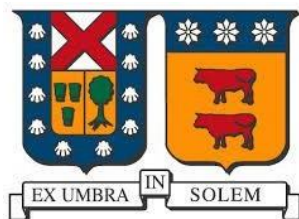


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AMBIENTAL
VALPARAÍSO – CHILE



**“EVALUACIÓN DE LOS EFECTOS DE LA TEMPERATURA EN LA
CONCENTRACIÓN DE POLIFENOLES EN PULPA DE FRUTILLA
(*FRAGARIA X ANANASSA*) DURANTE EL SECADO EN VENTANA
REFRACTIVA”**

SOFÍA JAVIERA TAPIA QUIROZ

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

**PROFESOR GUÍA:
PROFESOR CORREFERENTE**

**DR. CRISTIAN RAMÍREZ
ING. MARLÉN PINTO FERNÁNDEZ**

MARZO - 2024

Agradecimientos

Quisiera expresar mi sincero agradecimiento a todas las personas que han sido parte fundamental de esta etapa de mi vida, quienes han brindado su apoyo incondicional y han caminado a mi lado hasta llegar al final de este recorrido. De manera especial quisiera agradecer a:

Mi familia, especialmente a mis padres, Jacqueline y Leonel, quienes con amor y sacrificio permitieron que sus tres hijos llegaran a estas instancias. A mis hermanos, Sebastián y Scarlett, que me aconsejaron y me dieron fuerzas para seguir adelante cuando las cosas se ponían difíciles.

A Tomás, por ser mi punto de apoyo durante toda mi carrera universitaria, gracias por el amor y el entendimiento y por estar presente en todos los momentos, buenos y malos.

A mis amigas Analiz, Franchezca, Magdalena, María José, Marla, Sarai, Karim y a mis amigos David y Alex, por todos los maravillosos momentos compartidos. Con ustedes conocí lo que era una verdadera amistad y les estaré eternamente agradecida a todos por hacer de este proceso mucho más llevadero. Gracias por los momentos de risa y sufrimiento juntos. Les deseo lo mejor en cada paso que den.

A Francisca, por ser, junto con Analiz, la mejor compañera de departamento que he tenido. Gracias por los buenos momentos y por levantarme el ánimo este año tan desafiante.

Al equipo de laboratorio de alimentos, en especial a Jamill, que con infinita paciencia respondió a todas mis preguntas y me orientó para hacer un buen trabajo de investigación.

A mi profesor guía Cristián Ramírez, que me permitió realizar mi trabajo de memoria con él, gracias por ayudarme en este proceso y por ofrecerme soluciones cuando las cosas se complicaban. A Marlen Pinto Fernández, por aceptar ser parte de la comisión. Al proyecto Fondecyt 1230506, que hizo posible el desarrollo de esta investigación.

Y a todas las personas que de alguna forma formaron parte de este proceso. Culminar esta etapa se siente gratificante gracias a su influencia y apoyo.

Dedicatoria

A mis padres: Jacqueline y Leonel

A mis hermanos: Sebastián y Scarlett

A mi pareja, Tomás

Y a los seres más bellos de este mundo: Emma y Blanca

Resumen

Los polifenoles presentes en alimentos como la frutilla ofrecen beneficios para la salud, incluyendo la prevención de enfermedades cardiovasculares, cerebrovasculares y neurodegenerativas. Sin embargo, el proceso de deshidratación en la industria alimentaria, aunque aumenta el tiempo de conservación y evita el crecimiento microbiano, puede alterar las propiedades fisicoquímicas de los alimentos. Este estudio investiga los efectos del secado en ventana refractiva en la concentración de polifenoles en la pulpa de frutilla, determinando el tiempo de secado y evaluando el cambio de color del producto final.

Este método de secado se elige por sus ventajas: mayor eficiencia energética respecto a la convección forzada, tiempos de secado más cortos que la liofilización para una misma cantidad de producto y un costo de equipo más bajo que el de un liofilizador.

El secado de la pulpa de frutilla se realiza a 75°C, 85°C y 95°C. Se determina la humedad, la concentración de polifenoles y el color al final del secado. Además, se ajusta la curva de secado al modelo basado en la 2^{da} Ley de Fick y el Modelo Anómalo.

Partiendo de una humedad inicial de 86%, la humedad de las muestras al final del secado es de 4.36%, 5.89% y 5.99%, con un tiempo de secado de 145, 120 y 70 minutos para 75°C, 85°C y 95°C respectivamente.

A través del método Folin-Ciocalteu se obtuvo que la concentración inicial de polifenoles totales cae desde 18.99 a 8.86 mg GAE/g b.s para 75°C, 7.03 mg GAE/g b.s para 85°C y 6.73 mg GAE/g b.s para 95°C, presentando diferencias significativas con el valor inicial y siendo más altos que los 4.01 mg GAE/g b.s obtenidos en el proceso de liofilización.

Al comparar las muestras deshidratadas con la pulpa de frutilla liofilizada, se observa una menor luminosidad (L^*), así como una reducción en la tonalidad roja (a^*) y amarilla (b^*). No hay diferencias significativas entre el cambio total de color de las muestras secadas a diferentes temperaturas.

Después de ajustar los modelos a la curva de secado, se obtiene que el modelo basado en la 2^{da} Ley de Fick reveló coeficientes de difusión efectiva de $3.0 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, $4.4 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ y $4.8 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ para temperaturas de 75°C, 85°C y 95°C, respectivamente. Para el modelo anómalo, los coeficientes de difusión efectiva a esas mismas temperaturas fueron de $2.2 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, $3.2 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ y $3.8 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, respectivamente. Además, el valor de α fue en promedio de 1.33. Se determina que el modelo anómalo se ajusta mejor a los datos de la curva de secado que el modelo basado en la 2^{da} Ley de Fick. Con los datos de coeficiente de difusión efectiva fue posible obtener la energía de activación, siendo 30.16 y 26.39 kJ/molK para el modelo anómalo y el modelo basado en la 2^{da} Ley de Fick respectivamente.

En el secado en ventana refractiva, se observa que a temperaturas más altas hay una menor concentración de polifenoles en la pulpa de frutilla. Además, se determina que el aumento de la temperatura conlleva a tiempos de secado más cortos. Respecto al color de la pulpa, se concluye que la temperatura no influye en el secado en ventana refractiva, siendo crucial considerar el tiempo de exposición al ambiente para esta variable.

Abstract

Polyphenols present in foods such as strawberries offer health benefits, including the prevention of cardiovascular, cerebrovascular and neurodegenerative diseases. However, the dehydration process in the food industry, while increasing shelf life and preventing microbial growth, can alter the physicochemical properties of foods. This study investigates the effects of refractive window drying on the concentration of polyphenols in strawberry pulp, determining the drying time and evaluating the colour change of the final product.

This drying method is chosen for its advantages: higher energy efficiency compared to forced convection, shorter drying times than freeze-drying for the same amount of product and a lower equipment cost than a freeze-dryer.

Drying of strawberry pulp is carried out at 75°C, 85°C and 95°C. Moisture, polyphenol concentration and colour are determined at the end of drying. Furthermore, the drying curve is fitted to the model based on Fick's 2nd Law and the Anomalous Model.

Starting from an initial moisture content of 86%, the moisture content of the samples at the end of drying is 4.36%, 5.89% and 5.99%, with a drying time of 145, 120 and 70 minutes for 75°C, 85°C and 95°C respectively.

Through the Folin-Ciocalteu method, it was obtained that the initial concentration of total polyphenols falls from 18.99 to 8.86 mg GAE/g b.s for 75°C, 7.03 mg GAE/g b.s for 85°C and 6.73 mg GAE/g b.s for 95°C, presenting significant differences with the initial value and being higher than the 4.01 mg GAE/g b.s obtained in the freeze-drying process.

When comparing the dehydrated samples with the freeze-dried strawberry pulp, a lower lightness (L^*) is observed, as well as a reduction in the red (a^*) and yellow (b^*) hue. There is no significant difference between the total colour change of the samples dried at different temperatures.

After fitting the models to the drying curve, it is obtained that the model based on Fick's 2nd Law revealed effective diffusion coefficients of $3.0 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, $4.4 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ and $4.8 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ for temperatures of 75°C, 85°C and 95°C, respectively. For the anomalous model, the effective diffusion coefficients at the same temperatures were $2.2 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, $3.2 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ and $3.8 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, respectively. In addition, the value of α was on average 1.33. It is determined that the anomalous model fits the drying curve data better than the model based on Fick's 2nd Law. With the effective diffusion coefficient data it was possible to obtain the activation energy, being 30.16 and 26.39 kJ/molK for the anomalous model and the model based on Fick's 2nd Law respectively.

In the refractive window drying, it is observed that at higher temperatures there is a lower concentration of polyphenols in the strawberry pulp. In addition, it is determined that the increase in temperature leads to shorter drying times. Regarding pulp colour, it is concluded that temperature does not influence refractive window drying, being crucial to consider the exposure time to the environment for this variable.

