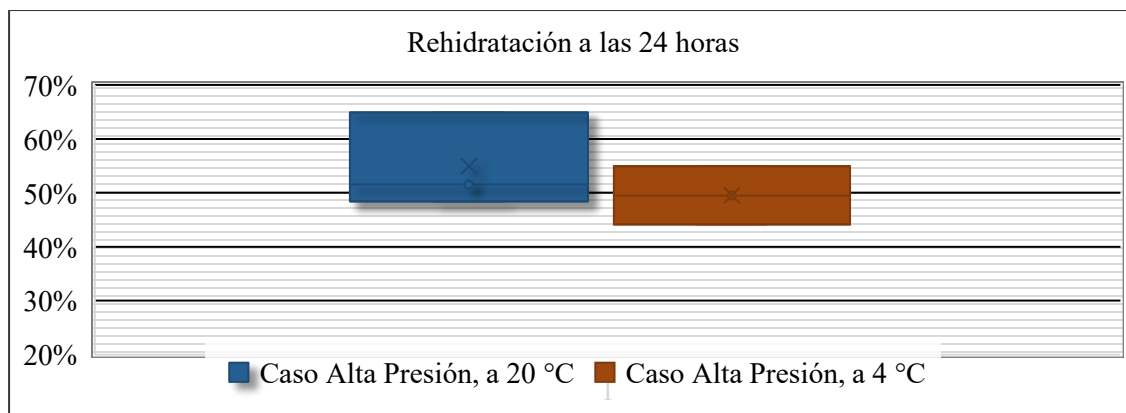


Figura 26: Resultados de rehidratación, caso alta presión.

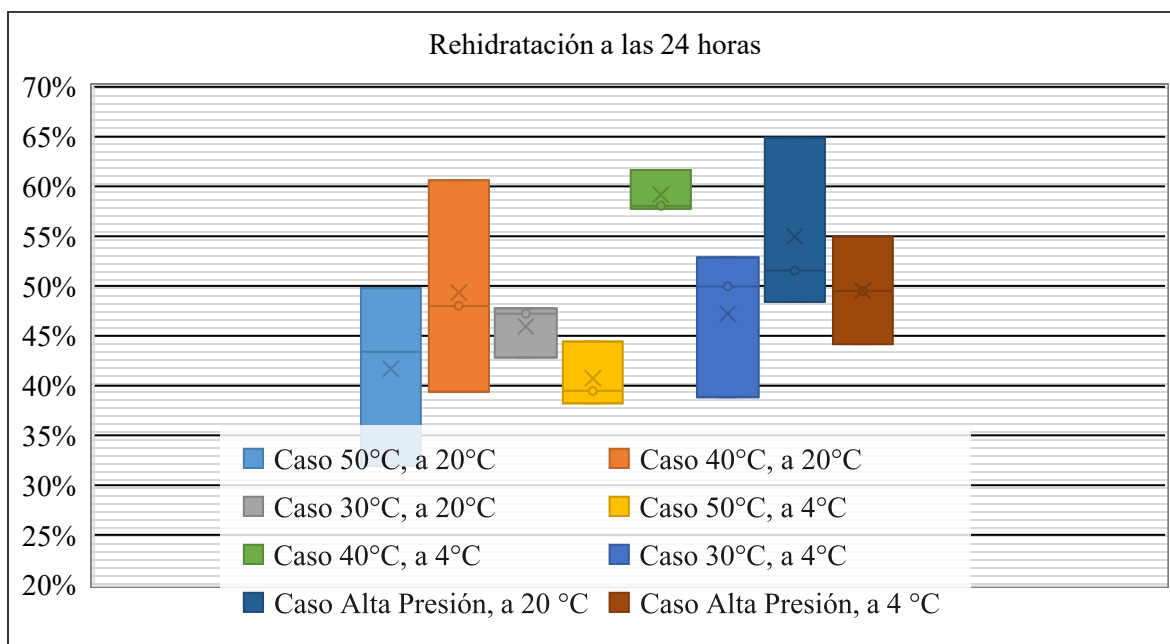


Figura 27: Resultados de rehidratación, todos los casos.

