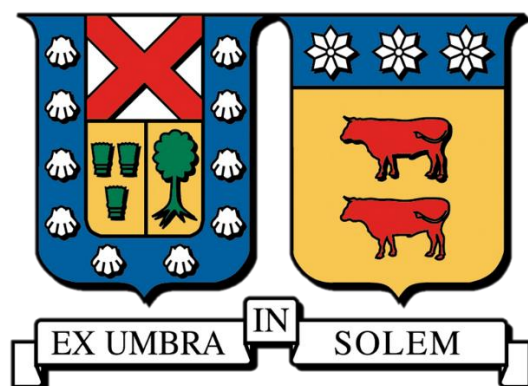


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AMBIENTAL
VALPARAÍSO - CHILE



**“PROCESO DE LIOFILIZACIÓN DE FRUTILLAS: EFECTO DE
CONDICIONES DE PROCESO EN FACTOR DE CALIDAD
(ENCOGIMIENTO)”**

VALENTINA PAZ CASTRO ZULETA

**MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE:
INGENIERA CIVIL QUÍMICA**

Profesor Guía: Dr. Sergio Almonacid Merino

Profesor Correferente: Ing. Marlene Pinto Fernández

Dr. Cristian Ramírez Bustos

DICIEMBRE – 2024

Agradecimientos

Quisiera expresar mi más sincero agradecimiento a todas aquellas personas y entidades que, de una u otra manera, hicieron posible la realización de esta memoria.

En primer lugar, agradezco a mi familia, pilar fundamental en mi vida. A mis abuelos, María Antonieta, Margarita y Omar, quienes me han acompañado con su amor, apoyo incondicional y motivación constante durante toda mi formación profesional. A mis padres, Marcela y Omar, por su apoyo constante, su amor inquebrantable y su confianza en mis capacidades, que me han impulsado a superar cada desafío.

Mi más profundo agradecimiento al Dr. Sergio Almonacid, mi profesor guía, cuya invaluable orientación, paciencia y conocimiento han sido clave durante el desarrollo de esta investigación. A mis profesores correferentes, Dr. Cristian Ramírez y Marlene Pinto, por sus valiosas contribuciones, consejos y experiencia, que fueron esenciales para llevar este proyecto a buen término.

Extiendo mi gratitud al proyecto FONDECYT N°1211980, por facilitar los recursos técnicos y el equipamiento necesario para llevar a cabo los experimentos y análisis realizados en esta memoria.

A mis amigos Javiera, Jennifer, Diego y Benjamín, por su apoyo incondicional, su disposición para ayudarme en tiempos de crisis y por estar siempre ahí, compartiendo risas, momentos de compañía y creando recuerdos que atesoraré por siempre.

En especial, a Jorge, cuya presencia fue una constante fuente de fortaleza y tranquilidad. Su comprensión, cariño y ánimo me acompañaron incluso en los momentos más difíciles.

Finalmente, agradezco a todos aquellos que, directa o indirectamente, contribuyeron al desarrollo de esta investigación y a mi formación académica. A cada uno de ustedes, mi más profundo agradecimiento.

Resumen

En la actualidad, la preservación de alimentos es fundamental para garantizar su disponibilidad y calidad. Dentro de las técnicas más avanzadas de conservación se encuentra la liofilización, un proceso de deshidratación que utiliza la sublimación del agua contenida en los alimentos, preservando sus propiedades organolépticas. Sin embargo, esta técnica implica altos costos operativos, principalmente debido al secado primario, la etapa más lenta y crítica del proceso. Por ello, es necesario estudiar factores que permitan optimizar el proceso, como el encogimiento de los alimentos durante el secado, que afecta directamente la eficiencia y calidad del producto final.

En este trabajo se estudió el encogimiento de frutillas durante la liofilización a diferentes temperaturas (30, 40 y 50 °C), manteniendo una presión constante de 0,3 [mbar]. Se evaluaron parámetros de encogimiento, color y textura, así como la cinética del encogimiento, utilizando un modelo de primer orden. Las frutillas fueron analizadas en sus estados fresco, congelado, liofilizado y rehidratado.

Los resultados evidenciaron que la temperatura es un factor determinante en el encogimiento. A 30 °C, se logró una mayor retención de volumen ($80,27 \pm 1,39\%$), evidenciando un encogimiento más controlado. A 40 y 50 °C, la retención disminuyó a $73,23 \pm 3,85\%$ y $74,29 \pm 4,83\%$, respectivamente, este colapso es generado por la sublimación acelerada.

El análisis cinético mostró que el encogimiento efectivamente sigue el comportamiento de una reacción de primer orden, con constantes de velocidad que aumentan con la temperatura. La ecuación de Arrhenius permitió calcular una energía de activación de 12,415 [KJ/mol]. En términos de color, los valores de L^* , a^* y b^* se preservaron mejor a 40 °C, mientras que a temperaturas más altas se observó una degradación de los pigmentos naturales. En cuanto a la textura, las frutillas frescas presentaron la mayor fuerza máxima ($31,32 \pm 7,14$ [N]), mientras que las muestras liofilizadas-rehidratadas mostraron menores valores que las descongeladas, siendo las procesadas a 40 °C ($0,98 \pm 0,58$ N) las mejor conservadas.

En conclusión, se determinó que una temperatura de 30 °C permite minimizar el encogimiento, aunque no presenta diferencias estadísticamente significativas e implica tiempos de proceso más prolongados.

Índice

1. Introducción	10
1.1 Contexto general	10
1.2 Objetivos	11
1.2.1 Objetivo General.....	11
1.2.2 Objetivos Específicos	11
2. Antecedentes Teóricos.....	12
2.1 Materia Prima Frutillas	12
2.1.1 Descripción de la especie	12
2.2 Mercado de las frutillas.....	13
2.2.1 Producción mundial.....	13
2.2.2 Producción nacional	14
2.3 Liofilización.....	16
2.3.1 Descripción del proceso.....	16
2.3.2 Etapas del proceso	16
2.3.2.1 Congelación.....	16
2.3.2.2 Secado Primario.....	17
2.3.2.3 Secado Secundario.....	17
2.3.3 Ventajas y desventajas	18
2.3.3.1 Ventajas de la liofilización.....	18
2.3.3.2 Desventajas de la liofilización.....	19
2.3.4 Liofilización en la industria.....	20
2.3.5 Parámetros relacionados con la liofilización	20
2.3.5.1 Porosidad del producto liofilizado.....	20
2.3.5.2 Temperatura eutéctica.....	21
2.3.5.3 Temperatura de colapso	21
2.3.5.4 Temperatura de transición vítrea	21
2.3.5.5 Rehidratación del producto liofilizado	22
2.4 Otras tecnologías de deshidratación de alimentos	23
2.4.1 Deshidratación por aire caliente	23
2.4.2 Secado por pulverización (spray drying).....	24
2.4.3 Deshidratación por microondas	24

2.4.4	Secado por infrarrojos	25
2.4.5	Secado en lecho fluidizado	25
2.4.6	Secado en tambor rotatorio	26
3.	Materiales y métodos	27
3.1	Metodología general	27
3.2	Materia prima	28
3.3	Equipos	29
3.3.1	Liofilizador	29
3.3.2	Medidor de encogimiento	31
3.3.3	Horno	32
3.3.4	Balanza	32
3.3.5	Medidor de Color	33
3.3.6	Medidor de textura	34
3.4	Metodología	35
3.4.1	Preparación de materia prima	35
3.4.2	Congelación	35
3.4.2.1	Determinación de tiempo de congelación	35
3.4.3	Proceso de Liofilización	35
3.4.3.1	Determinación fin del secado primario	36
3.4.4	Medición de humedad	37
3.4.5	Medición de encogimiento	37
3.4.6	Rehidratación	40
3.4.7	Medición de color	40
3.4.8	Medición de textura	42
3.4.9	Análisis Estadístico	44
4.	Resultados y discusión	45
4.1	Determinación del tiempo de congelación	45
4.2	Liofilizado	46
4.2.1	Determinación del tiempo del secado primario	46
4.2.2	Determinación de humedad	47
4.2.3	Medición de factor de calidad encogimiento	47
4.2.4	Cinética de encogimiento	52

4.3	Medición de factor de calidad color	55
4.3.1	Luminosidad(L*):.....	55
4.3.2	Parámetro a* (rojo-verde):.....	55
4.3.3	Parámetro b* (amarillo-azul):.....	56
4.3.4	Hue° (tono):	56
4.3.5	Croma (saturación del color):	56
4.3.6	□E (diferencia de color):.....	56
4.4	Medición de factor de calidad textura.....	57
5.	Conclusión.....	59
6.	Recomendaciones.....	60
7.	Referencias	61
8.	Anexos.....	64

Índice de figuras

Figura 1. Estructura de la frutilla (Hammami & René, 1997).....	12
Figura 2. Producción mundial de frutillas 2012-2022.....	13
Figura 3. Producción de frutillas por región.....	14
Figura 4. Volumen de exportación de frutillas.....	15
Figura 5. Diagrama de estados y predicción de Tg de frutillas (Sá & Sereno, 1994).	22
Figura 6. Equipo de deshidratación por aire caliente.	23
Figura 7. Equipo de secado por pulverización.	24
Figura 8. Equipo de deshidratación por microondas.	24
Figura 9. Equipo de secado por infrarrojos.	25
Figura 10. Equipo de secado en lecho fluidizado.	25
Figura 11. Equipo de secado en tambor rotatorio.....	26
Figura 12. Diagrama de flujo del proceso.	27
Figura 13. Liofilizador Alpha 2-4 LSCbasic.	29
Figura 14. Interfaz equipo de liofilizado.	30
Figura 15. Diseño de arreglo cámara.....	31
Figura 16. Cámara Blackfly S USB3.....	31
Figura 17. Horno Memmert modelo UM200.	32
Figura 18. Balanza analítica.	32
Figura 19. Colorímetro Konica Minolta modelo CR-400.	33
Figura 20. TexturePro CT V1.2 Build 9.	34
Figura 21. Curva de fuerza en función de la deformación (Galletto et al., 2010).	42
Figura 22. Equipo y sonda utilizada en prueba de compresión.	43
Figura 23. Tiempo de congelación.	45
Figura 24. Secado primario liofilización 40 °C.....	46
Figura 25. Factor de encogimiento de liofilización a 50 °C.....	47
Figura 26. Fotografías liofilización 50 °C.....	48
Figura 27. Factor de encogimiento de liofilización a 40 °C.....	49
Figura 28. Fotografías liofilización 40 °C.....	49
Figura 29. Factor de encogimiento de liofilización a 30 °C.....	50
Figura 30. Fotografías liofilización 30 °C.....	50
Figura 31. Factor de encogimiento.....	51
Figura 32. Cinética encogimiento liofilizado 50 °C.....	52
Figura 33. Cinética encogimiento liofilizado 40 °C.....	52
Figura 34. Cinética encogimiento liofilizado 30 °C.....	53
Figura 35. Cinética encogimiento.....	54
Figura 36. Soporte frutillas.....	60
Figura 37. Frutilla liofilizada.....	60
Figura 38. Interior frutilla liofilizada.....	60
Figura 39. Secado primario liofilización 50 °C.....	64
Figura 40. Secado primario liofilización 30 °C.....	64
Figura 41. Test de compresión frutillas rehidratadas liofilizadas 50 °C.....	65
Figura 42. Test de compresión frutillas rehidratadas liofilizadas 40 °C.....	65

Figura 43. Test de compresión frutillas rehidratadas liofilizadas 30 °C.....	66
Figura 44. Test de compresión frutillas frescas.	66
Figura 45. Test de compresión frutillas descongeladas.....	67

Índice de tablas

Tabla 1. Cosecha de frutillas en Chile.	15
Tabla 2. Tabla nutricional de las frutillas (Frutillas Hortifrut, 2024).	28
Tabla 3. Parámetros de operación Texturómetro.	43
Tabla 4. Tiempos de secado primario y humedad frutillas liofilizadas.	46
Tabla 5. Retención del volumen frutillas liofilizadas.	51
Tabla 6. Parámetros cinéticos del encogimiento.....	54
Tabla 7. Parámetros de color las frutillas.	55
Tabla 8. Fuerza máxima frutillas liofilizadas.	57
Tabla 9. Fuerza máxima frutillas frescas y descongeladas.	57

1. Introducción

1.1 Contexto general

En la actualidad, la conservación de alimentos es esencial para reducir el desperdicio global, usando de formas más eficientes los recursos naturales, además de poder asegurar disponibilidad durante todo el año y cumplir con la demanda generada por el aumento de la población. Por lo que, la eliminación del agua de los productos alimenticios es indispensable para aumentar su vida útil, lo cual se puede lograr mediante diferentes técnicas de secado, como lo es la liofilización.

La liofilización, destaca por su capacidad para preservar forma, apariencia, sabor, textura y actividad biológica. Esta es una técnica de conservación de productos alimenticios que reduce el contenido de agua, obteniendo productos deshidratados de alta calidad y conservando la mayoría de las propiedades iniciales, como la apariencia y actividad biológica. Este proceso consiste en tres etapas principales: congelación, sublimación (secado primario) y desorción (secado secundario). Durante la sublimación, el producto congelado se coloca en una cámara de vacío, donde la presión se reduce y se aplica calor, lo que provoca que el hielo pase directamente de estado sólido a vapor. Luego, en la desorción, se elimina el agua residual en los intersticios del alimento, resultando en un producto seco con una vida útil prolongada.

Las frutillas son un alimento rico en antocianinas (antioxidantes) y vitaminas (A, B, C y E), las cuales son inestables frente a altas temperaturas. Por esta razón, la liofilización es el método más adecuado para su deshidratación, ya que para realizar este proceso no se necesitan altas temperaturas, en comparación a otras técnicas de secado. Por otro lado, uno de los efectos negativos es el encogimiento, el cual varía según las condiciones de proceso (temperatura y presión), ya que estas condiciones pueden generar el colapso del alimento. Bajo este contexto se busca las condiciones óptimas de operación para la liofilización de frutillas que genere un menor impacto en la estructura a lo largo del proceso.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

- Estudiar la reducción de tamaño (encogimiento) de frutillas durante el proceso de liofilización (secado primario) a distintas condiciones de operación (Temperatura variable, Presión constante), a fin de minimizar el factor de encogimiento.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Determinar los tiempos de congelación.
- Instalar y operar sistema de monitoreo (software de interpretación de imagen) de reducción de volumen.
- Hacer curvas de reducción de volumen de la muestra a presión de 0,3 [mbar] y temperaturas de 30, 40 y 50 °C, con sus respectivas desviaciones.
- Evaluar factores de calidad Textura y Color en condiciones iniciales y finales de la muestra.
- Elección de mejor temperatura de proceso de acuerdo con optimización gráfica y ajustes requeridos.

2. Antecedentes Teóricos

2.1 Materia Prima Frutillas

2.1.1 Descripción de la especie

Las frutillas, conocidas científicamente como *Fragaria* pertenecientes a la familia Rosaceae, de las cuales hay aproximadamente 20 especies aceptadas. Estas se cosechan de plantas perennes herbáceas, las cuales producen flores hermafroditas, con pétalos blancos o ligeramente rosados, que son principalmente polinizadas por insectos. Botánicamente, las frutillas presentan hojas compuestas, generalmente trifoliadas, con márgenes dentados y dispuestas en una roseta basal (Figura 1). El fruto de la frutilla es una infrutescencia conocida como eterio (receptáculo carnoso y comestible), con numerosos aquenios distribuidos en su superficie que contienen las semillas. Este receptáculo normalmente es de color rojo brillante y textura jugosa.