ÍNDICE

Resumen.....	5
Capítulo 1.....	11
1. Introducción.....	11
1.1. Objetivos y alcances	12
1.1.1. Objetivo General.....	12
1.1.2. Objetivos específicos	12
Capítulo 2.....	13
2. Antecedentes generales	13
2.1. Frutilla.....	13
2.1.1. Características de la especie	13
2.1.2. Maduración y composición	13
2.1.3. Métodos de conservación.....	14
2.2. Mercado de la frutilla.....	15
2.2.1. Producción a nivel mundial.....	15
2.2.2. Producción a nivel nacional	16
2.3. Compuestos fenólicos.....	17
2.3.1. Tipos de polifenoles	17
2.3.2. Efectos beneficiosos para la salud.....	18
2.4. Deshidratación de alimentos.....	19
2.4.1. Secado.....	19
2.4.2. Tipos de secadores	21
2.4.2.4. Técnica de ventana refractiva	22
2.4.3. Difusión de Agua.....	23
Capítulo 3.....	26
3. Metodología.....	26
3.1. Obtención y caracterización de materia prima.....	26
3.2. Determinación de polifenoles totales	27
3.3. Determinación de curva de secado y actividad de agua con ventana refractiva.....	28
3.4. Obtención de humedad luego del secado.....	28
3.5. Modelación matemática de las curvas de secado.....	28
3.6. Medición de color	29
3.7. Comparación con el método de liofilizado	31

3.8.	Perfil de temperatura	31
3.9.	Análisis estadístico	32
Capítulo 4		33
4.1.	Resultados.....	33
4.1.1.	Caracterización materia prima	33
4.1.2.	Actividad de agua.....	33
4.1.3.	Curvas de humedad	34
4.1.4.	Energía de Activación	38
4.1.5.	Contenido de polifenoles totales en muestras deshidratadas.....	39
4.1.6.	Medición de color en muestras deshidratadas.....	41
4.1.7.	Perfil de temperatura.....	43
Capítulo 5		46
5.1.	Conclusiones y recomendaciones.....	46
Anexo.....		52
Anexo 1: Actividad de agua.....		52
Anexo 2: Curva de humedad		53
Anexo 3: Datos experimentales para curva de humedad		54
Anexo 4: Curva de calibración.....		57
Anexo 5: Cálculo concentración polifenoles		58

Índice de figuras

Figura 1. Fragaria x ananassa.....	13
Figura 2. Maduración frutilla (Muñoz & Naranjo, 2012).....	14
Figura 3. Gráfica de producción de frutilla entre los años 2016-2021 (Elaboración propia).	15
Figura 4. Principales productores mundiales de frutilla.....	16
Figura 5. Producción nacional de frutillas.....	16
Figura 6. Microestructura de una frutilla secada con tres métodos de secado. FD: Liofilización; AD: Secado por aire caliente; RWD: Ventana refractiva. Obtenido de (Nemzer et al., 2018)	20
Figura 7. Esquema general de un sistema de secado con ventana refractiva. Adaptado de (Nindo & Tang, 2007)	22
Figura 8. Esquema de transferencia de calor en un sistema de secado mediante ventana refractiva. Adaptado de (Nindo & Tang, 2007)	23
Figura 9. Diagrama experimental.....	26
Figura 10. Espacio de color.....	30
Figura 11. Colorímetro (Konica Minolta, CR-400, Japón)	30
Figura 12. Muestras en liofilizador.....	31
Figura 13. Diagrama procedimiento experimental para perfil de temperatura	32
Figura 14. Ajuste modelo basado en la Segunda Ley de Fick para secado en VR a 75°C.....	34
Figura 15. Ajuste modelo basado en la Segunda Ley de Fick para secado en VR a 85°C.....	35
Figura 16. Ajuste modelo basado en la Segunda Ley de Fick para secado en VR a 95°C.....	35
Figura 17. Ajuste modelo anómalo para secado en VR a 75°C.....	36
Figura 18. Ajuste modelo anómalo para secado en VR a 85°C.....	36
Figura 19. Ajuste modelo anómalo para secado en VR a 95°C.....	37
Figura 20. Ln(Deff) vs 1/T para determinación energía de activación caso modelo basado en la Segunda Ley de Fick	38
Figura 21. Ln(Deff) vs 1/T para determinación energía de activación caso modelo anómalo ..	39
Figura 22. Polifenoles totales (mg GAE/ g bs) en muestras secadas en VR	40
Figura 23. Muestras de pulpa de frutilla a distintas temperaturas.	41
Figura 24. Perfil de Temperatura VR a 75°C.....	43
Figura 25. Perfil de Temperatura VR a 85°C.....	44
Figura 26. Perfil de Temperatura VR a 95°C.....	44
Figura 27. Actividad de agua vs tiempo a distintas temperaturas	52
Figura 28. Curva de humedad	53
Figura 29. Curva de calibración.....	57

Índice de Tablas

Tabla 1. Composición frutilla (Departamento de Agricultura de Estados Unidos, 2019).....	14
Tabla 2. Formatos de exportación de frutilla entre los años 2016-2021	17
Tabla 3. Resultados caracterización materia prima	33
Tabla 4. Resultados actividad de agua	33
Tabla 5. Coeficiente de difusión efectiva para modelo basado en segunda Ley de Fick y modelo anómalo	37
Tabla 6. Parámetros medición de color en muestras de pulpa de frutilla deshidratadas en liofilizador y en ventana refractiva.....	42
Tabla 7. Datos experimentales para curva de humedad en secado en VR a 75°C.....	54
Tabla 8. Datos experimentales para curva de humedad en secado en VR a 85°C.....	55
Tabla 9. Datos experimentales para curva de humedad en secado en VR a 95°C.....	56
Tabla 10. Resultados Absorbancia para cálculo de concentración de polifenoles	58

Capítulo 1

1. Introducción

En la industria alimentaria, actualmente hay un enfoque en desarrollar productos de alta calidad que mantengan sus propiedades organolépticas y que, al mismo tiempo, proporcionen un alto valor nutricional

La frutilla es una fruta de alta popularidad a nivel mundial debido a su color distintivo, sabor característico y aroma especial, además, es rica en vitaminas, antioxidantes y minerales. Adicionalmente, esta fruta es capaz de crecer en condiciones extremas donde la mayoría de las frutas no pueden (Sadik et al., 2023) . En Chile la frutilla se produce en el periodo de primavera verano, en los meses de septiembre a abril principalmente en las regiones Metropolitana y del Maule (ODEPA, 2022).

La frutilla (*Fragaria x Ananassa*) es rica en polifenoles, especialmente flavonoides, polifenoles ácidos, xavan-3-oles, xavanoles, elagitaninos y anticianinas. Biernacka et al., (2022) reportó 23.02 mg GAE/g de polifenoles totales en la frutilla fresca.

Los polifenoles son fitoquímicos presentes en vegetales, frutas, legumbres y distintas bebidas. Existen más de 800 polifenoles identificados y se caracterizan por su capacidad antioxidante. Varios estudios epidemiológicos muestran que el consumo de estos polifenoles ofrece mejor protección contra enfermedades crónicas como cáncer, enfermedades cardiovasculares, enfermedades cerebrovasculares, diabetes, enfermedades neurodegenerativas y envejecimiento (Ganesan & Xu, 2017).

Por otra parte, el secado en alimentos es un proceso que implica la transferencia simultánea de materia (agua) y energía (calor). Se trata de una transmisión de calor que proporciona calor latente de vaporización, necesario para eliminar el agua del alimento. Este proceso se lleva a cabo mediante una exposición prolongada a temperaturas en el rango de 50 a 90°C (Santamaría et al., 2022). Sin embargo, es importante tener en cuenta que este proceso puede provocar la degradación de nutrientes, y potencialmente disminuir la concentración de polifenoles.

El secado por ventana refractiva es una técnica de deshidratación que posibilita el secado a altas temperaturas en períodos de tiempo más cortos, lo que resulta en productos de mayor calidad (Chamorro, 2018). Esta técnica ofrece una eficiencia energética significativa, que oscila entre el 27.9% y el 47.6% en comparación con el método de convección forzada, el cual habitualmente logra entre un 30% y un 40% (Chamorro, 2018) . Además, el costo del equipo necesario para el secado por ventana refractiva es considerablemente menor en comparación con un liofilizador, siendo potencialmente la mitad del costo de este último (Nindo & Tang, 2007).

Este método consiste en colocar el producto en una membrana plástica que se encuentra en contacto con una superficie de agua a distintas temperaturas, variando entre 75 a 95°C, pero siempre inferior a la temperatura de ebullición, favoreciendo el paso de la radiación infrarroja del agua hacia el alimento por sobre la transferencia de calor por conducción o convección (Ocoro & Ayala, 2012).

Tomando en cuenta lo dicho anteriormente, la motivación del estudio es evaluar el efecto del secado en ventana refractiva en la concentración de polifenoles en la pulpa de frutilla y su dependencia con la temperatura, mediante datos tomados de laboratorio con la finalidad de determinar cuáles son las condiciones de operación necesarias para que la concentración de polifenoles durante el proceso de deshidratación por secado en ventana refractiva sea la máxima posible.