En este caso, las muestras que fueron tratadas a mayor presión parecen tener una mayor capacidad de rehidratación, sin embargo, los resultados obtenidos son similares a los de las muestras tratadas a baja presión y a 40 [°C] por lo que se puede concluir que operar al doble de presión no tiene efectos negativos notorios en la rehidratación.

9.7.3 Efecto en el Color.

Los resultados de la evaluación del efecto en el color para la prueba de alta presión se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 6: Resultados del efecto en el color, caso alta presión.

Muestra	L*	A*	B*	Tono (Hue)	Croma
Fresca	33.67	28.15	17.72	32.19	33.26
Caso Alta Presión, a 20 °C	38.22	28.07	17.73	32.27	33.20
Caso Alta Presión, 4 °C	30.40	29.90	16.43	28.79	34.12

Análisis Muestra a Muestra respecto de la frutilla fresca:

- Caso Alta Presión, a 20 °C: Se puede apreciar un aumento importante en la luminosidad de la muestra, lo que indica un blanqueamiento de esta, pero el resto de los parámetros de color se conservan sorprendentemente bien, siendo notoriamente similares a la frutilla fresca.

- Caso Alta Presión, 4 °C: Al contrario de la muestra anterior, en este caso la luminosidad de la muestra se ve mermada, la muestra presenta un viraje hacia las tonalidades rojas y azules, lo que afecta notoriamente el tono.

En síntesis, operar con una presión más alta no tiene resultados negativos marcados en comparación con las condiciones originales de presión.

9.7.4 Efecto en la Textura:

Los resultados de la prueba de textura se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 7: Resultados del efecto en la textura, caso alta presión.

Muestra	Promedio Fuerza Máxima [N]
Fresca	31.32
Descongelada	5.99
Alta Presión, a 20 °C	1.44
Alta Presión, a 4 °C	0.78

Si comparamos estos resultados con los de el proceso a baja presión, podemos decir que el caso de alta presión conserva la firmeza levemente mejor que su contraparte a baja presión, por lo que una vez más, operar a mayor presión no genera un daño notable a este factor de calidad.

10 Conclusiones.

El objetivo principal del presente estudio fue evaluar la influencia de las condiciones de liofilización en los factores de calidad una vez rehidratadas, para esto se consideraron pruebas de liofilización con temperatura de plato de 30, 40 y 50 °C a 0.3 [mBar] y un experimento adicional a 0.6 [mBar] para el caso a 40°C, en los cuales se evaluó principalmente como afectan estos parámetros de proceso en la calidad de rehidratación, textura de las muestras rehidratadas y color en las muestras rehidratadas.

En cuanto a la calidad de rehidratación, se determinó que la temperatura de plato de 40 °C produjo los mejores resultados. La rehidratación fue más eficiente a 4 °C, con un RC de 59.16%, frente al 49.32% obtenido a 20 °C, lo que sugiere que el proceso está dominado por la porosidad más que por la difusión. No se observaron diferencias significativas entre las presiones de 0.3 y 0.6 [mBar] a 40 °C, con valores promedio de 59.16% y 54.95%, respectivamente, lo que indica que operar a presiones más altas podría reducir costos y consumo energético, sin embargo es importante destacar que ese es solo un punto y puede no ser representativo, por lo que se recomienda experimentar con liofilización a distintas presiones.

Sobre la textura, se concluyó que las frutillas rehidratadas no alcanzan una calidad competitiva respecto a las frutillas frescas o descongeladas, registrando una firmeza de 1.44 [N] frente a 31.32 [N] y 5.99 [N], respectivamente. No se observaron diferencias

significativas al variar la temperatura de liofilización o rehidratación, aunque se evidenció una leve mejoría con el aumento de la presión, posiblemente asociada a la variabilidad natural de los frutos.

En cuanto al color, la temperatura de liofilización de 40 °C generó los resultados más favorables, con una menor desviación respecto al color de las frutillas frescas, especialmente cuando la rehidratación se realizó en frío. La liofilización y posterior rehidratación preservaron mejor el color que el proceso de congelación y descongelación, evitando la pérdida de tonalidades rojas y amarillas que provocan una menor saturación. Además, no se evidenció una pérdida de calidad en este parámetro al aumentar la presión durante la liofilización.