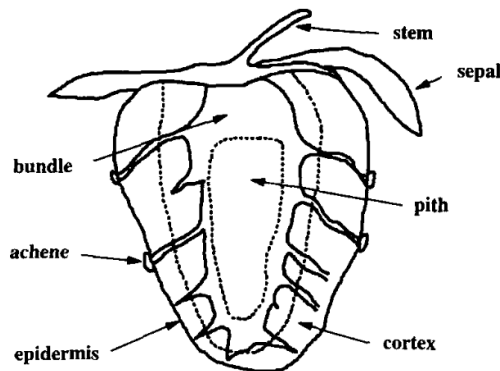


Figura 1. Estructura de la frutilla (Hammami & René, 1997).

Nutricionalmente, las frutillas son ricas en varios componentes esenciales. Son una excelente fuente de vitamina C, que desempeña un papel crucial en el fortalecimiento del sistema inmunológico, la salud de la piel y la absorción de hierro. Además, contienen vitamina A, importante para la visión y la salud de la piel, y vitamina E, que actúa como antioxidante protegiendo las células del daño oxidativo. Las frutillas también contienen vitaminas del complejo B, que son fundamentales para el metabolismo energético y la función neurológica. En cuanto a los minerales, las frutillas aportan potasio, magnesio y calcio, esenciales para la función muscular, la salud ósea y la regulación del equilibrio de líquidos en el cuerpo. Además, son ricas en antioxidantes, como los flavonoides y los polifenoles, que ayudan a combatir el estrés oxidativo y pueden reducir el riesgo de enfermedades crónicas. Finalmente,

son una buena fuente de fibra dietética, que favorece la salud digestiva al promover la regularidad intestinal y contribuir a la sensación de saciedad (Basu, Nguyen, M. Betts, & J. Lyons, 2013).

2.2 Mercado de las frutillas

2.2.1 Producción mundial

Debido a su característico sabor y agradable apariencia, las frutillas son una de las frutas favoritas de la mayoría de las personas en el mundo. Lo que se puede observar en el constante aumento de su producción, teniendo un aumento del 36,9% en 10 años a nivel mundial (Figura 2) (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2022).

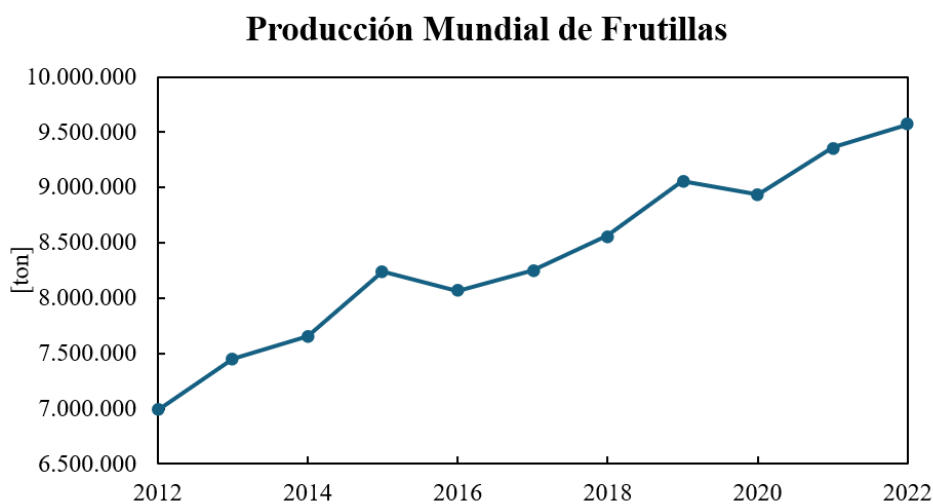


Figura 2. Producción mundial de frutillas 2012-2022.

El cultivo y producción mundial de frutillas se encuentra liderada por Asia, América y Europa, siendo el principal país productor es China, produciendo 3,4 millones de toneladas en el año 2022, seguido de Estados Unidos con 1,3 millones de toneladas en el mismo año, siendo un 34% y 13%, respectivamente, de la cosecha mundial (Figura 3). Otros países relevantes son Turquía, Egipto, México, España, Federación de Rusia, Polonia, República de Corea y Brasil (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2022).

Producción de Frutillas por Región

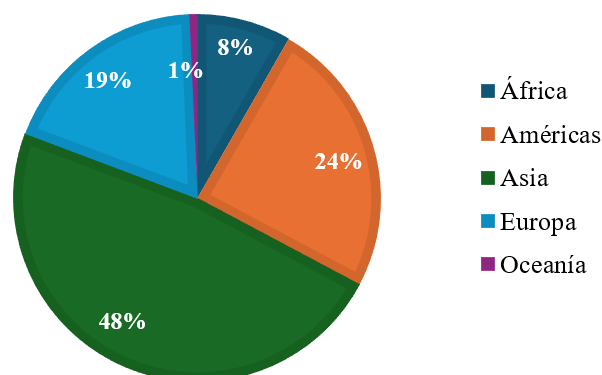


Figura 3. Producción de frutillas por región.

Es importante destacar que la exportación de esta fruta se realiza de forma fresca, congelada y en conserva. Siendo las más relevantes la frutilla fresca y la congelada, por lo que, la liofilización llegaría para innovar y facilitar el método de conservación y transporte de este alimento, compitiendo directamente con la congelación.

2.2.2 Producción nacional

Chile dispone de condiciones ideales de suelo y clima para el cultivo de berries, lo que le da una ventaja competitiva en el mercado internacional de frutillas congeladas. Esta situación le permitiría no solo mantener su posicionamiento a nivel mundial, sino también expandir su presencia en este sector, dado que la demanda global de frutillas sigue en crecimiento, motivada tanto por sus características organolépticas como por sus beneficios para la salud (Pefaur Lepe, 2014).

En el año 2022 la producción anual de frutilla a nivel nacional alcanzó las 95 mil toneladas, siendo un 58% de estas congeladas (Chile alimentos, 2022). Donde el cultivo y cosecha de las frutillas en Chile se concentra en la región Metropolitana y El Maule, con 1498 hectáreas plantadas (South Pacific Logistics, 2024).

Las frutillas chilenas se cosechan de mediados de diciembre hasta mayo (Tabla 1), dependiendo de la variedad. Pueden ser cultivadas en una amplia variedad de climas, pero los mejores rendimientos en cuanto a calidad son en zonas templadas (South Pacific Logistics, 2024).

Tabla 1. Cosecha de frutillas en Chile.

Variedades de frutillas chilenas	ENE	FER	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Camarosa	X	X	X	X	X							X
Chandler	X	X	X	X	X							X
Benicia	X	X	X	X	X							X
Albion	X	X	X	X								X
Monterrey	X	X	X	X								X

Con la creciente demanda a nivel mundial, las exportaciones de frutillas a nivel nacional han tenido un incremento de 42% aproximadamente en los últimos años (Figura 4), siendo los principales destinos Estados Unidos y Asia (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2022).

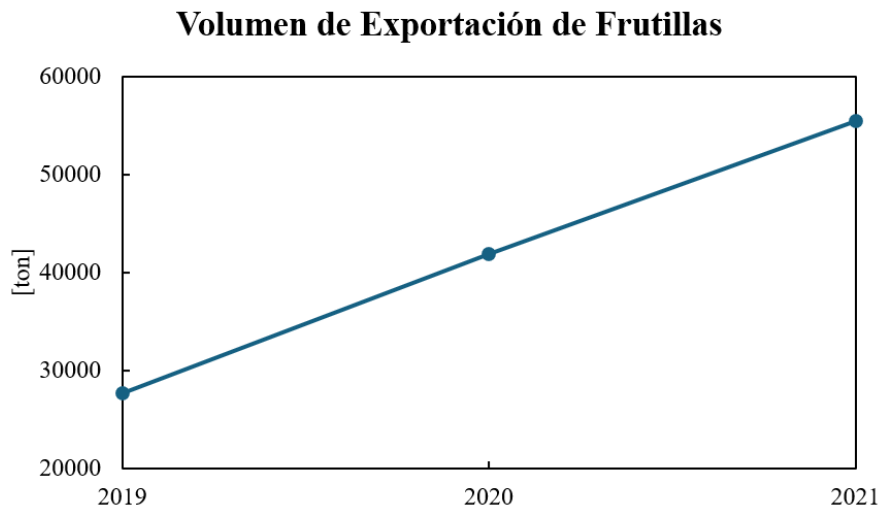


Figura 4. Volumen de exportación de frutillas.

2.3 Liofilización

La liofilización, también conocida como deshidratación por congelación, es un proceso de conservación que elimina el agua de los alimentos a través de la sublimación. Este método se utiliza ampliamente en la industria alimentaria y farmacéutica debido a su capacidad para preservar las propiedades organolépticas, nutricionales y estructurales de los productos, lo que lo hace ideal para alimentos como las frutillas. Actualmente este método es altamente utilizado para obtener cultivos de bacterias lácteas y café instantáneo (Hammami & René, 1997). La liofilización permite que los productos mantengan su forma, color, sabor y nutrientes durante largos periodos de almacenamiento sin la necesidad de refrigeración. Sin embargo, es un método que tiene un alto costo inicial y tiempo de procesamiento (1-3 días), lo cual limita su aplicación a escala industrial (Shishegarha, Makhlouf, & Ratti, 2002).

2.3.1 Descripción del proceso

El proceso de liofilización consiste en la eliminación del agua contenida en un producto previamente congelado mediante la aplicación de vacío. Bajo estas condiciones, el hielo presente en el producto se sublima, es decir, pasa directamente de estado sólido a vapor sin pasar por el estado líquido. Este proceso se lleva a cabo en etapas controladas de temperatura y presión, lo que asegura que el producto final conserve sus características originales y tenga una mayor estabilidad frente a la oxidación y el crecimiento microbiano.

2.3.2 Etapas del proceso

2.3.2.1 Congelación

La congelación es la primera etapa del proceso de liofilización y es crucial para preservar la estructura del producto. En esta etapa, el producto se enfría a temperaturas bajo cero, generalmente entre $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$, para solidificar toda el agua presente (Hammami & René, 1997). Es importante realizar un congelamiento rápido para evitar la formación de cristales de hielo grandes, que podrían dañar las estructuras celulares del alimento, afectando negativamente su textura. Esta fase es crucial para mantener la estructura del material, ya que los cristales de hielo forman una red porosa que facilitará la sublimación en el secado posterior. La velocidad de congelación afecta el tamaño de los cristales y, en consecuencia, la calidad del producto final, ya que cristales más grandes pueden dañar la estructura celular

del alimento. Siendo lo recomendable congelar los alimentos en una velocidad de $1[^\circ\text{C}/\text{min}]$, para formar cristales del menor tamaño posible (Congelación y descongelación de células, 2024).

2.3.2.2 Secado Primario

El secado primario, también conocido como sublimación, es la etapa con mayor duración del proceso, en la que se elimina la mayor parte del agua contenida en el producto. Durante esta fase, se aplica un vacío sobre el material congelado, reduciendo la presión y aumentando la temperatura hasta un punto en el que el hielo pasa directamente de sólido a vapor sin derretirse. Aproximadamente entre el 90-95% del agua se elimina en esta etapa (Hu et al., 2024). Es crucial controlar cuidadosamente la temperatura para evitar el derretimiento del hielo, ya que podría afectar la calidad del producto final. Esto se realiza a bajas temperaturas y presiones para evitar el colapso de la estructura del alimento. El proceso requiere un control preciso de la temperatura de las placas de calentamiento y de la presión, ya que estas variables impactan directamente en la velocidad de secado y en la calidad del producto final.

2.3.2.3 Secado Secundario

El secado secundario es la fase final del proceso de liofilización. En esta etapa, se eliminan las moléculas de agua residuales o ligada, que no fueron sublimadas durante el secado primario, mediante desorción de las moléculas de agua adsorbidas en las superficies internas del producto (Bacaoanu & Sabina, 2005). Esto se logra aplicando temperaturas un poco más altas y manteniendo el vacío, lo que permite reducir el contenido de humedad a niveles mínimos (generalmente entre el 1% y 3%). Este secado adicional mejora la estabilidad del producto final, prolongando su vida útil y permitiendo que conserve sus características originales durante largos periodos, garantizando la estabilidad del producto con el posterior almacenamiento (Tang & Pikal, 2004).

2.3.3 Ventajas y desventajas

2.3.3.1 Ventajas de la liofilización

La liofilización es un proceso ampliamente valorado en la industria alimentaria y farmacéutica debido a sus numerosos beneficios. Este método permite deshidratar alimentos y otros productos sin comprometer sus características esenciales, lo que lo convierte en una opción preferida para la conservación de productos de alta calidad. A continuación, se presentan las principales ventajas de la liofilización, las cuales explican su creciente popularidad y aplicación en diversas industrias.

1. **Preservación de nutrientes:** El proceso de liofilización mantiene casi intactos los nutrientes del alimento, ya que se realiza a bajas temperaturas, lo que minimiza la degradación de vitaminas, minerales y otros compuestos bioactivos.
2. **Conservación del sabor, color y forma:** Debido a que no se pasa por una fase líquida, el producto final conserva su forma y color original, así como su sabor, lo que es una gran ventaja para productos sensibles como las frutillas.
3. **Larga vida útil:** Los productos liofilizados tienen un contenido de humedad extremadamente bajo (alrededor del 1-4%), lo que previene el crecimiento de microorganismos y la oxidación, extendiendo su vida útil sin la necesidad de refrigeración.
4. **Rehidratación rápida:** Los alimentos liofilizados son altamente porosos, lo que permite que se rehidraten rápidamente, recuperando gran parte de sus propiedades originales.
5. **Reducción de peso y volumen:** La eliminación del agua reduce significativamente el peso del producto, facilitando su transporte y almacenamiento, algo crucial para la industria alimentaria.
6. **Versatilidad en aplicaciones:** La liofilización es aplicable a una amplia variedad de productos, desde frutas y vegetales hasta productos farmacéuticos y biológicos, lo que la convierte en un método muy versátil.

2.3.3.2 Desventajas de la liofilización

A pesar de sus numerosas ventajas, la liofilización presenta ciertas limitaciones que son importantes de considerar. Estas desventajas pueden influir en la elección de este método frente a otras alternativas de deshidratación, especialmente en términos de costo y eficiencia. En la siguiente lista, se detallan las principales desventajas asociadas a la liofilización y sus implicaciones para la industria.

1. **Alto costo:** El proceso de liofilización es costoso debido a la tecnología avanzada y el equipamiento necesario, así como al consumo de energía prolongado que requiere para mantener las bajas temperaturas y el vacío.
2. **Proceso lento:** Comparado con otros métodos de deshidratación, la liofilización es considerablemente más lenta, ya que puede tomar varias horas o incluso días completar el proceso.
3. **Sensibilidad a la humedad post-proceso:** Los productos liofilizados son extremadamente higroscópicos, lo que significa que pueden absorber humedad fácilmente después del proceso, lo que los hace vulnerables si no se almacenan en condiciones adecuadas.
4. **Requiere envasado especial:** Debido a su sensibilidad a la humedad, los productos liofilizados requieren envases herméticos y a prueba de humedad para mantener su calidad durante el almacenamiento.
5. **Pérdida parcial de ciertos compuestos:** Aunque la liofilización es muy eficiente en la preservación de nutrientes, algunos compuestos volátiles, como ciertos aromas y sabores, pueden perderse o disminuir en intensidad.
6. **Limitaciones en productos grasos:** Los alimentos con alto contenido de grasa no se liofilizan bien, ya que las grasas no subliman, lo que puede afectar la textura y el sabor del producto final.