1.1. Objetivos y alcances

1.1.1. Objetivo General

Determinar experimentalmente el efecto del secado en ventana refractiva en la capacidad antioxidante y en el color en pulpa de frutilla.

1.1.2. Objetivos específicos

- Analizar el efecto de la temperatura en la concentración de polifenoles, tiempo y color en el secado de pulpa de frutilla.
- Modelar matemáticamente la curva de secado de pulpa de frutilla a través del modelo de placa plana basado en la segunda Ley de Fick y el modelo anómalo.

Capítulo 2

2. Antecedentes generales

2.1. Frutilla

2.1.1. Características de la especie

La frutilla (*Fragaria x ananassa*) que se conoce hoy en día es un híbrido de dos frutillas silvestres, *Fragaria virginiana* y *Fragaria chiloensis*. Aunque las especies silvestres son originarias de América, el híbrido de estas fue desarrollado en Europa (Hernández-Martínez et al., 2023).



Figura 1. *Fragaria x ananassa*

La frutilla es un tipo de fruto rojo de la familia Rosaceae que crece en las zonas de clima templado y clima sub-tropical. Es una fruta atractiva y sabrosa con un alto valor nutricional, por lo que se vende en mercados de alimentos frescos o como materia prima para la industria alimentaria (Salentijn et al., 2003).

Sus beneficios son un alto valor nutricional como, por ejemplo, un alto contenido de vitamina C y antioxidantes. Estos últimos, en especial el polifenol ácido egálico, proporcionan propiedades antiinflamatorias, anticancerígenas, antidegenerativas y antimicrobianas. También es rico en otras vitaminas y minerales como el potasio, hierro, fósforo y calcio. Además, cuenta con flavonoides, que son pigmentos naturales que se encuentran tanto en frutas como en vegetales y que tienen como función proteger el organismo de agentes oxidantes (Katel et al., 2022).

2.1.2. Maduración y composición

El tiempo de maduración de la frutilla varía entre los 20 y 60 días dependiendo de la temperatura. Este proceso involucra cambios en el color, tamaño, sabor y textura. Estas características pueden conservarse por un tiempo reducido (Borja, 2010).

El cambio de color de la frutilla es fundamental para el proceso de cosecha. El fruto cambia de un color verde a un rojo, a medida que ocurre la maduración, como se observa en la figura 2. Otro factor que sufre cambios en el proceso es la relación de sólido solubles totales (SST),

utilizando como criterio de madurez un 75% azúcares, lo cual determina el sabor del fruto (Dadet, 2018).

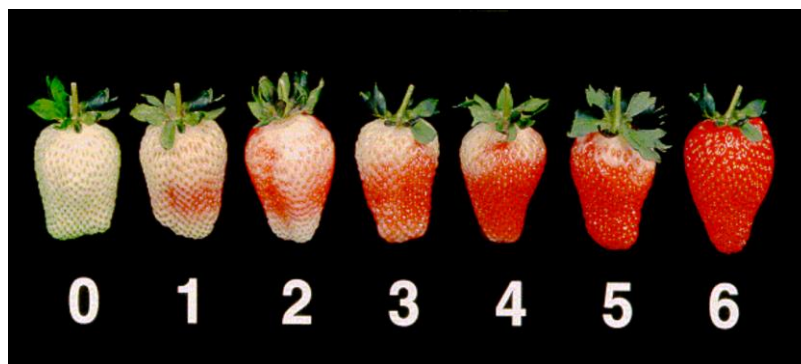


Figura 2. Maduración frutilla (Muñoz & Naranjo, 2012)

En cuanto a la composición de la frutilla madura se tiene que está compuesta en más del 90% por agua y alrededor de un 5% por hidratos de carbono, específicamente, sucralosa, galactosa y fructosa. Además, es posible encontrar minerales, entre los que destacan el calcio, hierro, magnesio, fósforo y potasio. También contiene altos contenido de vitamina C, vitamina B6, antocianinas y polifenoles que le entregan una alta capacidad antioxidante. En la tabla 1 es posible ver en detalle la composición de 100 g de frutilla.

Tabla 1. Composición frutilla (Departamento de Agricultura de Estados Unidos, 2019)

Atributo	Contenido en 100 g b.h	Unidades
Agua	91,00	g
Calorías	32,00	kcal
Carbohidratos	7,68	g
Azúcares totales	4,89	g
Proteínas	0,67	g
Fibra	2,00	g
Calcio	16,00	mg
Fósforo	24,00	mg
Potasio	153,00	mg
Magnesio	13,00	mg
Hierro	0,41	mg
Vitamina C	58,80	mg
Vitamina B6	0,05	mg

2.1.3. Métodos de conservación

La frutilla es una fruta altamente perecible, lo que implica que sus cualidades organolépticas se mantienen en su punto óptimo por un corto periodo de tiempo (Galletto et al., 2010). Asimismo, enfrenta amenazas de microorganismos, como el *Botrytis cinérea*, responsable el moho gris que puede dañar al fruto tanto en el campo como en el periodo posterior a la cosecha. Además, la antracnosis generada por *Collectotrichum*, es otra enfermedad de importancia, manifestándose

en manchas circulares y firmes (Contigiani, 2019). Por estas razones, cobra relevancia un buen método de conservación que garantice la inocuidad del alimento por un periodo de tiempo prolongado.

Si bien la congelación es un método eficiente porque transforma el agua líquida en cristales de hielo, lo que reduce la actividad microbiana y enzimática, tanto frutas como vegetales pueden presentar degradación en su textura, colapso estructural y pérdida por goteo (Galletto et al., 2010).

Otro método de conservación es la deshidratación que no solo extiende la vida útil de la frutilla, sino que también hace posible la fabricación de nuevos productos (Kowalska et al., 2018). Este método consiste en remover la humedad de la frutilla para que las bacterias, levaduras o moho no puedan crecer. También reduce la velocidad de acción de las enzimas, sin embargo, no las desactiva. La deshidratación puede ser al sol, en un horno o en un deshidratador de comida utilizando la correcta combinación de temperatura cálida, baja humedad y corriente de aire (Home & Garden Information Center, 2023).

2.2. Mercado de la frutilla

2.2.1. Producción a nivel mundial

Según lo mostrado en la figura 3, la producción mundial de frutilla experimentó un alza sostenida desde el año 2016 hasta el año 2019, donde alcanzó una producción cercana a 9000 miles de toneladas. Sin embargo, durante el año 2020, la producción sufrió una disminución, posiblemente debido a los efectos de la pandemia de COVID-19 que impactó al mundo ese año. La producción de frutillas se recuperó para el año 2021 y fue el año con mayor producción de los últimos años (FAO, 2023).

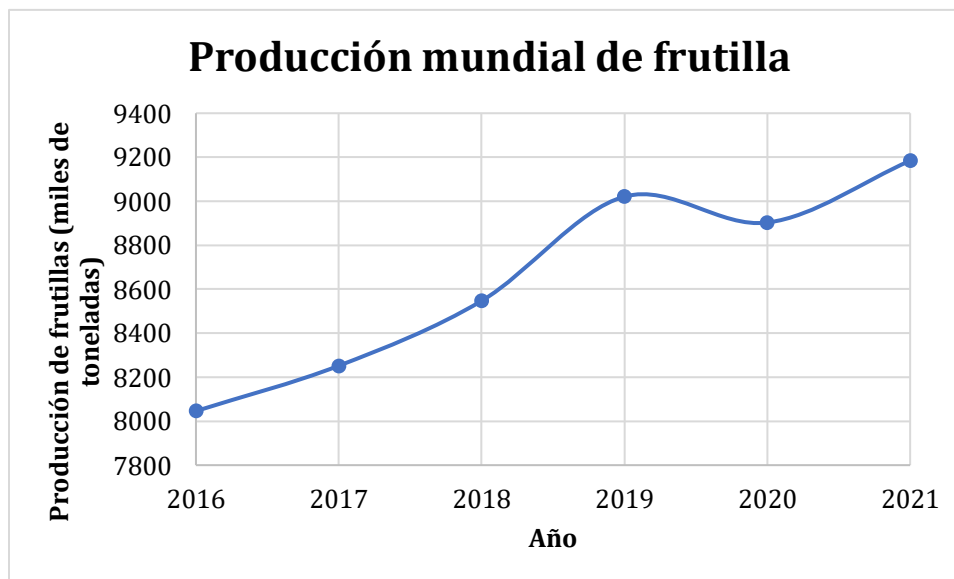


Figura 3. Gráfica de producción de frutilla entre los años 2016-2021 (Elaboración propia).

En cuanto a los principales productores mundiales, el país que más produce es China con un 37% de la producción mundial, le sigue Estados Unidos con un 13%, Turquía con un 7% y

México y Egipto con un 6% y 5% respectivamente (FAO, 2023), lo anterior es representado en la gráfica de la figura 4.