En síntesis, se encontró que la liofilización a 40 °C ofrece los mejores resultados en cuanto a la calidad de las frutillas rehidratadas, al optimizar la capacidad de rehidratación, la conservación del color y la estructura del fruto. La rehidratación en frío también mostró ventajas significativas, favoreciendo una mayor absorción de agua y preservando mejor las características del producto. En ambos casos, no se evidenciaron desventajas notables al utilizar estos parámetros frente a otras condiciones evaluadas, lo que sugiere que representan la combinación más adecuada para maximizar la calidad del producto. Además, la ausencia de diferencias significativas entre las presiones de 0.3 y 0.6 [mBar] permite considerar la posibilidad de operar a presiones más altas sin comprometer la calidad, lo que podría optimizar la eficiencia energética y reducir los costos del proceso. Estos resultados destacan la liofilización como una alternativa prometedora para la conservación de frutillas enteras, con potencial para satisfacer la demanda creciente de alimentos de alta calidad, naturales y con larga vida útil.

11 Recomendaciones.

- Evaluar la inferencia de la frecuencia de los test de presión en los parámetros de calidad de productos liofilizados.
- Evaluar la implementación de métodos para determinar el fin del secado primario que no perturben el sistema.
- Aumentar la población de muestras para conseguir resultados más robustos.
- Evaluar realizar otras pruebas sensoriales para parámetros de calidad (olor, sabor).
- Repetir la investigación añadiendo un grupo de frutillas con perforaciones para evaluar su rehidratabilidad y textura post rehidratación.

12 Referencias.

- Clifford, P. (1934). Report on Moisture in Dried Fruit. Journal of the Association of Official Agricultural Chemists, Volume 17, 215-228.
- dreamstime.com. (s.f.). Recuperado el 2024, de <https://www.dreamstime.com/internal-structure-strawberry-aggregate-fruit-internal-external-structure-strawberry-aggregate-fruit-isolated-white-image147268808>
- Flash Freeze. (2024). Obtenido de <https://flash-freeze.net/flash-freezing/how-flash-freezing-works.html>
- Food and Agriculture Organization. (2024). Obtenido de <https://www.fao.org/statistics>
- Hammami, C., & René, F. (1997). Determination of Freeze-drying Process Variables for Strawberries.
- Hu, J., Sun, X., Xiao, H., & Yang, F. (2024). Effect of guar gum, gelatin, and pectin on moisture changes in freeze-dried restructured strawberry blocks.
- Konica Minolta. (2007). Precise Color Communication. Obtenido de Konica Minolta: https://www.konicaminolta.com/instruments/knowledge/color/pdf/color_communication.pdf
- Mc Leod, C., Aguila, K., & Cárcamo, J. (Marzo de 2020). Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/340031720_ARQUITECTURA_DE_LA_PLANTA_DE_FRUTILLA
- Meda, L., & Ratti, C. (2005). REHYDRATION OF FREEZE-DRIED STRAWBERRIES AT VARYING TEMPERATURES.
- MordorIntelligence. (2021). Obtenido de <https://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/freeze-dried-fruits-and-vegetables-market>
- Muesli2mix. (2024). Obtenido de <https://www.muesli2mix.com/fresa-deshidratada-vs-fresa-liofilizada/>
- Müftügil, N. (1986). Theoretical and experimental freezing times of strawberries. International Journal of Refrigeration, Pages 29-30.
- Muñoz, A., & Vega, J. (2014). Obtenido de https://es.slideshare.net/slideshow/determinacin-de-la-textura/43007050?utm_source#1
- Neumann, K. (1957). United States of America. Patente nº US2994132A.
- Ratti, C. (2001). Hot air and freeze-drying of high-value foods: A review.