2.3.4 Liofilización en la industria

La liofilización es un proceso fundamental en la industria alimentaria, farmacéutica y biotecnológica, utilizado para preservar productos sensibles al calor y la humedad. Consiste en la eliminación del agua mediante sublimación, un cambio directo del estado sólido al gaseoso bajo condiciones de presión reducida y baja temperatura. Esto permite conservar la estructura, sabor, color y valores nutricionales de los productos, prolongando significativamente su vida útil (Ratti, 2001).

En la industria alimentaria, la liofilización se aplica a frutas, vegetales, productos cárnicos, café instantáneo, hierbas aromáticas y alimentos preparados para exploraciones espaciales. En la industria farmacéutica, se utiliza para estabilizar vacunas, anticuerpos monoclonales, proteínas, enzimas y otros medicamentos sensibles (Krokida, Maroulis, & Saravacos, 2000). En biotecnología, es clave para preservar cultivos celulares, tejidos y compuestos biológicos de alto valor económico.

2.3.5 Parámetros relacionados con la liofilización

La eficacia y calidad del proceso de liofilización dependen de una serie de parámetros fisicoquímicos que deben controlarse rigurosamente para obtener un producto estable y funcional.

2.3.5.1 Porosidad del producto liofilizado

La porosidad se refiere a la proporción de vacíos presentes en la estructura del material liofilizado en relación con su volumen total. Una porosidad adecuada facilita la rehidratación, mejora la estabilidad estructural y conserva la textura del producto final. Su formación depende de factores como la velocidad de congelación, el tamaño de los cristales de hielo y el perfil de secado aplicado (Liapis & Bruttini, 2015).

Estudios han demostrado que una congelación rápida genera cristales de hielo pequeños y una red porosa más homogénea, mientras que una congelación lenta produce cristales grandes y una estructura heterogénea. Además, técnicas como la microscopía de barrido electrónico (SEM) permiten analizar la microestructura del material, evaluando su grado de porosidad y su relación con la capacidad de rehidratación (Ratti, 2001).

2.3.5.2 Temperatura eutéctica

La temperatura eutéctica es el punto en el que el soluto y el agua se congelan simultáneamente, formando una mezcla sólida-líquida. En la liofilización, es crucial mantener el producto por debajo de esta temperatura durante el proceso de sublimación para evitar derretimientos parciales y el colapso de la estructura del material. El conocimiento preciso de esta temperatura permite establecer las condiciones adecuadas de procesamiento (Franks, 2008).

Además, la identificación de la temperatura eutéctica específica para cada material permite diseñar procesos personalizados, optimizando la eficiencia y minimizando pérdidas de calidad. Investigaciones recientes en termodinámica de soluciones han permitido desarrollar técnicas más precisas para determinar este punto crítico (Tang & Pikal, 2004).

2.3.5.3 Temperatura de colapso

La temperatura de colapso representa el límite máximo en el que el material permanece estructuralmente estable durante la liofilización. Superar esta temperatura provoca una pérdida de la matriz porosa, generando productos deformados y con menor capacidad de rehidratación. El control estricto de esta variable permite garantizar productos con características físico-mecánicas óptimas (Tang & Pikal, 2004).

2.3.5.4 Temperatura de transición vítrea

La temperatura de transición vítrea (T_g) es el punto en el que un material pasa de un estado vítreo rígido a uno gomoso. Durante la liofilización, es fundamental que el producto permanezca por debajo de esta temperatura para conservar su estructura y prevenir la fusión parcial. Esta propiedad depende de la composición del material y de la presencia de agentes crioprotectores (Harnkarnsujarit & Charoenrein, 2011).

El ajuste preciso de esta temperatura permite obtener productos con propiedades mecánicas y sensoriales superiores. Investigaciones en polímeros y matrices alimentarias han permitido desarrollar modelos predictivos para definir la temperatura de transición vítrea en distintas formulaciones (Franks, 2008).

3. La temperatura de transición vítrea se encuentra relacionada con la humedad de la muestra, ya que la presencia de agua en el material actúa como un agente plastificante, disminuyendo

la temperatura de transición vítrea. A medida que aumenta el contenido de humedad, las moléculas de agua reducen la rigidez de la matriz y facilitan la movilidad de las cadenas moleculares, provocando una caída progresiva en la temperatura de transición vítrea (Figura 5) (Sá & Sereno, 1994).

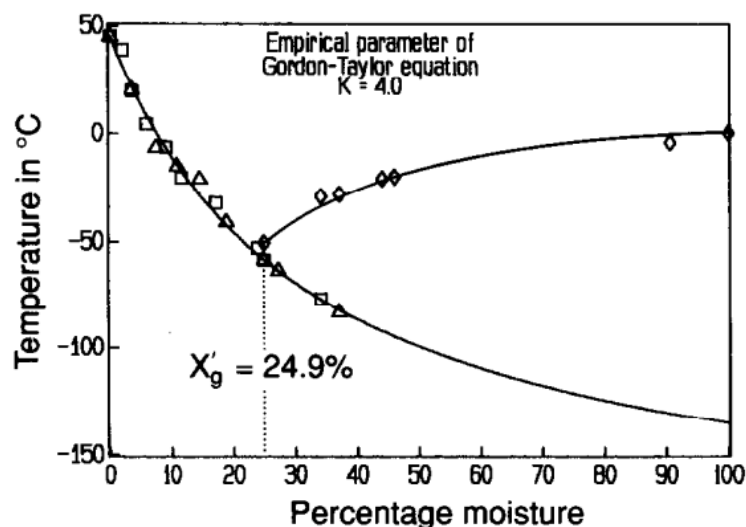


Figura 5. Diagrama de estados y predicción de Tg de frutillas (Sá & Sereno, 1994).

2.3.5.5 Rehidratación del producto liofilizado

La rehidratación es el proceso mediante el cual el producto deshidratado (liofilizado) recupera su contenido de agua y sus propiedades originales. La capacidad de rehidratación depende directamente de la porosidad, la estructura cristalina y el método de secado utilizado. Un producto bien liofilizado muestra una rehidratación rápida y completa, manteniendo su textura, sabor y valores nutricionales. El análisis de la cinética de rehidratación es clave para evaluar la eficacia del proceso (Araki, Yamaguchi, & Tanaka, 2012).

2.4 Otras tecnologías de deshidratación de alimentos

Además de la liofilización, existen múltiples tecnologías de deshidratación aplicadas en la industria de alimentos, cada una con características y aplicaciones específicas. Estas técnicas permiten conservar alimentos, prolongando su vida útil, reduciendo su peso y volumen, y preservando sus propiedades. A continuación, se describen algunas de las tecnologías de deshidratación de alimentos más utilizadas.

2.4.1 Deshidratación por aire caliente

La deshidratación por aire caliente (Figura 6) es una de las técnicas más tradicionales y se basa en la aplicación de corrientes de aire caliente (50 °C a 90 °C) sobre el alimento. Este método evapora el agua de la superficie del producto, siendo común para frutas, vegetales y carnes. Es una tecnología de bajo costo y de rápida implementación, aunque puede causar cambios en el color, sabor y textura, además de pérdida de nutrientes sensibles al calor (Estrada, Restrepo, Saumett, & Pérez, 2018).



Figura 6. Equipo de deshidratación por aire caliente.

2.4.2 Secado por pulverización (spray drying)

El secado por pulverización (Figura 7) es una técnica de deshidratación especialmente diseñada para alimentos líquidos o en forma de puré. El proceso consiste en atomizar el alimento en pequeñas gotas en una corriente de aire caliente, lo que permite su transformación rápida en polvo. Es ampliamente utilizado en productos como leche, café, jugos y sabores. Sin embargo, solo es aplicable a productos líquidos y puede conllevar la pérdida de compuestos volátiles y sensibles al calor (Buchi, 2024).



Figura 7. Equipo de secado por pulverización.

2.4.3 Deshidratación por microondas

La deshidratación por microondas (Figura 8) emplea ondas electromagnéticas para calentar y evaporar el agua en el alimento. La ventaja de este método es su rapidez, ya que permite un secado más rápido que el aire caliente y con menor riesgo de sobrecalentamiento en la superficie del producto. Es común en frutas y vegetales, aunque su efectividad puede verse afectada por la distribución no homogénea de las microondas, lo que representa una limitación en la aplicación industrial (Machinery Arrow, 2021).



Figura 8. Equipo de deshidratación por microondas.

2.4.4 Secado por infrarrojos

El secado por infrarrojos (Figura 9) utiliza radiación infrarroja para transferir calor al alimento, favoreciendo la evaporación del agua de forma directa. Este método es rápido y eficiente, especialmente adecuado para productos finos o de superficie expuesta, como frutas en rodajas y alimentos en polvo. Sin embargo, su capacidad de penetración térmica es limitada, lo que puede ser un obstáculo para el secado de productos más gruesos o densos (FoodTechProcess, 2024).



Figura 9. Equipo de secado por infrarrojos.

2.4.5 Secado en lecho fluidizado

En el secado en lecho fluidizado (Figura 10), el alimento se coloca en un lecho de partículas finas que se mantienen en movimiento mediante una corriente de aire caliente. Este movimiento constante favorece el secado rápido y uniforme de productos como granos, vegetales y pequeñas piezas de frutas. Este método es rápido y asegura una buena uniformidad, aunque su implementación es compleja y depende de la naturaleza del alimento (Vaisala, 2024).



Figura 10. Equipo de secado en lecho fluidizado.

2.4.6 Secado en tambor rotatorio

El secado en tambor rotatorio (Figura 11) se emplea principalmente para productos líquidos o en puré. Consiste en aplicar una capa delgada del producto sobre un tambor caliente que rota, permitiendo que el agua se evapore rápidamente. Este método es común en la producción de purés de frutas y vegetales deshidratados. Sin embargo, el calor directo puede afectar las características organolépticas y nutricionales de los alimentos (Allgaier, 2024).



Figura 11. Equipo de secado en tambor rotatorio.

3. Materiales y métodos

3.1 Metodología general

La presente investigación se centra en la medición y comparación del encogimiento de las frutillas durante el secado primario del proceso de liofilización a diferentes temperaturas. Se inició el proceso con la caracterización de las frutillas para garantizar que los datos obtenidos sean comparables y representativos. Luego, estas fueron sometidas a congelación previa para garantizar la formación de una estructura adecuada para el proceso de sublimación durante el secado primario. Posteriormente, se realizaron secados primarios bajo una presión constante de 0,3 [mbar] a tres temperaturas distintas (30, 40 y 50 °C). Durante este paso, se registraron los tiempos necesarios para completar el secado primario y se midió el encogimiento de las frutillas durante proceso. Finalizado el liofilizado, se analizó la calidad del producto rehidratado mediante la medición de textura y color.

En la Figura 12 se presenta el diagrama de flujo correspondiente al procedimiento seguido en esta investigación.

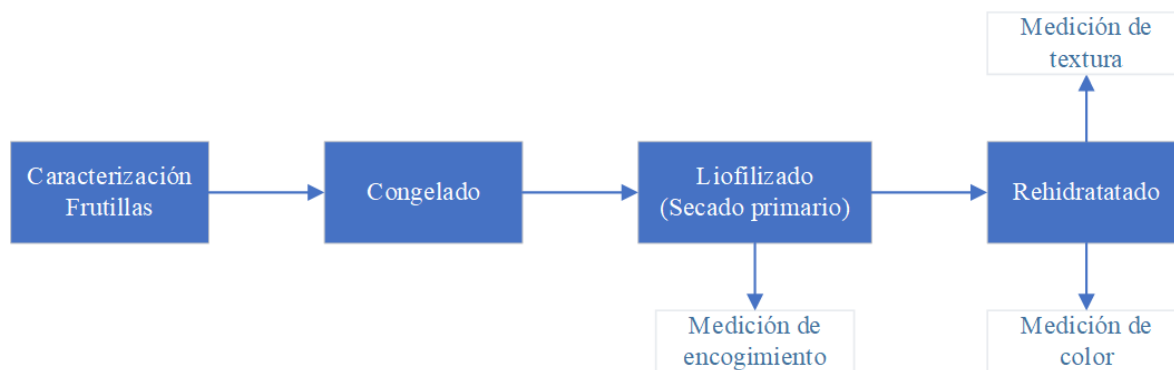


Figura 12. Diagrama de flujo del proceso.

3.2 Materia prima

Las frutillas utilizadas son compradas en el supermercado, para asegurar un índice de maduración parejo y estándares de calidad altos. Estas se adquieren en formato de bandejas de 300 [g], donde por cada bandeja contiene un promedio de 15 frutillas. En la Tabla 2 se encuentra la tabla nutricional de las frutillas utilizadas.

Tabla 2. Tabla nutricional de las frutillas (Frutillas Hortifrut, 2024).

Valores medios	Por cada 100[g/ml]	Por cada 1 porción
Energía [kcal]	30	30
Proteínas [g]	0,7	0,7
Grasas Totales [g]	0,1	0,1
H. Carbono disponible [g]	7,4	7,4
Azúcares Totales [g]	7,1	7,1
Fibra [g]	1,3	1,3
Sodio [mg]	0	0

3.3 Equipos

3.3.1 Liofilizador

El modelo de liofilizador utilizado es el Alpha 2-4 LSCbasic (Figura 13). El cual cuenta con un diseño compacto para aplicaciones de laboratorio e investigación, ideal para procesar pequeñas cantidades de muestra. Posee un condensador con capacidad de 4 [L], capaz de alcanzar temperaturas de hasta $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ o $-85\text{ }^{\circ}\text{C}$, dependiendo de la configuración. El sistema genera un vacío eficiente, logrando presiones de hasta 0.001 [mbar], lo que permite realizar tanto el secado primario como el secundario de manera precisa. Además, cuenta con un rack con capacidad de 5 platos calefaccionados.



Figura 13. Liofilizador Alpha 2-4 LSCbasic.

El equipo de liofilización consta de siguientes principales partes (Operating Manual, 2024):

- La cámara de liofilización, donde se introduce el producto en un entorno limpio y a veces estéril, proporcionando las condiciones de temperatura y presión necesarias para el proceso.
- El condensador, que elimina los vapores condensables antes de que ingresen al sistema de bombeo de vacío.
- El sistema de vacío, encargado de generar las presiones requeridas para llevar a cabo las fases de secado primario y secundario.

- El sensor pirani, que mide la presión en función de la disipación de calor al medio ambiente, la cual afecta la resistencia eléctrica del cable o la corriente bajo una tensión constante, dependiendo del tipo de gas.
- El sensor capacitivo, que mide la presión mediante la deflexión de la membrana de un condensador eléctrico, un método que no depende de la composición del medio.