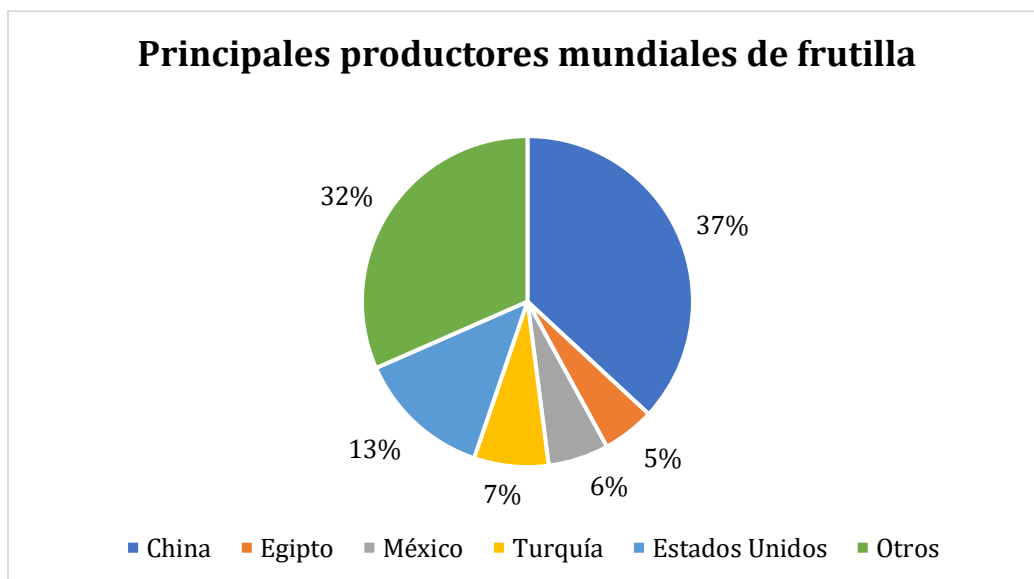


Figura 4. Principales productores mundiales de frutilla

2.2.2. Producción a nivel nacional

Respecto a la producción nacional, Chile experimentó una producción variable de frutilla desde el año 2016. La mayor producción de frutillas ocurrió el año 2010, alcanzando 28.000 toneladas. Luego, desde el año 2020, la producción sufrió una importante caída, presumiblemente debido a los efectos de la pandemia de COVID-19, y no se ha podido recuperar desde entonces, siendo el año 2021 con la menor producción de este fruto (ODEPA, 2022), según lo mostrado en la figura 5.



Figura 5. Producción nacional de frutillas

Según lo mostrado en la tabla 2 Chile exporta frutillas principalmente a Estados Unidos, Canadá, Japón, Australia y China. El principal formato de exportación es la frutilla congelada, le sigue la frutilla en conserva y deshidratada. La frutilla fresca solo se exportó en los 2017 y 2018 y no se ha vuelto a exportar desde entonces (ODEPA, 2022).

Tabla 2. Formatos de exportación de frutilla entre los años 2016-2021

Procesamiento	Unidad	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Congelados	toneladas	19279	22443	27639	41927	55492	63494
Conservas	toneladas	250	289	296	383	594	571
Deshidratados	toneladas	35	11	9	65	105	100
Fresca	toneladas	0	24	6	0	0	0
Total	toneladas	19564	22767	27950	42375	56191	64165

Es posible observar que a través de los años la frutilla deshidratada ha experimentado un notable aumento desde el año 2018, pasando de 9 a 100 toneladas en el año 2021.

2.3. Compuestos fenólicos

2.3.1. Tipos de polifenoles

Los polifenoles son fitoquímicos que se caracterizan por presentar un fenol en su estructura y variadas sustituciones de hidroxilo (Bustamante, 2021)

Se originan principalmente en las plantas, que lo sintetizan en gran cantidad mediante su metabolismo secundario. Ciertos polifenoles son indispensables para las funciones fisiológicas de los vegetales, otros son parte de los mecanismos de defensa ante situaciones de estrés y estímulos diversos (hídricos, luminosos, etc.)

La biosíntesis de los polifenoles, como parte del metabolismo secundario de las plantas, se lleva a cabo a través de dos rutas primordiales: la ruta del ácido shikímico y la ruta de los poliacetatos. La ruta del ácido shikímico facilita la síntesis de aminoácidos aromáticos (fenilalanina o tirosina), así como la producción de ácidos cinámicos y sus derivados (fenoles simples, ácidos fenólicos, cumarinas, lignanos y derivados del fenilpropano). Por otro lado, la ruta de los poliacetatos genera quinonas y xantonas (Quiñones et al., 2012).

Los polifenoles están clasificados en 4 grandes categorías basadas en el número de fenoles y elementos estructurales:

1. Flavonoides. Se divide a su vez en subgrupos como las flavonas, flavonoles, flavanonas, isoflavonas, antocianidinas, chalconas y catequinas.
2. Estilbenos
3. Lignanos
4. Fenoles ácidos

Los flavonoides son el grupo mayoritario en la naturaleza. Son compuestos de bajo peso molecular que comparten un esqueleto común difenilpirano (C6-C3-C6), compuesto de dos anillos fenilo (A y B) unidos a través de un anillo C de pirano heterocíclico (Bustamante, 2021).

Se encuentran unidos en su mayoría a un azúcar, generalmente glucosa, mediante un enlace covalente, dando lugar a un glucósido, estos se pueden encontrar como C-glucósidos con los carbohidratos ligados a través de un enlace carbono-carbono o como O-glucósidos con los carbohidratos ligados a través de un átomo de oxígeno. Los O-glucósidos son mayoritarios en la naturaleza (Quiñones et al., 2012).

Los estilbenos se sintetizan en respuesta a condiciones de estrés, como la insolación excesiva, la salinidad del suelo o enfermedades fúngicas. El estilbeno más conocido es el resveratrol que se sintetiza en condiciones de estrés (Gutiérrez, 2016).

Los lignanos son metabolitos de las plantas de bajo peso molecular formados por acoplamiento oxidativo de unidades de phidroxi fenilpropano que se unen mediante puentes de hidrógeno. El término lignano se aplica cuando el compuesto está formado mediante uniones entre ácido y/o alcohol, mientras que el término nelignano se utiliza cuando se unen las moléculas de propenilbenceno y/o alilbenceno (Martínez-Valverde et al., 2000).

Los ácidos fenólicos son metabolitos secundarios ampliamente distribuidos en el reino vegetal y se clasifican en ácidos hidroxibenzoicos y ácidos hidroxicinámicos. Su principal propiedad biológica es su capacidad antioxidante debido a que su estructura química contiene un núcleo fenólico y una cadena lateral insaturada que permite formar un radical fenoxilo. Están relacionados a la protección del ADN y los lípidos de la membrana celular contra las especies reactivas de oxígeno (Vania Urías-Orona et al., 2016).

2.3.2. Efectos beneficiosos para la salud.

Los polifenoles tienen múltiples efectos beneficiosos sobre la salud de las personas puesto que son los principales antioxidantes de la dieta, dado que su ingesta es 10 veces superior a la de la vitamina C, y 100 veces superior a la de la vitamina E o los carotenoides (Quiñones et al., 2012).

Los polifenoles pueden llegar a prevenir la aparición de la diabetes tipo 2, dado que ayudan a bajar los niveles de azúcar en la sangre impidiendo la descomposición del almidón en azúcares simples, reduciendo la posibilidad de que se originen altos niveles de azúcar en la sangre después de las comidas. También pueden ayudar a la secreción de insulina, que es la hormona que ayuda a mantener los niveles de azúcar estables en la sangre (Kim et al., 2016).

Estos compuestos también pueden ayudar a reducir el riesgo de enfermedades cardíacas debido a sus propiedades antiinflamatorias. Muchas enfermedades crónicas se desencadenan por la inflamación ocasionada por el estrés oxidativo. Los polifenoles inhiben las vías de señalización molecular activadas por estrés oxidativo e inhiben las enzimas involucradas en la producción de eicosanoides (Hussain et al., 2016). Además, podrían aportar en reducir la presión arterial y el colesterol LDL (Lipoproteína de baja densidad), así como también podría ayudar a aumentar los niveles del colesterol HDL (Lipoproteína de alta densidad) (Cheng et al., 2017).

Otro de los efectos beneficiosos es que podrían ayudar a reducir los coágulos en sangre producidas por exceso de agregación plaquetaria y que podrían llevar a trombosis, accidentes cerebrovasculares y embolia pulmonar (Bijak et al., 2016).

Los polifenoles también pueden ayudar a promover una sana digestión. Pruebas recientes indican que estos compuestos pueden ayudar a los probióticos a sobrevivir en el sistema digestivo. Los probióticos son bacterias beneficiosas presentes en alimentos fermentados y se pueden consumir en forma de suplemento (de Souza et al., 2019).