Rivulis. (2016). rivulis.com. Recuperado el 2024, de <https://es.rivulis.com/como-cultivar-fresas/>

Tang, X., & Pikal, M. (2004). Design of Freeze-Drying Processes for Pharmaceuticals: Practical Advice. doi:<http://dx.doi.org/10.1023/B:PHAM.0000016234.73023.75>

Terra Food Tech. (2022). Métodos de Conservación de Alimentos. Recuperado el 2024, de <https://www.terrafoodtech.com/metodos-de-conservacion-de-alimentos/>

UCF. (2023). Obtenido de <https://pressbooks.online.ucf.edu/osuniversityphysics2/chapter/phase-changes/>

13 Anexos.

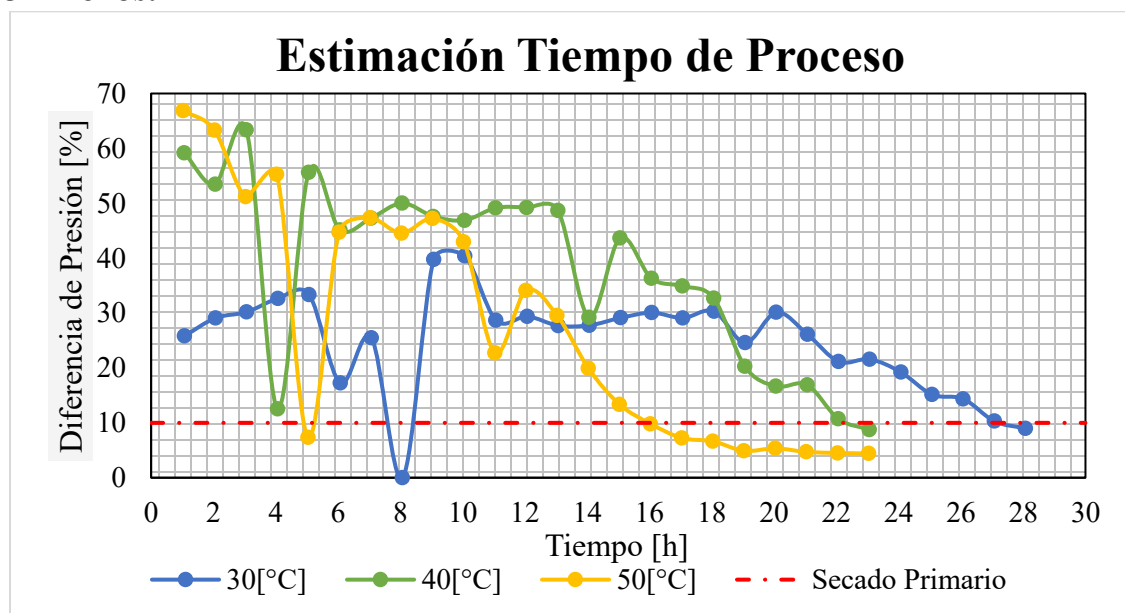


Figura 28: grafica original de estimación de tiempo de proceso.

CASO	Fmax (triplicado)		
30°C, a 20°C	0.69	0.69	0.93
30°C, a 4°C	0.78	0.34	1.27
40°C, a 20°C	0.44	0.74	0.88
40°C, a 4°C	1.18	0.78	0.93
50°C, a 20°C	0.69	0.44	0.49
50°C, a 4°C	0.49	0.39	0.74
Alta P, a 20°C	0.34	2.89	1.08
Alta P, a 4°C	0.69	0.83	0.83

Figura 29: Resumen de resultados de test de textura, todos los casos.