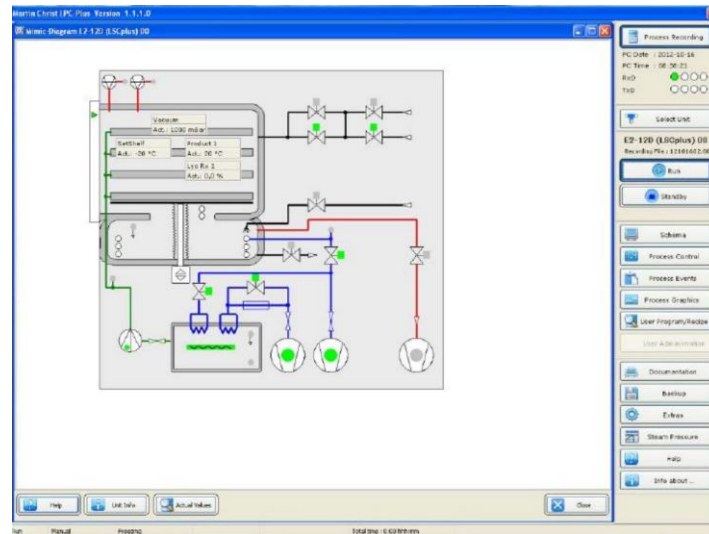


Figura 14. Interfaz equipo de liofilizado.

El equipo se controla mediante el software LPCplus, una plataforma que permite programar y ejecutar el proceso de liofilización, ofreciendo la posibilidad de monitorear (Figura 14) y visualizar las gráficas en tiempo real durante el desarrollo de la prueba (Operating Manual, 2024).

3.3.2 Medidor de encogimiento

Para la medición del encogimiento, se diseñó e implementó un arreglo de un soporte y una cámara completamente articulado (Figura 15), con el fin de monitorear el volumen de la muestra a cada instante del proceso.

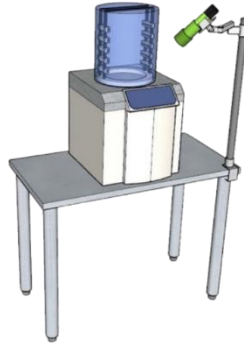


Figura 15. Diseño de arreglo cámara.

La cámara utilizada fue la Blackfly S USB3, modelo BFS-U3-120S4C-CS (Figura 16), la cual es un dispositivo compacto y avanzado que cuenta con un sensor de alta calidad para aplicaciones de captura de imágenes precisas y eficientes. Este modelo específico, ofrece una resolución de 12 [Mpx], con una tasa de fotogramas de 31 FPS y utiliza el sensor Sony IMX226, reconocido por su excelente rendimiento en términos de calidad de imagen y sensibilidad a la luz (Teledyne, 2024).



Figura 16. Cámara Blackfly S USB3.

Este equipo se programa a través de la aplicación SpinView, una herramienta que permite configurar, grabar videos y capturar fotografías en intervalos de tiempo definidos por el usuario. Además, SpinView ofrece una interfaz intuitiva para ajustar parámetros como exposición, balance de blancos, ganancia y resolución, optimizando la calidad de las imágenes capturadas (Teledyne, 2024).

Para la medición de las fotografías se utiliza el software ImageJ, una herramienta de análisis de imágenes ampliamente utilizada en investigaciones científicas. El programa permite realizar mediciones precisas mediante un proceso de calibración que convierte los píxeles de la imagen en unidades de medida reales, como milímetros en este caso.

3.3.3 Horno

Para medir la humedad, se utiliza una estufa de laboratorio Memmert modelo UM200 (Figura 17), diseñada para proporcionar un control preciso y uniforme de la temperatura. Este equipo cuenta con una temperatura nominal máxima de 220 °C y un volumen interno de 32 [L], lo que la hace adecuada para análisis de humedad en diferentes tipos de muestras.



Figura 17. Horno Memmert modelo UM200.

3.3.4 Balanza

Se utiliza la balanza analítica RADWAG modelo AS 200/C/2 (Figura 18), diseñada para mediciones de alta precisión en laboratorios. Este equipo cuenta con una capacidad máxima de 220 [g] y una legibilidad de 0,1 [mg].

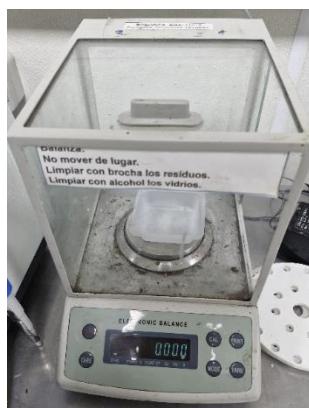


Figura 18. Balanza analítica.

3.3.5 Medidor de Color

Para la medición del color, se utiliza el colorímetro Konica Minolta, modelo CR-400 (Figura 19), reconocido por su precisión y confiabilidad en la evaluación de color en alimentos y otros materiales. Este equipo permite obtener las coordenadas de color bajo el espacio cromático CIE-Lab*, proporcionando un análisis detallado de las características cromáticas de las muestras (Konica Minolta, 2024).

Los parámetros de medición se definen de la siguiente manera:

- L^* : Representa la luminosidad, donde valores positivos (+) indican mayor cercanía al blanco y valores negativos (-) al negro.
- a^* : Corresponde al eje rojo-verde, donde valores positivos (+) indican mayor intensidad de rojo y valores negativos (-) indican tonos verdes.
- b^* : Representa el eje amarillo-azul, donde valores positivos (+) indican mayor intensidad de amarillo y valores negativos (-) se asocian a tonos azules.



Figura 19. Colorímetro Konica Minolta modelo CR-400.

3.3.6 Medidor de textura

Se utiliza un texturómetro TexturePro CT V1.2 Build 9 (Figura 20), diseñado para medir la dureza y otros parámetros relacionados con la textura de las muestras, proporcionando datos clave para evaluar la calidad de la fruta liofilizada. Este equipo permite realizar pruebas de compresión, penetración o deformación, las cuales son fundamentales para analizar la resistencia y consistencia del producto tras el proceso de liofilización.



Figura 20. TexturePro CT V1.2 Build 9.

Para realizar la prueba de textura, es necesario seleccionar cuidadosamente la muestra y configurar parámetros específicos, tales como el tipo de prueba (compresión, tensión, etc.), el objetivo (como determinar dureza o elasticidad) y la carga de activación requerida para realizar la medición. Estas configuraciones aseguran que el análisis sea preciso y reproducible, adaptándose a las características de las frutillas.

El equipo está controlado mediante el software TexturePro CT, que permite programar los parámetros de la prueba, monitorear el proceso en tiempo real y registrar los datos obtenidos para su posterior análisis.

3.4 Metodología

3.4.1 Preparación de materia prima

A las frutillas se realiza la limpieza y secado de forma individual con papel absorbente. Luego se corta el cáliz y el pedúnculo, dejando la mayor área de transferencia en la base para el secado. Es importante que el corte sea lo más recto posible, ya que si queda desnivelada la frutilla puede deslizarse en el proceso del liofilizado.

3.4.2 Congelación

Se realiza la congelación de todas las frutillas frescas caracterizadas a $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Además, previo a cada liofilizado, se congelan los platos del liofilizador 10-15[min] antes del inicio del proceso.

3.4.2.1 Determinación de tiempo de congelación

Para determinar el tiempo de congelación, se procede a configurar la congeladora a una temperatura de $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$. Una vez que la congeladora alcanza y estabiliza dicha temperatura, se colocan frutillas con termocuplas previamente incorporadas en su interior.

Durante el proceso, se monitorea continuamente el cambio de temperatura en función del tiempo detectado por las termocuplas. Las mediciones se realizan hasta que la temperatura registrada en el centro de la frutilla alcance un valor constante, indicando que se ha superado el punto de congelación del agua y que se encuentra congelada hasta el centro de la frutilla.

3.4.3 Proceso de Liofilización

El proceso de liofilización se realiza con un total de 7 frutillas distribuidas en dos platos: una frutilla en el plato superior y seis en el plato inferior. Cada frutilla es previamente caracterizada e identificada según su ubicación específica en los platos, garantizando una distribución controlada para facilitar la recolección de datos y la comparación de resultados.

1. Acondicionamiento del equipo: Antes de iniciar el proceso, se verifica que el equipo esté completamente drenado y en condiciones de presión atmosférica. Posteriormente, se coloca la tapa y se aseguran las válvulas de aireación y drenado.

A continuación, se programa el ciclo de calentamiento inicial (warm-up) para estabilizar el sistema y garantizar un funcionamiento óptimo.

2. Preparación de las muestras: Las frutillas son ordenadas e identificadas de acuerdo con la distribución de los platos. A cada plato se le coloca una termocupla para monitorear la temperatura durante el proceso.
3. Configuración del equipo e inicio del liofilizado: Se programa el equipo estableciendo los parámetros deseados, como la temperatura y presión de operación. Una vez configurado, los platos con las frutillas caracterizadas se introducen en la cámara de liofilización, para luego iniciar el proceso.

3.4.3.1 Determinación fin del secado primario

La determinación del fin del secado primario se realiza utilizando dos parámetros principales: el test de presión y la temperatura del plato, ambos fundamentales para garantizar la precisión del proceso de liofilización.

1. Test de presión: Este método consiste en cerrar la válvula que conecta la cámara de liofilización con el condensador, aislando temporalmente la cámara. En estas condiciones, se mide el aumento de la presión dentro de la cámara durante un intervalo de 30 [s]. Un aumento de presión significativo indica que aún queda agua por sublimar en las muestras. Este procedimiento se realiza cada 1 [h] para minimizar las alteraciones en las condiciones de operación. Cuando el aumento de presión durante el test es inferior al 10%, se concluye que la sublimación ha finalizado, marcando el término del secado primario.
- 2.
3. Temperatura del plato: La medición de la temperatura mediante termocuplas adicionales en cada plato. Una vez que el agua ha sido eliminada, la temperatura de las muestras comienza a aumentar y se estabiliza a una temperatura cercana a la del plato, señalando que el secado primario ha concluido.

La combinación de ambos métodos proporciona una evaluación confiable y precisa del fin del secado primario.

3.4.4 Medición de humedad

Con las frutillas obtenidas tras las pruebas de liofilización, se procede a ingresarlas al vacío en un horno a una temperatura constante de 70 °C durante un periodo de 24 [h]. Este procedimiento tiene como objetivo eliminar por completo el contenido residual de humedad en las muestras, permitiendo medir con precisión la cantidad de agua que queda en su interior tras el proceso de liofilización.

La medición de la humedad remanente se realiza pesando las frutillas antes y después del secado en el horno. Esta diferencia de peso proporciona un valor exacto del contenido de humedad residual, esto se calcula como se puede observar en la Ecuación 1.

$$\% \text{humedad} = \frac{\text{Peso muestra húmeda} - \text{Peso muestra seca}}{\text{Peso muestra húmeda}} \cdot 100 \quad (1)$$

Este análisis es fundamental para evaluar la eficiencia del secado primario, y para garantizar que el producto final cumpla con los estándares requeridos de estabilidad y conservación.

3.4.5 Medición de encogimiento

- Obtención de datos:

Para medir el encogimiento de las frutillas durante el proceso de liofilización, se utiliza una cámara configurada mediante el software SpinView. La cámara se programa para capturar fotografías cada 55103 [frames] durante un intervalo de 3306123 [frames], lo que equivale a tomar una fotografía cada 30 [min] durante un periodo total de 30 [h]. Antes de iniciar el proceso, se toma una fotografía inicial para registrar el volumen de las frutillas en su estado original. Posteriormente, al comenzar la liofilización, se inicia la captura automática de imágenes según la configuración establecida. Es importante destacar que todas las fotografías son capturadas con la misma configuración (foco, zoom, etc), por lo que son comparables entre sí.

- Cálculo del volumen:

Una vez finalizado el proceso, se procede a medir el volumen de las frutillas a partir de las imágenes obtenidas. Para ello, se mide tanto la altura como el diámetro máximo de cada frutilla en tres ocasiones por fotografía, a fin de minimizar posibles errores de medición. Estas mediciones se realizan utilizando el software ImageJ, previamente calibrado para convertir los píxeles en unidades de medida reales [mm].

Dado que la forma aproximada de una frutilla puede asemejarse a la de un cono, el volumen se calcula utilizando la Ecuación 2.

$$\text{Volumen} = \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot \text{altura} \cdot \left(\frac{\text{diámetro}}{2}\right)^2 \quad (2)$$

– Análisis de la Cinética de Encogimiento

Este enfoque permite determinar el volumen en diferentes momentos del proceso de liofilización a distintas temperaturas. Con estos datos, se puede analizar la cinética del encogimiento, estudiando cómo varía el volumen de las frutillas a lo largo del tiempo. Este análisis permite modelar el comportamiento del encogimiento bajo diferentes condiciones térmicas, facilitando la predicción de este sin necesidad de realizar pruebas experimentales adicionales, lo que optimiza recursos y mejora la comprensión del proceso de liofilización. Para describir el encogimiento de las frutillas durante el proceso de liofilización, se utiliza la ecuación general de la cinética de las reacciones (Ecuación 3), considerando la tasa de cambio del volumen en función del tiempo (Holdsworth & Simpson, 2016):

$$-\frac{dV}{dt} = kV^n \quad (3)$$

Donde:

- V: Volumen en el tiempo t.
- k: Constante de velocidad de encogimiento.
- n: Orden de la reacción.

Asumiendo un comportamiento de primer orden para la reacción, es decir, considerando que el encogimiento es proporcional al volumen actual, se toma n=1. Además, se considera el volumen de equilibrio V_e , que representa el volumen mínimo alcanzado al finalizar el proceso de liofilización, cuando no ocurre más encogimiento significativo.

Integrando la ecuación diferencial se obtiene la Ecuación 4 (Levi & Karel, 1995):

$$-\frac{d(V - V_e)}{dt} = k(V - V_e)$$

$$-\frac{d(V - V_e)}{(V - V_e)} = kdt$$

$$-\int_{V_0}^V \frac{d(V - V_e)}{(V - V_e)} = \int_0^t kdt$$

$$\begin{aligned}
 -\ln(V - V_e) \Big|_{V_0}^V &= kt \\
 -\ln \frac{(V - V_e)}{(V_0 - V_e)} &= kt \\
 \frac{V - V_e}{V_0 - V_e} &= e^{-kt} \quad (4)
 \end{aligned}$$

Donde:

- V_0 : Volumen inicial antes del secado [mm^3].
- V_e : Volumen en el equilibrio.
- V : Volumen en el tiempo t .
- k : Constante de velocidad.
- t : Tiempo.

Esta expresión permite modelar la cinética de encogimiento durante el proceso de liofilización. El gráfico de $\ln(V - V_e)$ frente a t debería generar una línea recta con pendiente $-k$, facilitando la determinación de la constante de velocidad del proceso. Este enfoque permite analizar y predecir el comportamiento del encogimiento a diferentes condiciones de temperatura y presión, optimizando así el diseño y control del proceso de liofilización.

– Determinación de Parámetros Cinéticos

Para obtener los parámetros cinéticos faltantes del proceso de encogimiento durante la liofilización, se realiza un análisis gráfico utilizando las constantes de velocidad (k) determinadas previamente a diferentes temperaturas. Estos valores se grafican en una escala lineal siguiendo la ecuación de Arrhenius (Ecuación 5) (Holdsworth & Simpson, 2016):

$$k = Ae^{\frac{E_a}{RT}} \quad (5)$$

Donde:

- k : Constante de velocidad.
- A : Factor frecuencia de colisiones efectivas.
- E_a : Energía de activación [J/mol].
- R : Constante universal de los gases ($8,314 \text{ [J/mol}\cdot\text{K]}$).
- T : Temperatura absoluta [K].

Para facilitar el análisis, se toma el logaritmo natural de ambos lados de la ecuación, obteniendo una relación lineal (Ecuación 6):

$$\ln(k) = \ln(A) - \frac{E_a}{R} \cdot \frac{1}{T} \quad (6)$$

De esta forma, al graficar $\ln(k)$ en función de $\frac{1}{T}$, se genera una línea recta cuya pendiente corresponde a $-\frac{E_a}{R}$ y cuyo intercepto con el eje y es $\ln(A)$.