Krikorian et al., (2010) reportó que beber jugo de uva, el cual es naturalmente rico en polifenoles ayudó a personas mayores con deterioro mental a mejorar significativamente su memoria, mientras que Francis et al., (2006) informó que los flavanoles del cacao podrían mejorar el flujo sanguíneo al cerebro, relacionando estos tipos de polifenoles con la mejora de la memoria en el trabajo y la concentración.

2.4. Deshidratación de alimentos

2.4.1. Secado

El mecanismo de secado se define como la remoción de humedad parcial o completa de un producto mediante la transferencia de masa interna y por transferencia de calor. Esto sucede bajo ciertas condiciones como son la temperatura, humedad y progresión de secado que son controlados por medio de la aplicación de corrientes de aire sobre el cuerpo o por otros métodos.

La deshidratación del alimento se utiliza para preservar el alimento por más tiempo, esto se debe a que la actividad de agua llega a un nivel donde no ocurre actividad microbológica. La actividad del agua (a_w) se mide como la humedad relativa en el equilibrio, cuando la atmosfera está en contacto con un producto. También se define como la razón entre la presión parcial de agua en el alimento y la presión de vapor de agua pura a la misma temperatura (Toledo, 2007).

A modo general, la deshidratación de un alimento consta de la transferencia de masa en donde el agua presente en el alimento se evapora y se convierte en vapor de agua desplazándose desde el interior del alimento hacia la superficie, donde luego se evapora en el medio circundante. Este transporte de masa puede ocurrir por difusión.

Para que esto suceda se necesita suministrar calor al alimento para aumentar su temperatura y para que así el agua se vaporice. La transferencia de calor puede ocurrir por conducción, convección y por radiación.

Durante el secado el alimento puede sufrir cambios, entre los principales se encuentran el encogimiento (shrinkage), cambios en la textura (endurecimiento o hardness) y cambios en el color (browning), debido al pardeamiento enzimático y caramelización.

El encogimiento es un fenómeno que puede ser observado cuando se remueve la humedad del alimento ya que se produce cuando la matriz viscoelástica se contrae en el espacio que antes ocupaba el agua (Aguilera, 2005). Este fenómeno puede ocasionar eventualmente un colapso en la microestructura y afectar la densidad y porosidad del alimento. La microestructura juega un rol importante en las propiedades de transporte calidad y estabilidad de los productos procesados (Ngamwonglumlert & Devahastin, 2017). Además, se ha determinado que la textura de frutas y vegetales puede verse afectada durante el encogimiento debido a la ruptura de la membrana celular y la pérdida de presión de turgencia (Aguilera, 2005).

El encogimiento de los alimentos puede ser de dos tipos los cuales son: encogimiento uniforme en todas las dimensiones geométricas (encogimiento isotrópico) y el encogimiento no uniforme en todas las dimensiones geométricas (encogimiento anisotrópico). El encogimiento isotrópico se conseguirá cuando la remoción de humedad es uniforme en todo el alimento o el gradiente de humedad sea bajo y cuando el secado es lento, en cambio, cuando el gradiente de humedad es alto y el secado es rápido se obtiene un encogimiento anisotrópico (Ngamwonglumlert & Devahastin, 2017).

Lo anterior también depende del tipo de alimento, por ejemplo, en el caso de frutas y vegetales se observa un encogimiento isotrópico, en cambio, el encogimiento anisotrópico se observa en alimentos de origen animal, como el pescado o los mariscos (Ngamwonglumlert & Devahastin, 2017).

Existe la teoría de transición vítrea que puede explicar el encogimiento y el colapso de la microestructura durante el proceso de secado (Aguilera, 2005). Esta teoría dice que, si el secado se lleva a cabo de tal forma que la temperatura de secado de material está por debajo de la temperatura de transición vítrea, entonces el colapso de la microestructura se minimiza. Por otro lado, si la temperatura de secado del material es mayor a la temperatura de transición vítrea entonces es esperable que ocurra el encogimiento. De todos modos, esta teoría no puede ser aplicada en todos los casos de secado, ya que no toma en cuenta la formación de corteza o la acumulación de presión interna que pueden ocurrir durante el proceso (Ngamwonglumlert & Devahastin, 2017). En la figura 6 es posible apreciar como se ve afectada la microestructura de la frutilla luego de pasar por distintos métodos de secado.

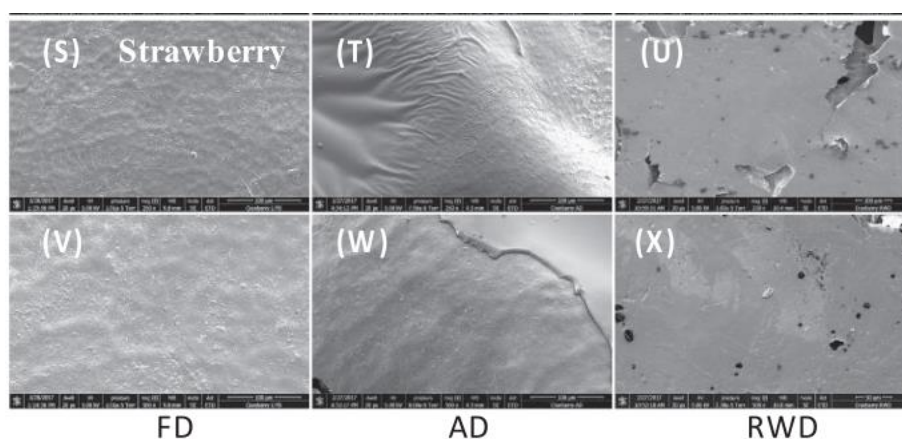


Figura 6. Microestructura de una frutilla secada con tres métodos de secado. FD: Liofilización; AD: Secado por aire caliente; RWD: Ventana refractiva. Obtenido de (Nemzer et al., 2018)

Al estudiar el endurecimiento durante el proceso de secado en algunos alimentos es posible observar dos etapas. Al comienzo del secado ocurre la etapa de reblandecimiento (softening stage), donde el endurecimiento decrece al aumentar la temperatura de secado, esto se debe a que la pérdida de agua es complementada con pérdida de presión interna donde el tejido celular se encoge y eventualmente se vuelve suave. Después de esta etapa, los alimentos alcanzan el tiempo de transición donde el endurecimiento aumenta drásticamente hasta alcanzar el tiempo final de secado. Esto se puede deber a la pérdida de agua y a la exclusión de componentes de soluto como el almidón o el azúcar, que surgen durante el secado pueden causar rigidez, daño y

ruptura de las paredes celulares, llegando incluso al colapso de los tejidos celulares (Moon et al., 2015).

El cambio en el color como el pardeamiento durante el proceso de secado se debe a varios mecanismos complejos de degradación, como el pardeamiento enzimático (actividad polifenoloxidasas) y pardeamiento no enzimático (reacción de Millard, oxidación de ácido ascórbico, degradación de carotenoide y de clorofila, y caramelización). El pardeamiento enzimático es causado por una oxidación enzimática inicial de fenoles en o-quinonas ligeramente coloreadas que posteriormente se polimerizan y conduce a una pigmentación marrón (Lee & Boonsupthip, 2014).

El pardeamiento no enzimático está clasificado en tres etapas consecutivas: inducción (BIP), propagación y estabilización (Lee & Boonsupthip, 2014).

Existen inhibidores de pardeamiento y agentes anti-pardeamiento, entre ellos se encuentran los sulfitos que son efectivos y utilizados ampliamente, pero temas de seguridad no permiten su uso en los alimentos. Un inhibidor del pardeamiento enzimático en frutas y vegetales es la ciclodextrina que son oligómeros cíclicos de glucosa (Lee & Boonsupthip, 2014).

2.4.2. Tipos de secadores

2.4.2.1. Secadores directos

También conocidos como secadores por convención, pueden ser continuos o intermitentes. Se caracterizan por utilizar gases calientes para proporcionar calor en contacto directo con el alimento para arrastrar el líquido vaporizado. Al calentar el alimento por convección, el calor penetra la superficie hacia el interior, mientras que la humedad debe salir a través de ella, por lo que el gradiente de humedad es contrario al gradiente de la temperatura, siendo este último la fuerza impulsora para el calentamiento. En el caso de la transferencia de materia, la fuerza impulsora es el gradiente de concentración de agua existente en el interior y en la superficie del alimento.

Esta técnica es un proceso lento y los mecanismos de transferencia de calor y de materia del proceso dependerán de variables inherentes al aire de secado (temperatura, humedad, características del flujo, velocidad másica, etc.) y al alimento (humedad, forma, estructura, etc.).

Ejemplos de secadores directos son: secadores de horno, secadores de bandeja, secadores de túnel, secadores rotatorios, secadores de cinta transportadora, secadores de lecho fluidizado, secadores por arrastre neumático y secadores por atomización (Japa, 2022).

2.4.2.2. Secadores indirectos

También llamados secadores por conducción son ideales para deshidratar alimentos con compuestos termolábiles ya que la deshidratación se lleva a cabo en atmósferas inertes y presiones reducidas. La transferencia de calor hacia el alimento se realiza por medio de una pared cuyo material, por lo general, es de metal (Japa, 2022).