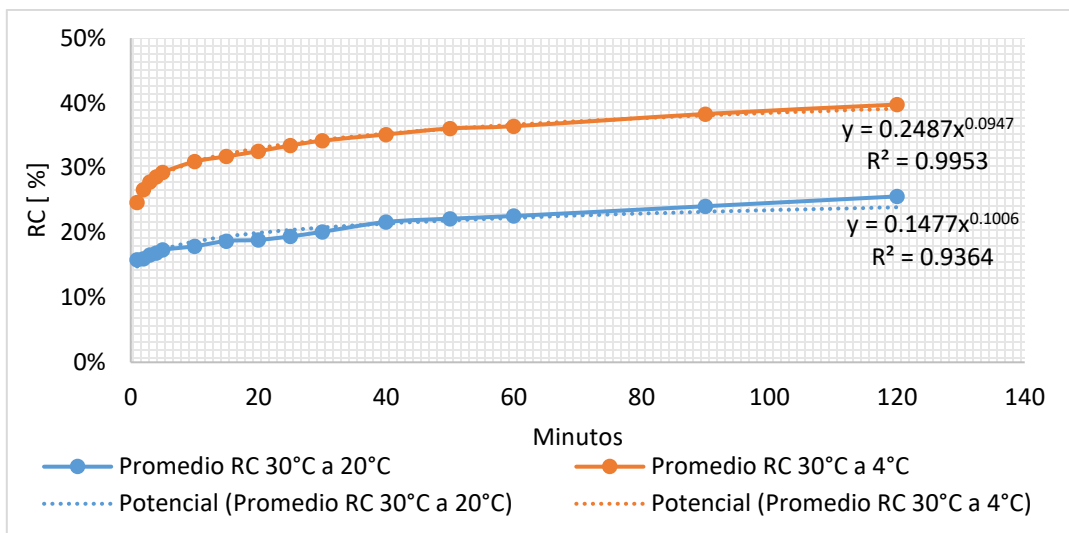


Figura 30: Obtención de Curva Velocidad 30°C

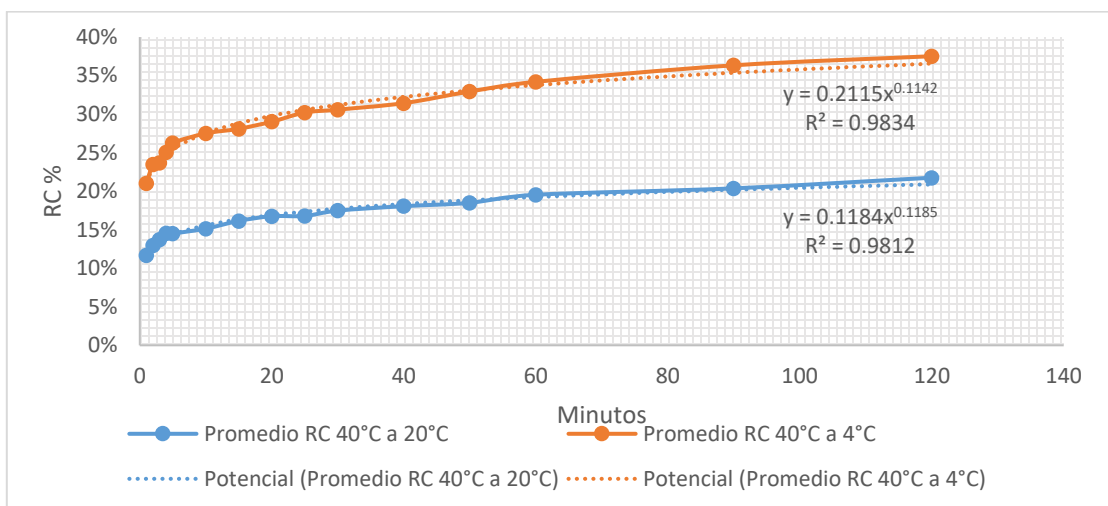


Figura 31: Obtención de Curva Velocidad 40°C