A partir de esta gráfica:

- La energía de activación E_a calcula multiplicando la pendiente por $-R$.
- El factor frecuencia de colisiones efectivas A se determina mediante la exponenciación del intercepto $\ln(A)$.

Estos parámetros cinéticos permiten describir de manera precisa el comportamiento del encogimiento de las frutillas bajo diferentes condiciones de temperatura, proporcionando información crucial para optimizar el proceso de liofilización y predecir el comportamiento del material en condiciones no experimentales.

3.4.6 Rehidratación

La rehidratación se llevó a cabo utilizando las frutillas liofilizadas, con el objetivo de evaluar factores de calidad (textura y color) de la muestra luego del proceso de liofilización. Para ello, las frutillas se sumergieron completamente en agua destilada durante un periodo de 24 [h] a una temperatura constante de 4 °C.

3.4.7 Medición de color

La medición de color se realizó con el objetivo de comparar las características cromáticas de los siguientes grupos de frutillas:

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

Para cada medición de color se siguieron los pasos descritos a continuación:

- Calibración de blanco: Se realizaron tres mediciones en una placa blanca de calibración, garantizando la precisión del instrumento y minimizando errores sistemáticos.

- Selección de muestras y medición: En cada frutilla, se realizaron cinco mediciones en el plano ecuatorial, abarcando así variaciones locales en la superficie de la muestra.
- Obtención de coordenadas del color: Se registraron las coordenadas cromáticas en el espacio CIELab (Konica Minolta, 2007), obteniendo los valores de L^* (luminosidad), a^* (componente de color verde-rojo), y b^* (componente de color azul-amarillo).

A partir de las coordenadas obtenidas, se calcularon los siguientes parámetros:

4. Hue (tono de color)

Este parámetro describe la percepción del color en términos angulares y se calcula mediante la expresión (Ecuación 7):

$$\text{hue}_{ab} = \arctg\left(\frac{b^*}{a^*}\right) \quad (7)$$

Este cálculo permite identificar la tendencia cromática de las muestras, como tonalidades rojizas, amarillas, etc. (Konica Minolta, 2007).

5. Croma (saturación del color)

Representa la pureza o saturación del color y se obtiene mediante la fórmula (Ecuación 8):

$$\text{Croma}_{ab} = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2} \quad (8)$$

Este valor proporciona una medida cuantitativa de la intensidad del color percibido (Konica Minolta, 2007).

6. ΔE (diferencia de color)

Este parámetro es un valor que representa la diferencia perceptible entre dos colores en colorimetría. Es un estándar utilizado para cuantificar cómo de similar o diferente es un color respecto a otro, basado en un modelo matemático que mide las distancias en el espacio de color (Ecuación 9).

$$\Delta E = \sqrt{(L_2 - L_1)^2 + (a_2 - a_1)^2 + (b_2 - b_1)^2} \quad (9)$$

Interpretación de los Valores de ΔE :

- $\Delta E < 1$: La diferencia de color es imperceptible para el ojo humano.
- $1 \leq \Delta E < 2$: Solo observadores entrenados perciben la diferencia.
- $2 \leq \Delta E < 3.5$: La mayoría de las personas notan una diferencia moderada.
- $\Delta E \geq 3.5$: La diferencia de color es evidente.
- $\Delta E > 5$: Diferencia de color claramente distinguible.

3.4.8 Medición de textura

La medición de textura se realiza utilizando el texturómetro TexturePro CT V1.2 Build 9, diseñado para ejecutar pruebas de compresión en muestras frescas, rehidratadas y descongeladas, permitiendo modelar los puntos de quiebre de los materiales analizados. El equipo mide la fuerza necesaria para generar deformación en las muestras, expresada en Newtons (N), una unidad de fuerza ampliamente utilizada en análisis de textura.

La dureza en alimentos se define como la fuerza requerida para comprimir un alimento, ya sea entre los dientes molares o entre la lengua y el paladar. En términos técnicos, la fuerza máxima (F_{\max}) registrada durante el primer ciclo de compresión corresponde a la dureza de la muestra (Muñoz & Vega, 2014).

Durante este proceso, también se puede obtener distancia máxima de deformación (D_{\max}), que representa el desplazamiento necesario para alcanzar la fuerza máxima. Además de la pendiente de la curva de compresión (S), que indica la relación entre la fuerza aplicada y la deformación sufrida por la muestra. El trabajo máximo (W_{\max}) corresponde a la energía total requerida para alcanzar la fuerza máxima durante la prueba, lo que proporciona información sobre la resistencia estructural de las muestras. Los valores que se pueden obtener se muestra en la Figura 21.

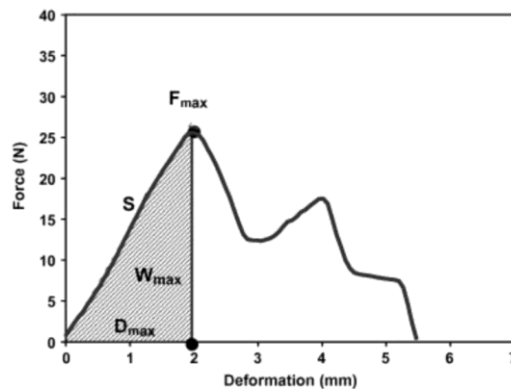


Figura 21. Curva de fuerza en función de la deformación (Galletto et al., 2010).

En el contexto de las frutillas analizadas, se realiza una prueba de compresión que permite evaluar la dureza, entendida como la resistencia del alimento ante la aplicación de una fuerza controlada. Este método permite medir tanto la fuerza necesaria para producir una deformación específica como la deformación generada por una fuerza determinada.

En la Tabla 3, se presentan los parámetros utilizados en el test de compresión, incluyendo las variables clave como la velocidad de prueba, la distancia de compresión, la carga máxima aplicada y el tipo de sonda empleada.

Tabla 3. Parámetros de operación Texturómetro.

Parámetro	Valor
Tipo de muestra	Bloque
Largo de muestra [mm]	-
Diámetro de muestra [mm]	-
Tipo de test	Compresión
Deformación [%]	30
Carga Activación [N]	0,07
Velocidad Test [mm/seg]	1
Sonda	TA11/1000
Contador de Ciclos	1
Tiempo de Recuperación [s]	0

Adicionalmente, en la Figura 22. se muestra el equipo de prueba utilizado, junto con la sonda de compresión aplicada durante los ensayos. La selección de la sonda es fundamental, ya que su geometría y material afectan directamente la distribución de la fuerza y el comportamiento de la muestra durante el proceso de compresión.



Figura 22. Equipo y sonda utilizada en prueba de compresión.

3.4.9 Análisis Estadístico

Para evaluar los resultados obtenidos durante el estudio, se aplicaron técnicas estadísticas utilizando el software Statgraphics Centurion. En primer lugar, se realiza un análisis de varianza (ANOVA) con el objetivo de determinar si existían diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos aplicados. Este análisis permite comparar las medias de las variables estudiadas, como el encogimiento, bajo un nivel de confianza del 95 % (Montgomery, 2020).

Posteriormente, se realiza una prueba de múltiples rangos de Duncan, una herramienta estadística que facilita la identificación de grupos homogéneos entre los tratamientos analizados. Esta prueba permite establecer qué pares de temperaturas presentan diferencias significativas en sus medias y cuáles comparten comportamientos similares, contribuyendo a una interpretación más precisa de los datos (Duncan, 1955).

4. Resultados y discusión

4.1 Determinación del tiempo de congelación

La Figura 23 muestra la curva de congelación para las frutillas, evidenciando tres etapas clave: un descenso rápido inicial (eliminación de calor sensible), una estabilización en torno a los 0 °C (formación de cristales de hielo) y una caída final hasta -35 °C (enfriamiento de sólidos congelados). Una muestra alcanza temperaturas más bajas más rápidamente, lo que podría deberse a diferencias en tamaño. A partir de las 2,5 [h], ambas frutillas alcanzan temperaturas estables y se concluye que se encuentran completamente congeladas.

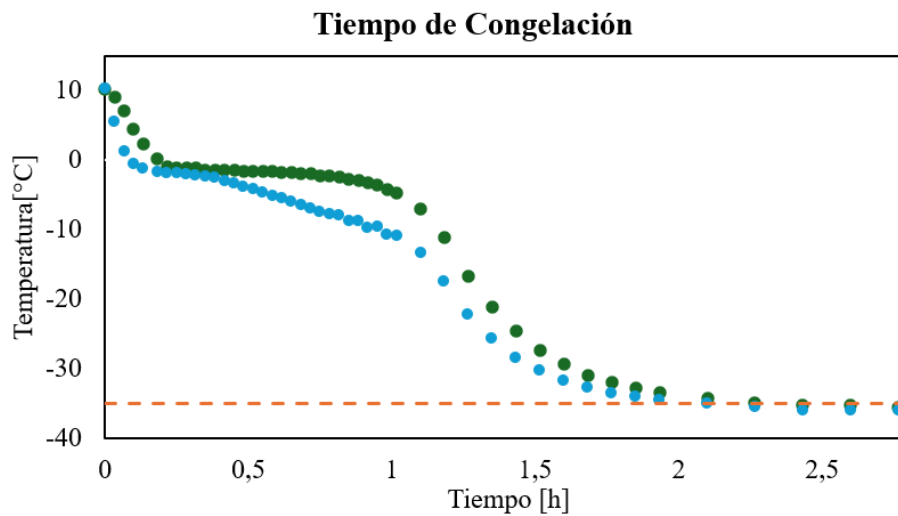


Figura 23. Tiempo de congelación.

4.2 Liofilizado

4.2.1 Determinación del tiempo del secado primario

Para la determinación del tiempo de secado primario se utilizó como criterio la estabilización de la temperatura de muestra (termocupla) y el test de presión inferior al 10%. Mediante los gráficos que se encuentran en el Anexo 1. y la Figura 24 se puede concluir los tiempos de secado primario, valores que se encuentran en la Tabla 4.

Tabla 4. Tiempos de secado primario y humedad frutillas liofilizadas.

Temperatura de Liofilización	Tiempo Secado Primario	Humedad
50 °C	20[h]	0,97 ± 0,002 %
40 °C	23[h]	2,12 ± 0,009 %
30 °C	25[h]	2,23 ± 0,007 %

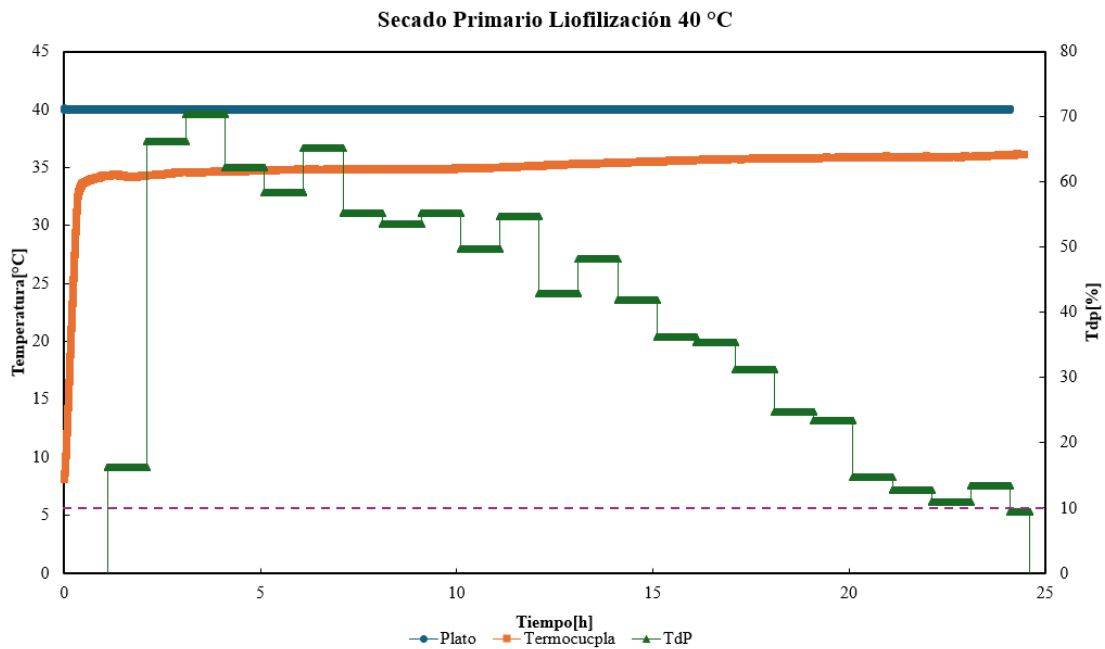


Figura 24. Secado primario liofilización 40 °C.

4.2.2 Determinación de humedad

Los resultados obtenidos (Tabla 4) muestran una relación inversa entre la temperatura de liofilización y la humedad residual tras el secado primario. A medida que la temperatura de liofilización aumenta, el contenido de humedad final disminuye.

A 50 °C, la frutilla presenta una humedad residual de 0,97%, indicando que la eliminación de agua fue más efectiva debido a la mayor energía térmica aplicada, lo que favorece la sublimación. A 40 °C, la humedad residual se incrementa a 2,12%, mientras que a 30 °C, se registra el valor más alto, con 2,23%, lo que evidencia un secado menos eficiente a temperaturas más bajas.

Este comportamiento puede explicarse por la capacidad de la frutilla para mantener una mayor cantidad de agua ligada a temperaturas más bajas, ya que la energía térmica disponible no es suficiente para superar las fuerzas de adhesión del agua a la matriz del producto. Además, las menores temperaturas podrían ralentizar el proceso de sublimación, alargando el tiempo necesario para alcanzar niveles mínimos de humedad.

4.2.3 Medición de factor de calidad encogimiento

A una temperatura de liofilización de 50 °C, la retención de volumen de las frutillas alcanza un valor promedio de $74,29 \pm 4,83\%$. Si bien este valor es cercano al obtenido a 40 °C, se observa una mayor variabilidad a lo largo del proceso. Esta variabilidad puede atribuirse a las tensiones estructurales generadas por la rápida sublimación debido a las temperaturas más elevadas, lo que afecta la estabilidad de la matriz celular del producto.

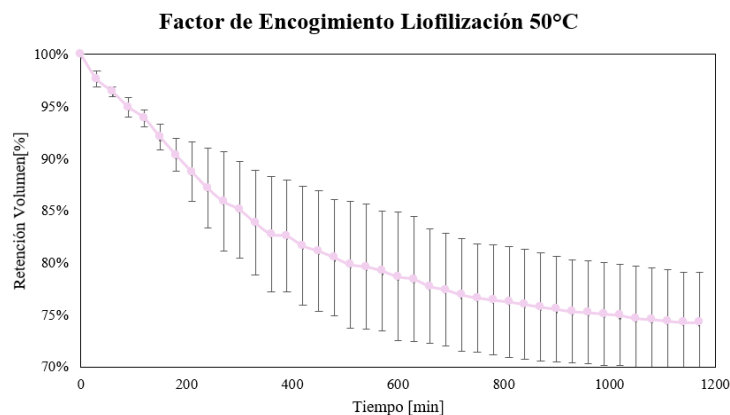


Figura 25. Factor de encogimiento de liofilización a 50 °C.

En la Figura 25 se muestra una disminución gradual del volumen a lo largo del tiempo, siendo más pronunciada en las primeras 400-500 [min] del proceso. Esto coincide con la etapa de secado primario, donde ocurre la sublimación del agua congelada.