Ejemplos de secadores indirectos son: secadores en bandeja al vacío, liofilizadores, secadores de rodillo, secadores de tornillo sin fin.

2.4.2.3. Secadores por radiación

Su mecanismo es a través de transferencia de energía radiante, que puede ser generada por energía infrarroja, solar o por microondas. Es el tipo de secador más seleccionado porque la energía radiante es absorbida directamente por el alimento, mientras que la temperatura se distribuye uniformemente, de esta forma, el secado ocurre a una menor velocidad y la textura del alimento sufre el menor daño posible. Sin embargo, su costo de energía necesaria para los equipos puede alcanzar un valor de hasta cuatro veces más que el costo de combustible de los secadores directos e indirectos (Fito et al., 2016).

2.4.2.4. Técnica de ventana refractiva

En la técnica de ventana refractiva utiliza agua caliente por debajo del punto de ebullición y a presión atmosférica. El agua caliente circulante transfiere su energía térmica hacia el alimento a través de una interfaz plástica que es relativamente transparente a la radiación infrarroja. De esta forma, el producto que se extiende por la banda plástica está en contacto con el agua caliente por medio de su superficie inferior (Leiton, 2012). En la figura 7 se muestra un esquema que representa el sistema de secado por ventana refractiva.

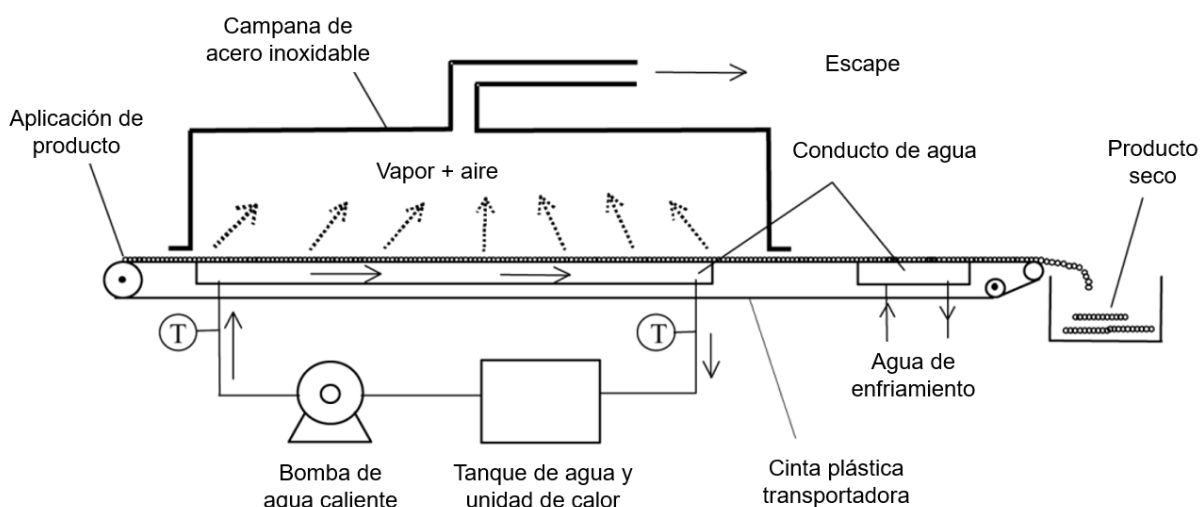


Figura 7. Esquema general de un sistema de secado con ventana refractiva. Adaptado de (Nindo & Tang, 2007)

Durante el secado por ventana refractiva se presentan los tres tipos de transferencia de calor, las cuales son conducción, convección y radiación. El agua caliente transfiere la energía térmica a la banda plástica delgada en la que la transmisión infrarroja a una longitud infrarroja se empareja al espectro de absorción para el agua, haciendo que el secado sea más fácil. Es importante que la banda plástica sea delgada para disminuir la resistencia a la transferencia de calor. Como la banda es delgada, su temperatura aumenta casi inmediatamente a causa del agua que circula por debajo. La transferencia de calor desde el agua hacia la banda plástica es por conducción y radiación y es más fuerte cuando están ambos en íntimo contacto por uno de los lados, mientras que se tiene un alimento con alta humedad por el otro. Esto se debe a que cuando un producto con alto contenido de humedad se extiende por la banda plástica, se minimiza la refracción en la interfaz producto-plástico.

La transferencia de calor desde el alimento al medio ambiente ocurre principalmente por convección y por evaporación del agua que se encuentra dentro del producto. Al inicio del proceso, la evaporación en esta etapa es muy intensa y constituye el mayor consumo de energía durante el secado por esta técnica. Para el final del proceso, cuando el alimento ya se encuentra casi seco, predomina la transferencia de calor por conducción y la tasa de transferencia es más lenta a medida que el alimento se seca (Nindo & Tang, 2007).

En la figura 8 se esquematiza el mecanismo de transferencia de calor en un sistema de secado por ventana refractiva.

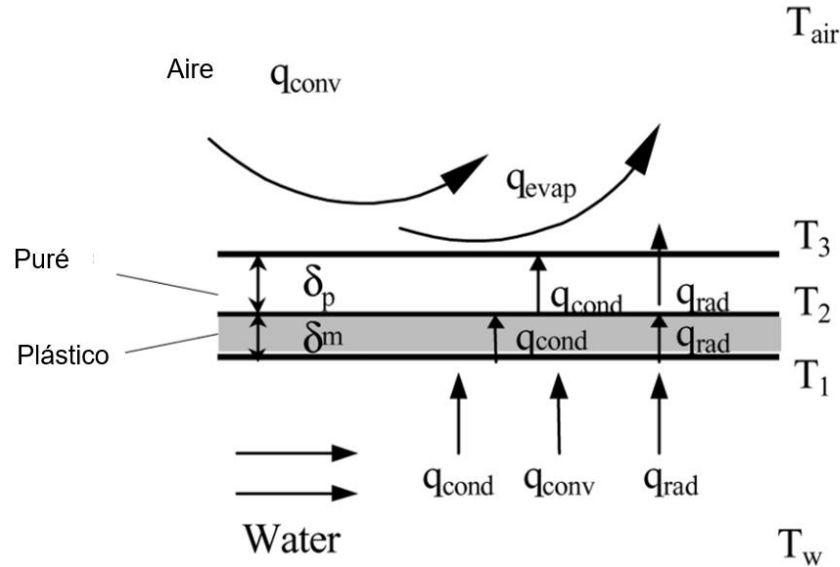


Figura 8. Esquema de transferencia de calor en un sistema de secado mediante ventana refractiva. Adaptado de (Nindo & Tang, 2007)

2.4.3. Difusión de Agua

Para el proceso de secado es posible representar la transferencia de masa del agua del alimento a través de una curva de secado. Para poder predecir de mejor manera cómo difunde el agua a través del alimento es que se opta por comparar el modelo basado en la Segunda Ley de Fick y el modelo fraccional anómalo y así decidir cuál se ajusta mejor a la curva de secado de la pulpa de frutilla deshidratada en ventana refractiva.

2.4.3.1. Modelo basado en la segunda Ley de Fick

El principal mecanismo de transferencia de masa durante el secado es a través de la difusión de agua en sólidos de estructura fina y en capilares, pequeños agujeros y poros llenos de vapor de agua. El vapor de agua difunde hacia la superficie, donde pasa a la corriente de aire global. La segunda Ley de Fick aplicada es (Crank, 1979):

$$\frac{\partial Y}{\partial t} = D_{eff} \frac{\partial^2 Y}{\partial x^2} \quad (1)$$

Donde Y es la humedad contenida en el producto, t es el tiempo, x es la dimensión en la dirección de la transferencia y D_{eff} es el coeficiente de difusión. La solución para una placa plana es:

$$MR_t = \frac{Y - Y_e}{Y_0 - Y_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{(2i-1)^2} e^{\frac{-(2i-1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{4L^2}} \quad (2)$$

En esta ecuación MR es la tasa de humedad, Y_e es la humedad en el equilibrio, Y_0 es la humedad en tiempo cero y L es el espesor del alimento, cuando hay difusión por una cara, o al semi-espesor, cuando hay difusión por ambas caras.

Existe una versión simplificada de esta solución:

$$MR_t = \frac{8}{\pi^2} e^{\frac{-\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}} \quad (3)$$

Sin embargo, solo sirve para tiempo largo, es decir, MR menores a 0,6.

Para ocupar este modelo se deben asumir ciertos supuestos que, en su mayoría, no se cumplen dentro en el proceso del secado del alimento. Estos supuestos son:

- No hay encogimiento del alimento durante el secado.
- El coeficiente de difusión es constante y no depende del contenido de agua en el alimento.
- El agua se encuentra homogéneamente distribuida en el alimento.
- El mecanismo de transferencia de masa es de naturaleza difusional.
- La resistencia externa a la transferencia de masa es despreciable en comparación a la resistencia interna.