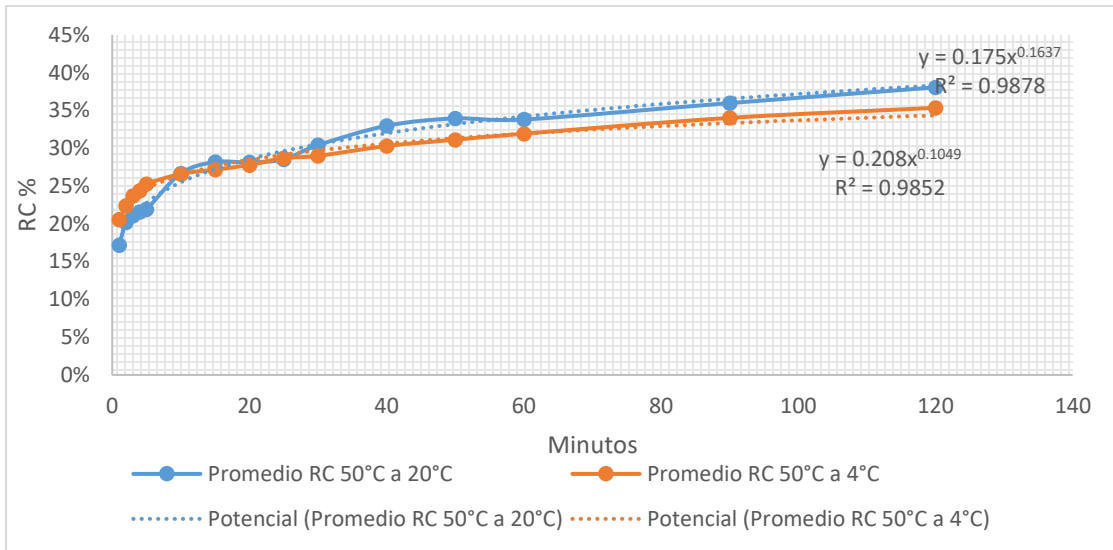


Figura 32: Obtención de Curva Velocidad 50°C

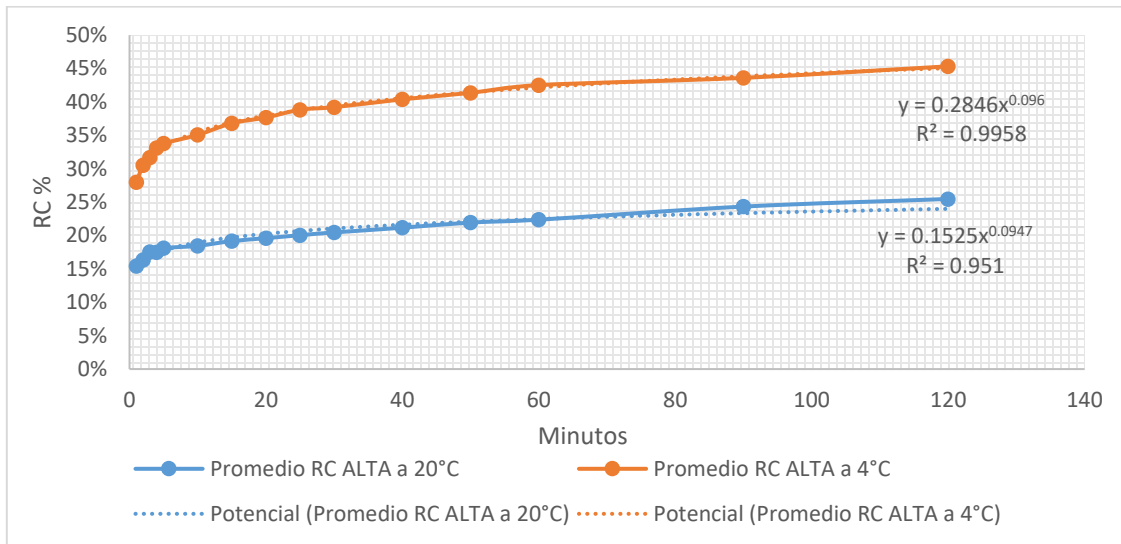


Figura 33: Obtención de Curva Velocidad Alta Presión.