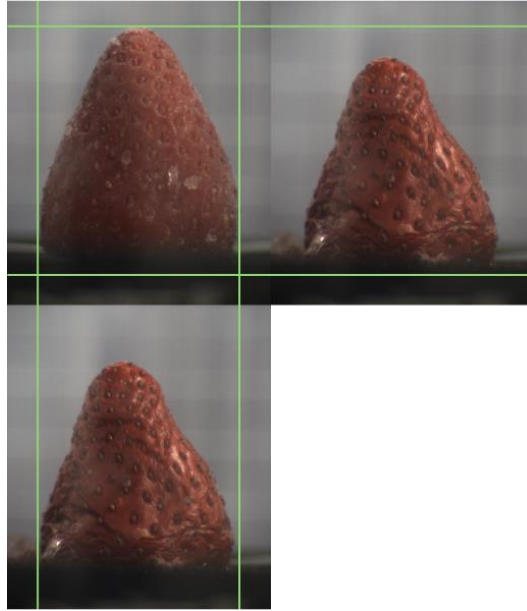


Figura 26. Fotografías liofilización 50 °C.

Las imágenes de comparación entre el inicio y el final del proceso (Figura 26) evidencian visualmente el encogimiento de la frutilla, caracterizado por una reducción notable de su altura y diámetro. Esto confirma que, si bien la liofilización a 50 °C permite una eliminación eficiente de humedad, también incrementa la probabilidad de colapso estructural debido a la aceleración de las tasas de sublimación y a las diferencias térmicas en la superficie e interior del producto.

A una temperatura de liofilización de 40 °C, la retención de volumen disminuye a $73,23 \pm 3,85\%$, lo que indica un mayor encogimiento en comparación con la temperatura de 30 °C. Este comportamiento puede atribuirse a una sublimación más rápida, característica de temperaturas más altas, que provoca un mayor estrés estructural en la matriz del producto, afectando su estabilidad.

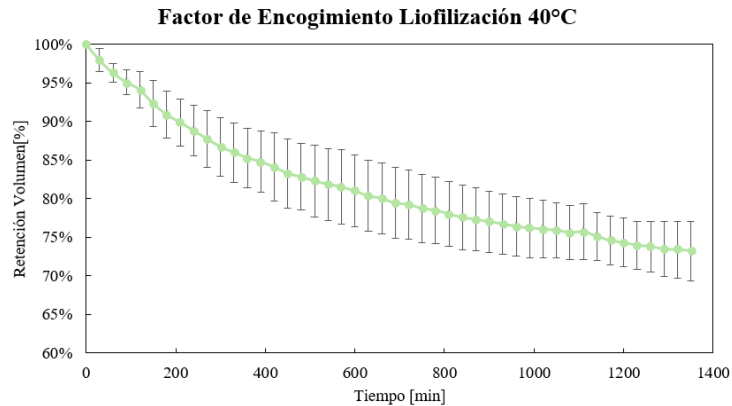


Figura 27. Factor de encogimiento de liofilización a 40 °C.

En la Figura 27, se observa una disminución constante y progresiva a lo largo del tiempo, con una pendiente más pronunciada en las primeras 600-800 [min] del proceso, que corresponde a la etapa de secado primario. En esta fase, la rápida eliminación de agua produce tensiones internas que aceleran el colapso estructural, generando un mayor encogimiento.

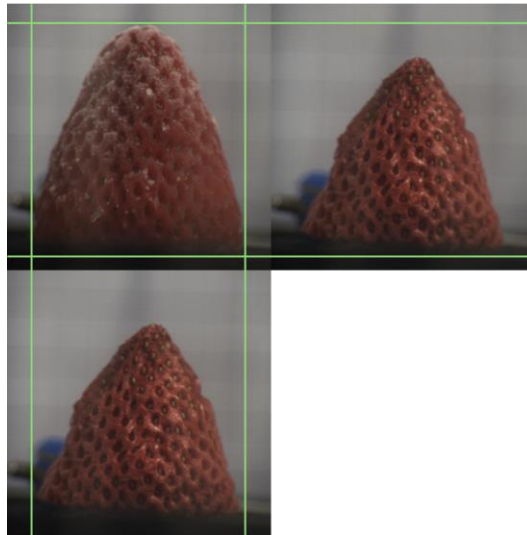


Figura 28. Fotografías liofilización 40 °C.

Las imágenes comparativas entre el inicio y el final del proceso (Figura 28) evidencian claramente el efecto del encogimiento, con una notable reducción de la altura y del diámetro de la frutilla. Además, la superficie presenta una mayor cantidad de deformaciones y cavidades, indicativo de un colapso parcial de los poros, asociado a una sublimación acelerada y a una posible redistribución del agua residual durante el proceso.

A una temperatura de liofilización de 30 °C, se obtiene la mayor retención de volumen con un valor de $80,27 \pm 1,39\%$, lo que indica un menor encogimiento de las frutillas en comparación con temperaturas más altas. Este resultado sugiere que a temperaturas más bajas, la sublimación de cristales de hielo es más controlada, permitiendo que ocurra de manera gradual y preservando mejor la estructura celular del producto.

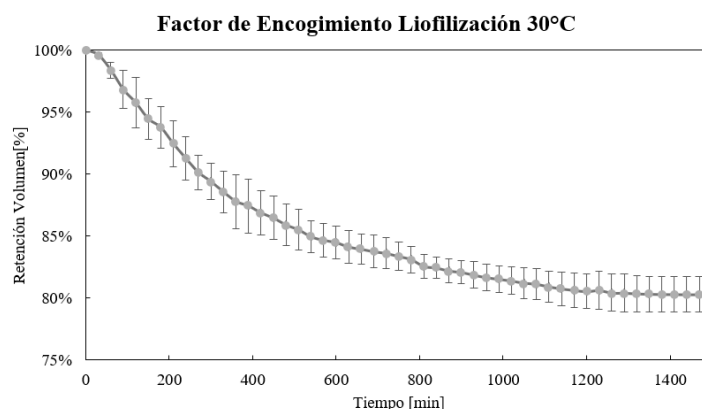


Figura 29. Factor de encogimiento de liofilización a 30 °C.

En la Figura 29, se observa una disminución más lenta y uniforme a lo largo del tiempo en comparación con temperaturas de 40 y 50 °C. La pendiente menos pronunciada indica que la sublimación es más controlada, lo que reduce las tensiones estructurales y el riesgo de colapso en la matriz celular.

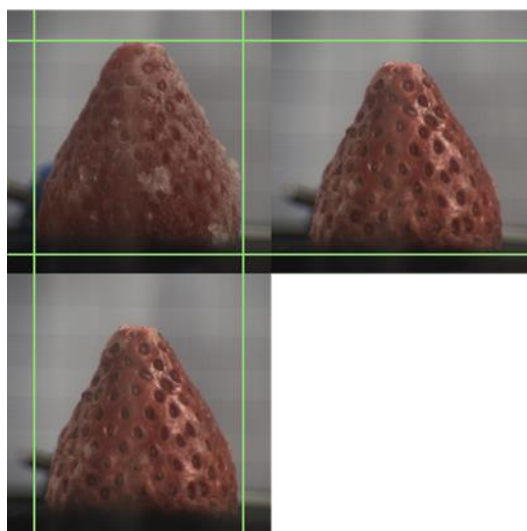


Figura 30. Fotografías liofilización 30 °C.

Las imágenes comparativas entre el inicio y el final del proceso (Figura 30) muestran un menor grado de encogimiento y deformación en comparación con las frutillas procesadas a

temperaturas más altas. La estructura superficial presenta poros más uniformes y menos evidentes, lo que refleja una mejor conservación de la integridad física del producto liofilizado.

La Figura 31 y Tabla 5 se muestra la retención de volumen de las frutillas liofilizadas a diferentes temperaturas de secado primario. Los resultados evidencian que a medida que la temperatura de liofilización disminuye, la retención del volumen es mayor, indicando un menor grado de encogimiento.

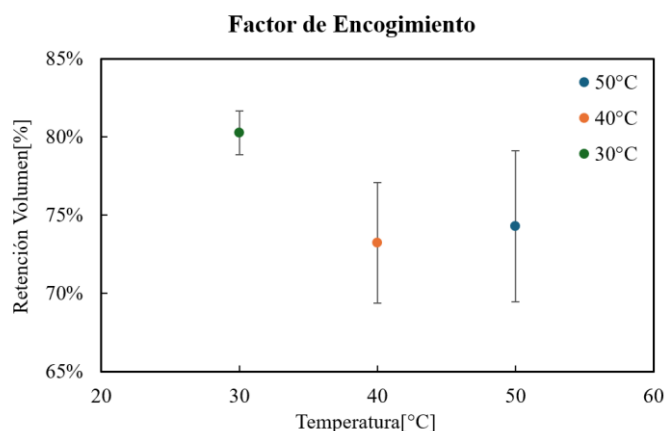


Figura 31. Factor de encogimiento.

Tabla 5. Retención del volumen frutillas liofilizadas.

Temperatura de Liofilización	Retención del Volumen
50 °C	74,29 ± 4,83 ^a [%]
40 °C	73,23 ± 3,85 ^a [%]
30 °C	80,27 ± 1,39 ^a [%]

Mediante el análisis estadístico, no se observaron diferencias significativas estadísticamente, con un 95% de confianza. Sin embargo, la tendencia observada confirma que temperaturas más bajas durante la liofilización favorecen una mejor conservación estructural, ya que permiten un proceso de sublimación más lento y controlado, evitando el colapso de los poros y minimizando el encogimiento. Sin embargo, esto también puede implicar tiempos de secado más largos. Por otro lado, a temperaturas más altas, aunque el proceso es más eficiente en términos de tiempo, la estructura del producto tiende a sufrir mayor deformación debido a la mayor presión de vapor generada y la rápida eliminación de agua.

4.2.4 Cinética de encogimiento

A continuación, se analizan las cinéticas del encogimiento de las frutillas durante el proceso de liofilización a diferentes temperaturas (30, 40 y 50 °C). La representación de $\ln(V-V_e)$ en función del tiempo confirma que el comportamiento del encogimiento sigue una reacción de primer orden, como se observa en las gráficas correspondientes.

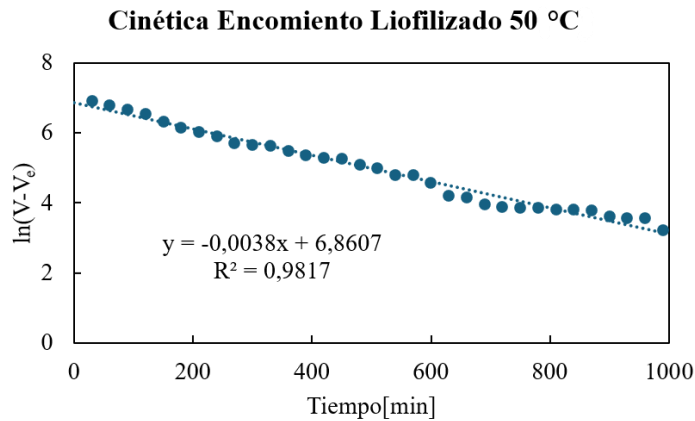


Figura 32. Cinética encogimiento liofilizado 50 °C.

En la Figura 32, mediante la regresión lineal de la cinética de encogimiento del liofilizado a 50 °C se obtiene que la constante de velocidad k obtenida es de $0,0038 \text{ [min}^{-1}\text{]}$, con un ajuste adecuado al modelo ($R^2 = 0,9817$). A esta temperatura, la velocidad de sublimación es la más alta entre las condiciones analizadas, lo que acelera el proceso de encogimiento, pero también provoca una mayor variabilidad y tensiones estructurales, afectando la estabilidad del producto final.

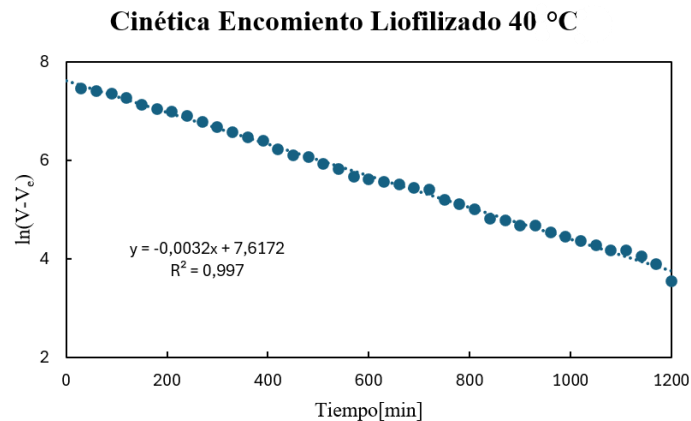


Figura 33. Cinética encogimiento liofilizado 40 °C.

En la Figura 33, mediante la regresión lineal de la cinética de encogimiento del liofilizado a 40 °C se obtiene que La constante de velocidad k es de 0,0032 [min⁻¹], con un ajuste excelente al modelo ($R^2 = 0,997$). A 40 °C, la sublimación ocurre a una velocidad moderada, resultando en un encogimiento intermedio y más controlado que a 50 °C.

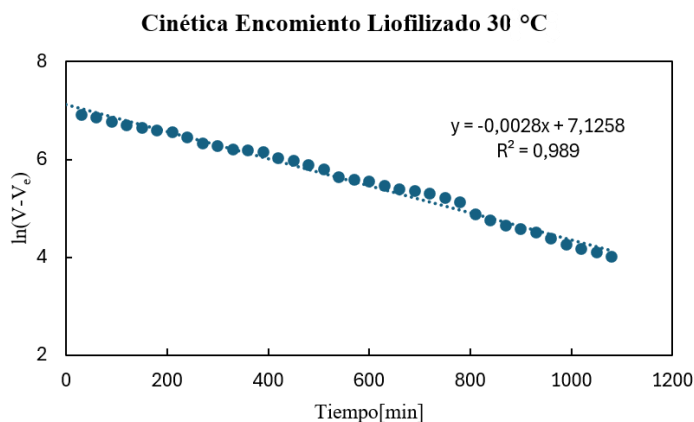


Figura 34. Cinética encogimiento liofilizado 30 °C.

En la Figura 34, mediante la regresión lineal de la cinética de encogimiento del liofilizado a 30°C se obtiene que la constante de velocidad k obtenida es de 0,0028 [min⁻¹], con un ajuste muy adecuado ($R^2 = 0,989$). A 30 °C, el encogimiento es más lento, lo que permite una mejor conservación de la estructura celular del producto. La sublimación controlada a temperaturas bajas minimiza las tensiones y reduce el colapso estructural, resultando en una mayor retención de volumen.

Para obtener los parámetros cinéticos faltantes se utiliza la ecuación de Arrhenius, donde la relación entre la constante de velocidad k y la temperatura T se ajusta de la siguiente forma, utilizando la Ecuación 6.