2.4.3.2. Modelo anómalo.

El modelo anómalo agrega un término adicional a la expresión ya conocida del modelo basado en la segunda Ley de Fick (Simpson et al., 2013). La definición de la difusión anómala es la siguiente:

$$\frac{\partial^\alpha W}{\partial t^\alpha} = D_{eff} \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \quad (4)$$

La resolución de esta ecuación para una placa plana es:

$$MR = \frac{Y - Y_e}{Y_0 - Y_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{(2i-1)^2} E_\alpha \left(-D_{eff} \left(\frac{(2i-1)\pi}{2L} \right)^2 t^\alpha \right) \quad (5)$$

Donde E_α hace referencia a la función de Mittag-Leffer.

Cuando se usa solo un término de la sumatoria, la función de Mittag-Leffer tiende a la exponencial, de esta forma, es posible llegar a una forma simplificada que, al igual que sucede con el modelo basado en la segunda ley de Fick, solo sirve para tiempo largo, o sea, MR menor a 0,6.

$$MR_t = \frac{8}{\pi^2} e^{\frac{-\pi^2 D_{eff} t^\alpha}{4L^2}} \quad (6)$$

El término de α tendrá distinto significado dependiendo de su valor:

- Si α es menor a 1, el proceso es sub-difusivo, es decir, las moléculas de agua tardan más tiempo en recorrer una distancia x , puesto que dan saltos más cortos a través de la matriz.
- Si α es mayor a 1, el proceso es super-difusivo, es decir, las moléculas de agua tardan menos tiempo en recorrer una distancia x , puesto que dan saltos más largos a través de la matriz.
- Si α es igual a 1, el proceso ocurre de la misma manera que lo describe la segunda ley de Fick, donde algunas moléculas de agua se detienen, mientras otras avanzan a través de la matriz.

2.4.3.3. Ecuación de Arrhenius

Cuando el coeficiente de difusión (D_{eff}) se considera constante se espera que siga un comportamiento tipo Arrhenius (Virgen-Navarro et al., 2016)

$$D_{eff} = D_0 e^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (7)$$

Donde D_0 es un factor pre-exponencial de la ecuación de Arrhenius (m^2/s), E_a es la energía de activación (kJ/mol), R es la constante universal de los gases (kJ/mol K) y T es la temperatura. Cuando la temperatura del aire tiende a infinito la difusividad se acerca al factor pre-exponencial.

Al linealizar la expresión de la ecuación 8, es posible evaluar D_{eff} bajo otras condiciones de temperatura de secado.

Capítulo 3

3. Metodología

Se realizaron secados en ventana refractiva a tres distintas temperaturas: 75°C, 85°C y 95°C. En la figura 9 se muestra un diagrama de la metodología general de la investigación, separándolo entre antes, durante y después del secado.

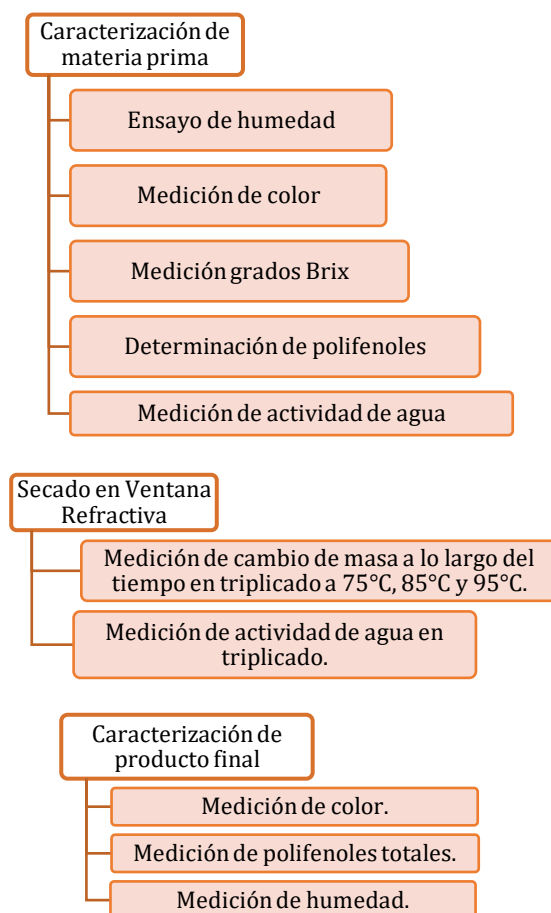


Figura 9. Diagrama experimental

3.1. Obtención y caracterización de materia prima

La materia prima utilizada fue pulpa de frutilla congelada, la cual fue adquirida en un mercado local en la ciudad de Valparaíso, Chile. Una vez adquirida, fue trasladada al laboratorio y almacenada a 3°C. Luego, fue utilizada para realizar su caracterización que consistió en un ensayo de humedad donde se pesaron en una balanza (Sartorius, Practum224-1S, Alemania) 5 g de pulpa en duplicado que fueron dispuestos en un desecador llevado al vacío a <100 mmHg mediante una bomba (Dosivav, DVP-1A, Argentina). El desecador fue llevado a una estufa a 60°C. Las muestras son pesadas cada 24 horas por 3 días o hasta que el cambio en su peso sea despreciable. La humedad de la muestra se obtiene mediante:

$$H = \frac{(m_2 - m_3)}{(m_2 - m_1)} \quad (8)$$

Donde:

m1: Peso placa Petri

m2: Peso placa Petri con muestra

m3: Peso placa Petri con muestra luego del secado en estufa

3.2. Determinación de polifenoles totales

Para la medición de polifenoles totales se utilizó el método de Folin-Ciocalteu

1. Curva de calibración

Para la curva de calibración se utilizó ácido gálico, con el cual se preparó una muestra patrón de 1 g/L + metanol al 80%. Luego, en 6 matraces de 10 ml envueltos previamente en aluminio se prepararon mezclas con concentración de 1.2; 1; 0.8; 0.6; 0.4 y 0.2 ml de la muestra patrón y se aforó con metanol al 80%.

Posteriormente 0.5 mL de cada muestra es llevada a un tubo de ensayo respectivo envuelto en aluminio donde se añaden 3.75 ml de agua destilada, 0.25 mL de reactivo Folin-Ciocalteu al 50% v/v con agua destilada y 0.5 ml de Na₂CO₃ al 10%. También, se debe preparar una muestra en blanco, para ello se reemplaza los 0.5 mL de muestra por 0.5 mL de metanol al 80%.

2. Preparación del extracto

Se pesaron 2 g de pulpa de frutilla y se mezclaron con un 20 mL de metanol al 80% en un frasco con rosca envuelto previamente en aluminio. La mezcla se agita y se deja en oscuridad por 1 día.

3. Método de Folin- Ciocalteu

La solución de pulpa de frutilla se filtró en un frasco envuelto en aluminio. El sólido se desecha y 1 mL de la fase líquida se traspasó a un matraz de 10 mL y se aforó con metanol al 80%, a esto se le denominará extracto.

Luego, se traspasan 0.5 mL de extracto a un tubo de ensayo y se mezcla con 0,25 mL de reactivo Folin-Ciocalteu al 50% v/v, 0.5 mL de Na₂CO₃ y 3.75 mL de agua destilada. El tubo de ensayo que fue previamente envuelto en aluminio se dejó en un lugar oscuro por 1 hora. Este procedimiento fue realizado en triplicado. Además, se preparó una muestra en blanco.

Transcurrido ese tiempo, se ajustó el espectrómetro a una longitud de onda de 765 nm y se transfirió la muestra en blanco a la cubeta con la finalidad de calibrar el equipo. Una vez calibrado, se transfirió la muestra del tubo de ensayo a otra cubeta y se midió la absorbancia.

Estos resultados se comparan con lo obtenido en la medición de color para frutilla liofilizada a 20°C y 0.63 mbar por 24 horas (Biernacka et al., 2022).

3.3. Determinación de curva de secado y actividad de agua con ventana refractiva.

Para el secado con ventana refractiva se utilizó un baño termorregulado con una capacidad de 60 L (MERMMERT, modelo WNB22, Alemania). Las temperaturas de secado utilizadas fueron 75°C, 85°C y 95°C. Una lámina de filme plástico (MYLAR™, tereftalato de polietileno) se puso en contacto directo con el agua del baño termorregulado. Las muestras de pulpa de fruta fueron dispuestas sobre el MYLAR™, siendo removidas cada 5 minutos para medir su peso con una precisión de 0,0001 g usando una balanza digital (Sartorius, Practum224-1S, Alemania). Este procedimiento se realizó en triplicado para cada temperatura utilizada en el secador.

La actividad de agua se midió con un higrómetro (Rotronic, HP23-AW-A, EE.UU). Se dejó secar las muestras en la ventana refractiva, luego, cada 5 minutos se sacó muestra de pulpa con una espátula y se registró la actividad de agua con el higrómetro hasta que fuera menor a 0.4 dado que bajo ese valor se evita el crecimiento microbiano. Esto se realizó en duplicado ($n=2$) para cada temperatura utilizada en el secador.