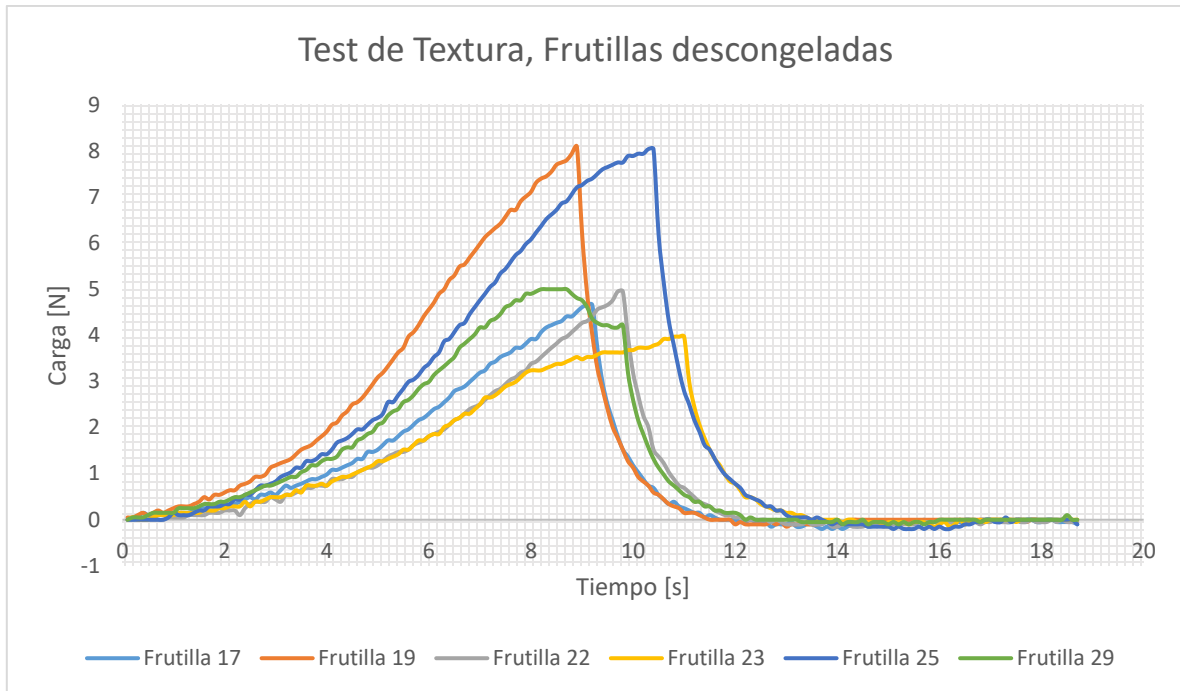


Figura 34: Test Frutillas Descongeladas

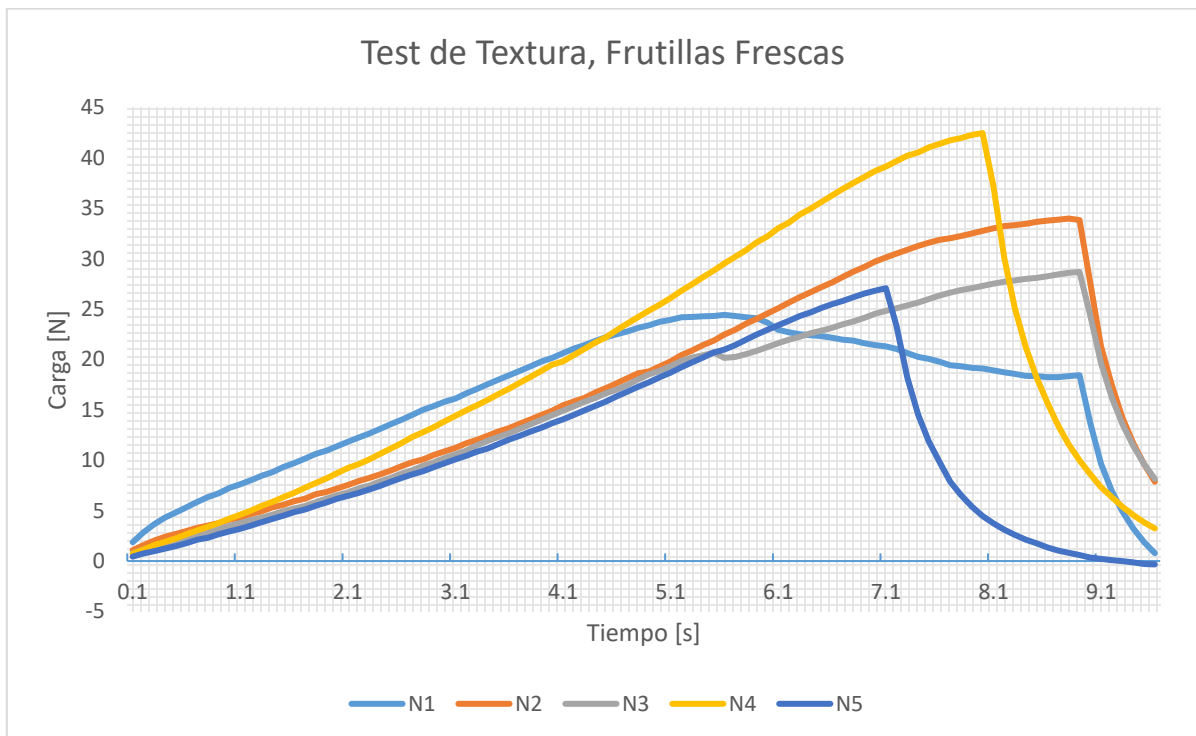


Figura 35: Test Frutillas Frescas