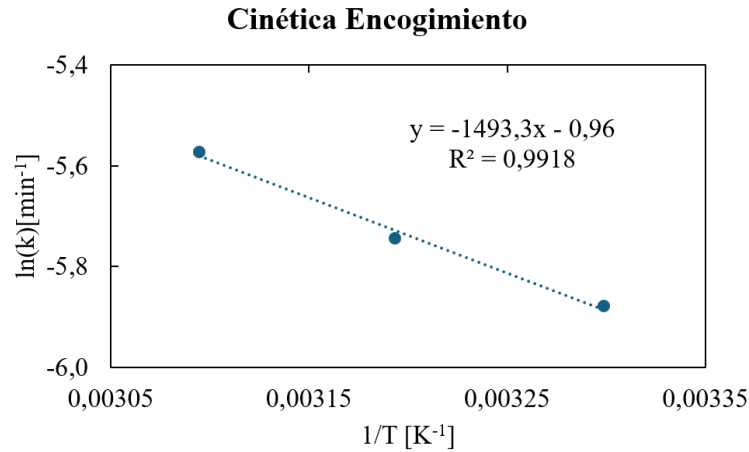


Figura 35. Cinética encogimiento.

Al graficar las constantes de velocidad (Figura 35) obtenidas a las diferentes temperaturas, se obtuvo la siguiente regresión lineal con un ajuste excelente al modelo ($R^2 = 0,9918$):

$$\ln k = -1493,3 \cdot \frac{1}{T} - 0,96 \quad (10)$$

Luego, se calcularon los siguientes parámetros cinéticos (Tabla 6), obteniendo que la energía de activación (E_a) es de 12,415 [KJ/mol] y el factor frecuencia de colisiones efectivas (A) es de 0,3828 [min^{-1}]. Lo cual, permite modelar y predecir la cinética de encogimiento a otras temperaturas.

Tabla 6. Parámetros cinéticos del encogimiento.

$k_{50^\circ\text{C}}$ [min^{-1}]	$k_{40^\circ\text{C}}$ [min^{-1}]	$k_{30^\circ\text{C}}$ [min^{-1}]	E_a [KJ/mol]	A [min^{-1}]	R [J/mol K]
0,0038	0,0032	0,0028	12,415	0,3828	8,314

4.3 Medición de factor de calidad color

Los resultados obtenidos en la Tabla 7 muestran cómo varían los parámetros de color L^* , a^* , b^* , Hue y Croma para las frutillas en sus diferentes estados: frescas, descongeladas y rehidratadas tras la liofilización a 30, 40 y 50 °C.

Tabla 7. Parámetros de color las frutillas.

Tipo de Frutillas	L^*	a^*	b^*	hue°	Croma	ΔE
Frescas	33,67±2,55 ^b	28,15±3,85 ^{a,b}	17,72±2,32 ^{a,b}	32,18	33,26	-
Descongeladas	31,18±1,63 ^a	25,99±1,19 ^a	16,56±1,73 ^a	32,51	30,82	3,49
Rehidratadas (Liofilizado 30°C)	35,59±2,05 ^{b,c}	31,29±2,06 ^{b,c}	20,16±3,13 ^b	32,84	37,24	4,43
Rehidratadas (Liofilizado 40°C)	35,40±0,98 ^{b,c}	30,90±1,57 ^{b,c}	20,09±2,42 ^b	33,03	36,86	4,03
Rehidratadas (Liofilizado 50°C)	37,53±2,74 ^c	32,77±2,41 ^c	20,60±2,05 ^b	32,16	38,71	6,68

4.3.1 Luminosidad(L^*):

Las frutillas frescas presentan un valor de $33,67 \pm 2,55$, mientras que las descongeladas tienen una disminución notable a $31,18 \pm 1,63$, lo que sugiere un oscurecimiento inicial debido al proceso de congelación.

Las frutillas rehidratadas muestran un aumento en la luminosidad respecto a las descongeladas, con valores crecientes a medida que aumenta la temperatura de liofilización. Lo cual indica que una mayor temperatura de liofilización favorece una mejor recuperación de la luminosidad en el producto rehidratado, probablemente debido a una mejor conservación de la estructura superficial.

4.3.2 Parámetro a^* (rojo-verde):

Las frutillas frescas tienen el mayor valor de tonalidad roja ($28,15 \pm 3,85$), mientras que las descongeladas disminuyen a $25,99 \pm 1,19$, mostrando una pérdida de color.

En las frutillas rehidratadas, el parámetro a^* aumenta con la temperatura de liofilización. Lo que sugiere que a temperaturas más altas se produce una mejor preservación del color rojo,

posiblemente por una sublimación más eficiente y un menor daño en los pigmentos responsables del color, como las antocianinas.

4.3.3 Parámetro b* (amarillo-azul):

El valor b* en frutillas frescas es de $17,72 \pm 2,32$, mientras que en las descongeladas disminuye a $16,56 \pm 1,73$.

Las frutillas rehidratadas muestran un aumento progresivo del b* con la temperatura. Por lo que, indica un ligero cambio hacia tonalidades más amarillas, especialmente a temperaturas más altas, lo que puede deberse a reacciones de oxidación o degradación de pigmentos durante la liofilización.

4.3.4 Hue° (tono):

El parámetro Hue° muestra pequeñas variaciones entre los diferentes tratamientos. Por lo que, se concluye que no se ve afectado por los diferentes procedimientos.

4.3.5 Croma (saturación del color):

Las frutillas frescas tienen un valor de 33,26, el cual disminuye a 30,82 en las descongeladas.

En las frutillas rehidratadas, el valor de Croma aumenta, indicando una mayor saturación del color. Este incremento en el Croma refleja una mejor recuperación del color en las frutillas tratadas a 50 °C, lo que sugiere una mayor intensidad y vivacidad en el color final.

4.3.6 ΔE (diferencia de color):

El análisis del ΔE muestra que las frutillas descongeladas presentan un cambio de color moderado ($\Delta E = 3.49$), atribuible al oscurecimiento inicial por el daño estructural durante la congelación.

En las frutillas rehidratadas, el ΔE aumenta progresivamente con la temperatura de liofilización, siendo 4.43 a 30 °C, 4.03 a 40 °C y alcanzando 6.68 a 50 °C, lo que indica un mayor cambio perceptible en el color respecto a las frescas.

4.4 Medición de factor de calidad textura

A continuación, se analiza la textura de las frutillas en sus diferentes estados mediante test de compresión (Anexo 2.), evaluando la fuerza máxima ($F_{m\acute{a}x}$), la cual corresponde a la dureza del producto. Los resultados obtenidos se detallan en las Tablas 8 y 9.

Tabla 8. Fuerza máxima frutillas liofilizadas.

Tipo de Frutillas	Rehidratadas (Liofilizado 30°C)	Rehidratadas (Liofilizado 40°C)	Rehidratadas (Liofilizado 50°C)
$F_{m\acute{a}x}$ [N]	0,80±0,34	0,98±0,58	0,57±0,14

Tabla 9. Fuerza máxima frutillas frescas y descongeladas.

Tipo de Frutillas	Frescas	Descongeladas
$F_{m\acute{a}x}$ [N]	31,32±7,14	5,99±1,91

Las frutillas frescas presentan la mayor fuerza máxima con un valor promedio de $31,32 \pm 7,14$ [N], lo cual refleja la estructura firme y natural de la fruta en su estado inicial. La curva de compresión muestra una progresión constante de carga hasta alcanzar valores elevados, evidenciando la resistencia de la estructura celular intacta.

En las frutillas descongeladas, la fuerza máxima disminuye significativamente a $5,99 \pm 1,91$ [N], lo que indica una pérdida de firmeza atribuida al daño celular causado por la formación de cristales de hielo durante la congelación y descongelación. Las curvas de carga son menos pronunciadas, mostrando una menor resistencia a la compresión.

Las frutillas liofilizadas rehidratadas presentan los siguientes resultados:

- Liofilización a 50 °C: La $F_{m\acute{a}x}$ disminuye a $0,57 \pm 0,14$ [N], indicando que a esta temperatura la sublimación acelerada provoca un mayor colapso de los poros, afectando la firmeza del producto rehidratado.
- Liofilización a 40 °C: Se observa un incremento de la dureza a $0,98 \pm 0,58$ [N], lo que sugiere una estructura ligeramente más estable, posiblemente debido a la mayor velocidad de sublimación que reduce el daño en la matriz celular.

- Liofilización a 30 °C: La $F_{\text{máx}}$ es de $0,80 \pm 0,34$ [N], presentando la menor dureza entre las muestras rehidratadas. Esto puede explicarse por el encogimiento estructural moderado y la pérdida parcial de integridad celular debido a la sublimación más lenta.

Comparando con las frutillas frescas y descongeladas, se concluye que el proceso de liofilización provoca una pérdida significativa de firmeza en las muestras rehidratadas, siendo más pronunciada en temperaturas extremas.

5. Conclusión

La temperatura de liofilización influye significativamente en la calidad del producto, afectando la retención de volumen, el color y la textura. A 30 °C se logró la mayor retención de volumen ($80,27 \pm 1,39\%$), destacando por conservar mejor la estructura celular, aunque los tiempos de proceso más largos podrían limitar su aplicación industrial. Si bien no hubo diferencias estadísticamente significativas entre las temperaturas estudiadas, se observó que temperaturas más bajas favorecen una sublimación controlada, lo que minimiza el encogimiento y sigue un modelo cinético de primer orden, facilitando la predicción en otras condiciones sin experimentación adicional.

Por su parte, la liofilización a 40 °C ofreció mejores resultados en la conservación del color, una ventaja para productos donde la apariencia es crucial. En cuanto a la textura, las frutillas descongeladas mostraron mayor dureza en comparación con las rehidratadas, evidenciando que el proceso afecta las propiedades mecánicas del alimento.

En conclusión, la selección de la temperatura de liofilización debe equilibrar la conservación de la calidad del producto, como la estructura, color y textura, con los tiempos y costos del proceso, para garantizar su viabilidad técnica y económica a escala industrial.

6. Recomendaciones

Con el fin de mantener estable la frutilla durante la toma de fotografías, se utilizó el soporte mostrado en la Figura 36. Durante el proceso de liofilización, no se observaron cambios estructurales notables, lo que inicialmente generó dudas sobre si la muestra se había liofilizado correctamente (Figura 37). Sin embargo, al momento de seccionar la muestra (Figura 38), se constató que la frutilla estaba completamente liofilizada y de manera uniforme.

Esto sugiere que el soporte utilizado contribuye a una conducción del calor más uniforme y eficiente, lo que optimiza el proceso de liofilización al evitar desequilibrios térmicos en la muestra. En base a estos resultados, se recomienda realizar más pruebas con este soporte para evaluar de manera sistemática su impacto en la calidad final del producto liofilizado.



Figura 36. Soporte frutillas.



Figura 37. Frutilla liofilizada.



Figura 38. Interior frutilla liofilizada.

7. Referencias

- Allgaier. (2024). *Secador de Tambor*. Obtenido de Allgaier Process Technology: <https://www.allgaier-process-technology.com>
- Araki, C., Yamaguchi, S., & Tanaka, M. (2012). *Rehydration kinetics of freeze-dried food products*. *Journal of Food Science*, 76(4), 78-85.
- Bacaoanu, A., & Sabina, M. (2005). *Lyophilization - Freeze-Drying*. Obtenido de <https://revroum.lew.ro>
- Basu, A., Nguyen, A., M. Betts, N., & J. Lyons, T. (2013). *Strawberry As a Functional Food: An Evidence-Based Review*. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 53(9), 927-939. Obtenido de <https://www.tandfonline.com>
- Buchi. (2024). *Spray drying*. Obtenido de Buchi: <https://www.buchi.com>
- Chile alimentos. (2022). *Toneladas alcanzadas en la producción de frutillas en 2022*. Obtenido de Chile alimentos: <https://chilealimentos.com>
- Congelación y descongelación de células*. (2024). Obtenido de Sarreplec: <https://sarreplec.caib.es>
- Duncan, D. B. (1955). Multiple Range and Multiple F Tests. *International Biometric Society*, 11(1), 1-42.
- Estrada, H., Restrepo, C., Saumett, H., & Pérez, L. (2018). Deshidratación Osmótica y Secado por Aire Caliente en Mango, Guayaba y Limón para la Obtención de Ingredientes Funcionales. *Ingeniería e Investigación*, 53(1), 57-68. Obtenido de <https://www.scielo.cl>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2022). Obtenido de Food and Agriculture Organization of the United Nations: <https://www.fao.org>
- FoodTechProcess. (2024). *Secador de infrarrojos*. Obtenido de FoodTechProcess: <https://foodtechprocess.com>
- Franks, F. (2008). *Freeze-drying of bioproducts: Putting principles into practice*. *Journal of Applied Biochemistry*, 53(1), 57-68.
- Frutillas Hortifrut*. (2024). Obtenido de Jumbo: <https://www.jumbo.cl>
- Galetto, C., Verdini, R., Zorrilla, S., & Rubiolo, A. (2010). *Freezing of strawberries by immersion in CaCl₂ solutions*. *Food Chemistry*, 122(4), 1140-1145. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com>
- Hammami, C., & René, F. (1997). Determination of Freeze-drying Process Variables for Strawberries. *Journal of Food Engineering*, 33(3), 133-145.
- Harnkarnsujarit, N., & Charoenrein, S. (2011). *Glass transition and freeze-drying of fruits: Structural stability considerations*. *Food Research International*, 45(3), 70-80.

Holdsworth, D., & Simpson, R. (2016). *Thermal Processing of Packaged Foods (2nd ed.)*. Springer.

Hu, J., Sun, X., Xiao, H., Liu, C., Yang, F., Liu, W., . . . Wang, H. (2024). *Effect of guar gum, gelatin, and pectin on moisture changes in freeze-dried restructured strawberry blocks*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com>

Konica Minolta. (2007). *Precise Color Communication*. Obtenido de Konica Minolta: <https://www.konicaminolta.com>

Konica Minolta. (2024). *Medidor de Colorimetría CR-400*. Obtenido de Konica Minolta: <https://sensing.konicaminolta.us>

Krokida, M., Maroulis, Z., & Saravacos, G. (2000). *Freeze-drying applications in food preservation*. *Drying Technology*, 22(6), 100-123.

Levi, G., & Karel, M. (1995). *Volumetric shrinkage (collapse) in freeze-dried carbohydrates above their glass transition temperature*. *Food Research International*, 28(2), 145–151.

Liapis, A. I., & Bruttini, R. (2015). *Porosity development in freeze-dried materials*. *Drying Technology*, 33(5), 545-561.

Machinery Arrow. (2021). *Ventajas y aplicaciones del secado por microondas*. Obtenido de Machinery Arrow: <https://es.arrowextrusion.com>

Montgomery, D. C. (2020). *Design and Analysis of Experiments (10th ed.)*. Wiley.

Muñoz, A., & Vega, J. (2014). *Determinación de la textura*. Obtenido de <https://es.slideshare.net>

Operating Manual. (2024). Obtenido de <https://www.martinchrist.de>

Pefaur Lepe, J. (2014). *El mercado de las frutillas*. Obtenido de <https://www.odepa.gob.cl>

Ratti, C. (2001). *Hot air and freeze-drying of high-value foods: A review*. *Journal of Food Engineering*, 49(4), 311-319. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com>

Sá, M., & Sereno, A. (1994). *Glass transitions and state diagrams for typical natural fruits and vegetables*. *Journal of Food Engineering*, 22(3), 313-325.

Shishegarha, F., Makhlof, J., & Ratti, C. (2002). *Freeze-drying characteristics of strawberries*. *Drying Technology*, 20(6), 131-144.

South Pacific Logistics. (2024). *Exportación de Frutillas Congeladas*. Obtenido de South Pacific Logistics: <https://web.splogistics.com>

Tang, X., & Pikal, M. J. (2004). *Design of freeze-drying processes for pharmaceuticals: Practical issues and concerns*. *Pharmaceutical Research*, 21(2), 191-200.

Teledyne. (2024). *Blackfly S USB3*. Obtenido de Teledyne: <https://www.teledynevisionsolutions.com>

Teledyne. (2024). *Spinnaker SDK*. Obtenido de Teledyne:
<https://www.teledynevisionsolutions.com>

Vaisala. (2024). *Monitoreo de secador de lecho fluidizado*. Obtenido de Vaisala:
<https://www.vaisala.com>

8. Anexos

Anexo 1. Proceso de Secado Primario.

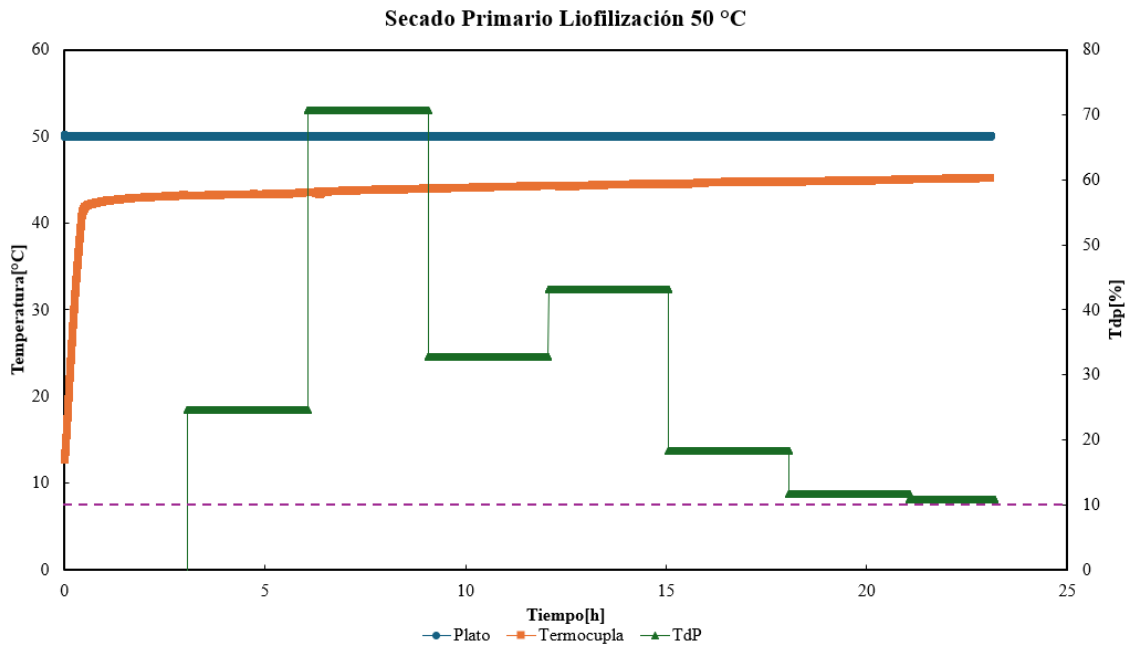


Figura 39. Secado primario liofilización 50 °C.

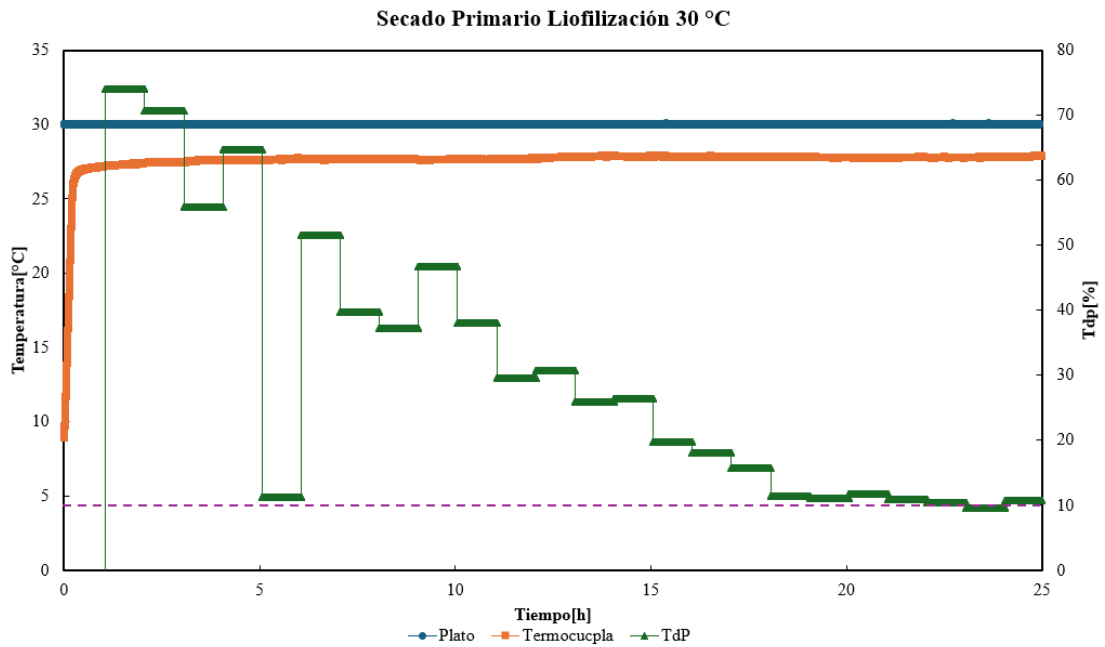


Figura 40. Secado primario liofilización 30 °C.

Anexo 2. Test de compresión frutillas.

**Test de Compresión Frutillas Rehidratadas Liofilizadas
50°C**

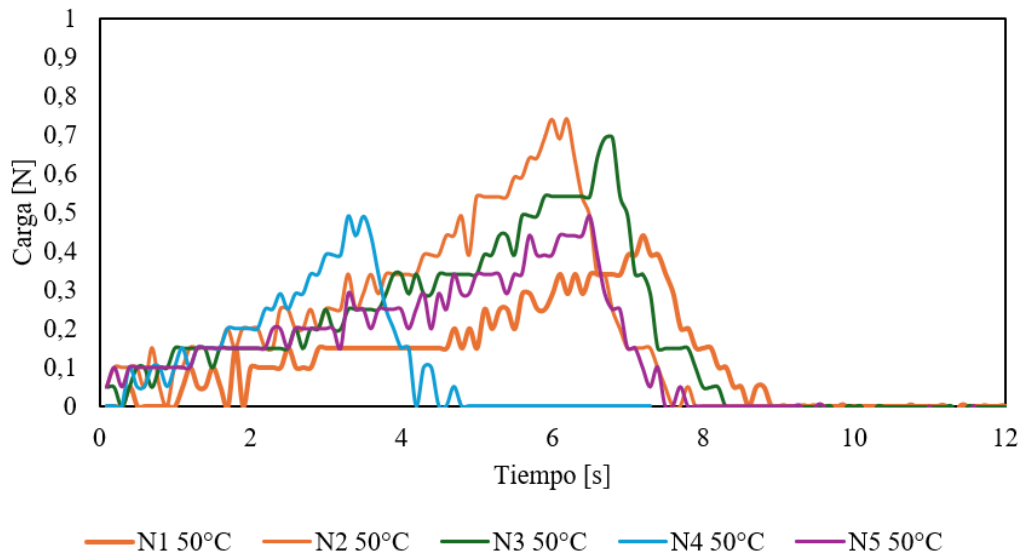


Figura 41. Test de compresión frutillas rehidratadas liofilizadas 50 °C.

**Test de Compresión Frutillas Rehidratadas Liofilizadas
40°C**

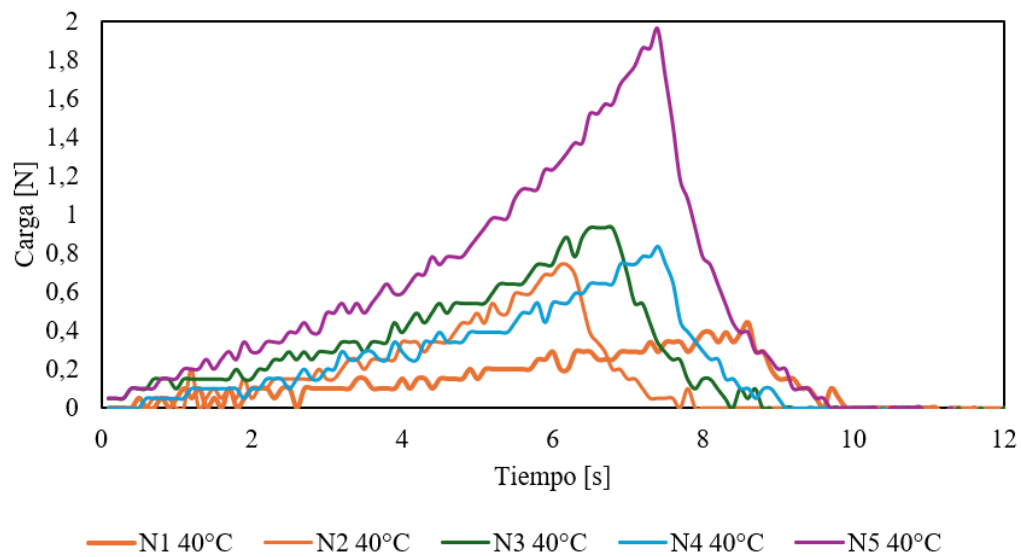


Figura 42. Test de compresión frutillas rehidratadas liofilizadas 40 °C.

Test de Compresión Frutillas Rehidratadas Liofilizadas 30°C

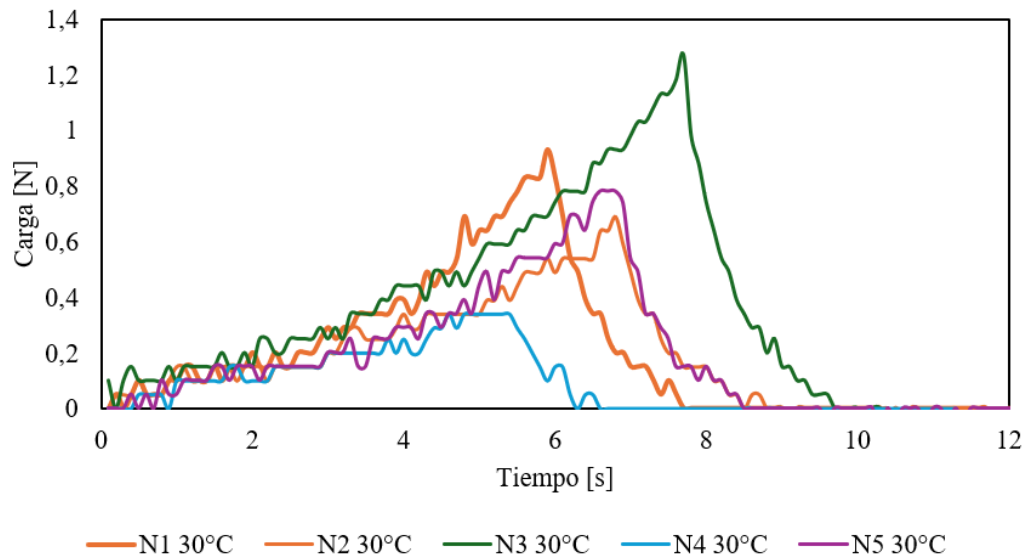


Figura 43. Test de compresión frutillas rehidratadas liofilizadas 30 °C.

Test de Compresión Frutillas Frescas

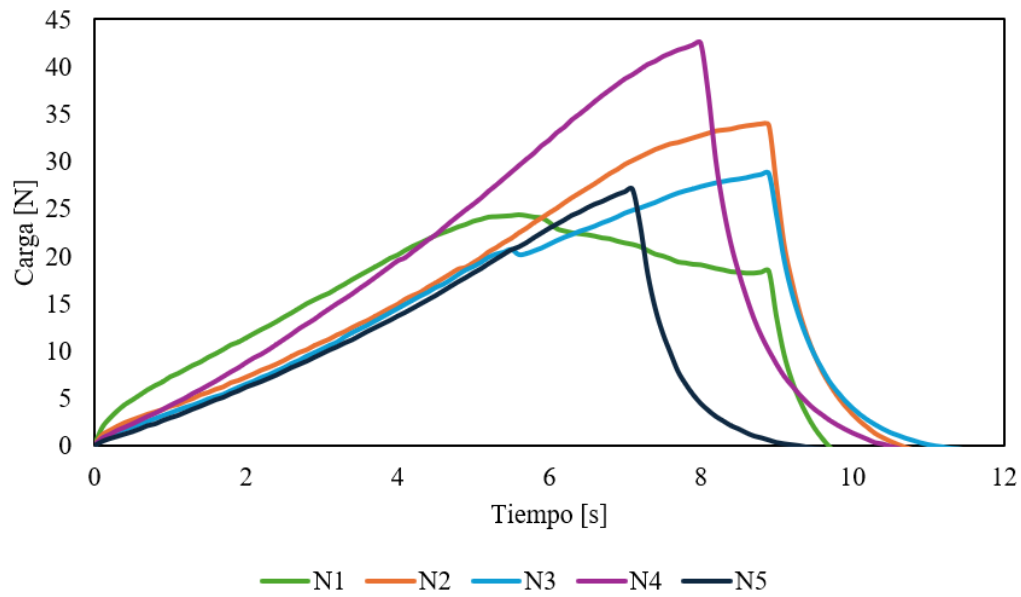


Figura 44. Test de compresión frutillas frescas.

Test de Compresión Frutillas Descongeladas

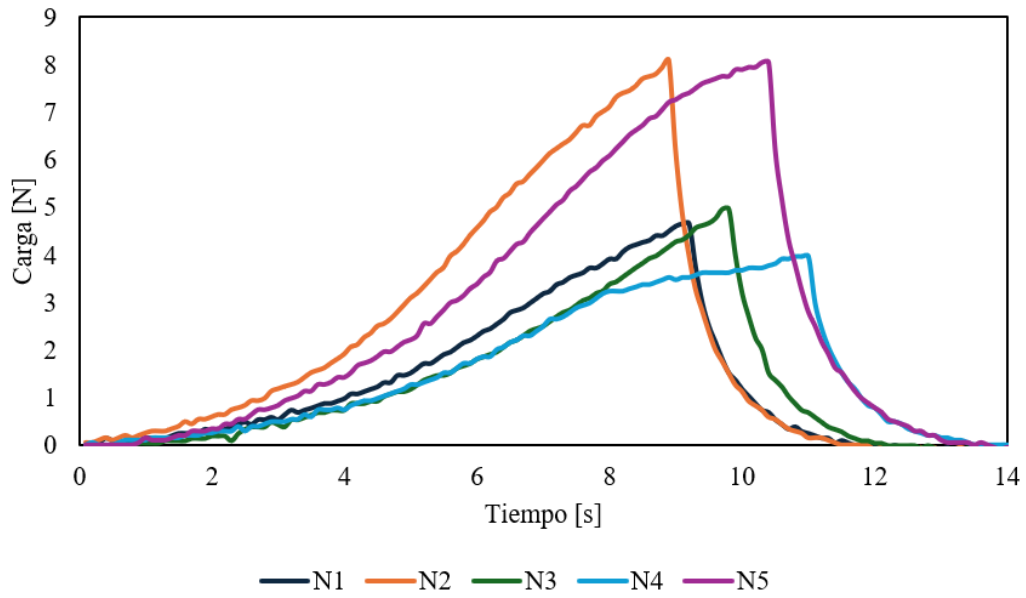


Figura 45. Test de compresión frutillas descongeladas.