3.4. Obtención de humedad luego del secado

Una vez secadas las muestras de pulpa de frutilla, se realizó un ensayo de humedad pesando 5 g de muestras para cada temperatura en triplicado, luego en placas Petri, las muestras secas son dispuestas en un desecador al vacío, el cual se dispone en una estufa a 60°C por 3 días. Las humedades obtenidas en estos ensayos son las utilizadas para la determinación de polifenoles totales.

3.5. Modelación matemática de las curvas de secado

Para la curva de secado se compararon dos modelos matemáticos. El primero es modelo de la Segunda Ley de Fick, para el cual se realizaron los siguientes supuestos: a) la muestra se considera una placa plana, b) la temperatura ambiente es constante, c) el coeficiente de difusión es constante, d) los mecanismos de difusión y de encogimiento de la muestra son despreciables (Crank, 1979).

$$\frac{\partial Y}{\partial t} = D_{eff} \frac{\partial^2 Y}{\partial x^2} \quad (9)$$

Donde Y es la humedad contenida en el producto, t es el tiempo, x es la dimensión en la dirección de la transferencia y D_{eff} es el coeficiente de difusión. La solución simplificada para una placa plana es:

$$MR_t = \frac{8}{\pi^2} e^{\frac{-\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}} \quad (10)$$

Donde L es el espesor de la muestra.

El segundo modelo matemático que se utilizó fue el modelo anómalo (Simpson et al., 2013), cuya definición de difusión es:

$$\frac{\partial^\alpha W}{\partial t^\alpha} = D_{eff} \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \quad (11)$$

Su solución simplificada es:

$$MR_t = \frac{8}{\pi^2} e^{\frac{-\pi^2 D_{eff} t^\alpha}{4L^2}} \quad (12)$$

Donde α es un término que indicará si el proceso es subdifusivo ($\alpha < 1$), superdifusivo ($\alpha > 1$) o si la difusión ocurre de la misma manera que indica el modelo de la segunda ley de Fick ($\alpha = 1$).

Para la cinética de degradación de polifenoles se reemplazó la ecuación 14 en la ecuación 13 y se integra, es posible obtener un modelo que permita conocer la concentración de polifenoles a partir de distintos perfiles de temperatura medidos en el centro y en la superficie de la muestra.

$$\int_{C_i}^C \frac{dC}{C} = \int_0^t k dt = k_{ref} \int_0^t e^{\left[-\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T(t)} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right]} dt \quad (13)$$

3.6. Medición de color

Mediante el colorímetro (Konica Minolta, CR-400, Japón) que se muestra en la figura X, se mide el color de la pulpa de frutilla fresca y de las muestras deshidratadas a 75°C, 85°C y 95°C, obteniéndose las coordenadas de color L^* , a^* y b^* , estos parámetros pertenecientes al espacio de color CIELAB indican lo siguiente:

- L^* : Luminosidad (+) Blanco, (-) Negro
- a^* : (+) Rojo, (-) Verde
- b^* : (+) Amarillo, (-) Azul

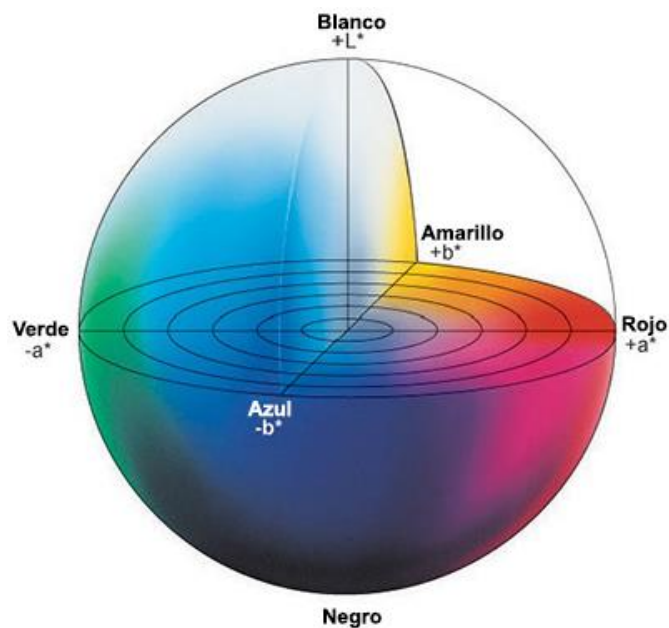


Figura 10. Espacio de color



Figura 11. Colorímetro (Konica Minolta, CR-400, Japón)

Primero se debió calibrar el dispositivo mediante 2 mediciones en placa blanca midiendo los parámetros Y, x e y.

Una vez realizada la calibración se procedió a realizar las mediciones de la pulpa de frutilla en triplicado.

Con las coordenadas obtenidas es posible obtener el parámetro "hue" que indica el ángulo de tono y el parámetro Croma que indica la pureza del color.

$$hue_{ab} = \tan^{-1} \left(\frac{b^*}{a^*} \right) \quad (14)$$

$$Croma_{ab} = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad (15)$$

Además, se determina la diferencia de color total:

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0)^2 + (a^* - a_0)^2 + (b^* - b_0)^2} \quad (16)$$

3.7. Comparación con el método de liofilizado

Con la finalidad de comprar el método de ventana refractiva con otra tecnología, los resultados tanto de polifenoles como de parámetros de color se comparan con lo obtenido para frutilla liofilizada a 20°C y 0.63 mbar por 24 horas (Biernacka et al., 2022).

En la figura 12, se muestra el proceso de liofilizado de las muestras de pulpa de frutilla.



Figura 12. Muestras en liofilizador

3.8. Perfil de temperatura

A través del software Loggin OMEGA se registró las distintas temperaturas durante el secado para cada temperatura, poniendo una termocupla en la pulpa de frutilla, otra en el Mylar y finalmente una en el agua del baño termostático como se observa en la figura 13, de esta forma se obtuvo el perfil de temperatura durante el secado.

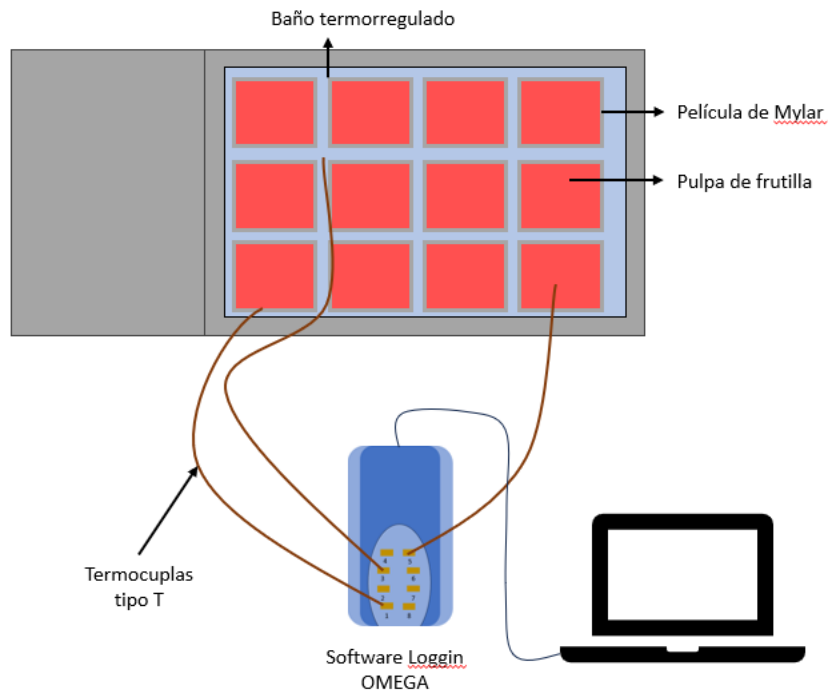


Figura 13. Diagrama procedimiento experimental para perfil de temperatura

3.9. Análisis estadístico

Se realizó una prueba de significancia de los resultados usando el análisis de varianza (ANOVA) y pruebas de rangos múltiples de Duncan, empleando un 95% de significancia. Para lo anterior se empleó el STATGRAPHIC Centurion XVI (Statistical Graphic Corporation, version 16.0.07, Rockville, MD, USA).

Capítulo 4

4.1. Resultados

4.1.1. Caracterización materia prima

En la tabla 3, se muestran los resultados de la caracterización de la materia prima.

Tabla 3. Resultados caracterización materia prima

Humedad de materia prima fresca (g agua/g muestra)	0.8671 ± 0.021
Contenido de Polifenoles (mg GAE/ g bs)	18.99 ± 0.50
Actividad de agua	0.968 ± 0.09
Brix °	10.9 ± 0.89

La humedad obtenida es de 86.7%, con una actividad de agua promedio de 0.968 y 10.9 Brix°. En cuanto al contenido de polifenoles esto fue de 18.99 mg GAE/g en base seca, este valor es similar a los 23.02 mg GAE/g reportados en otros estudios (Biernacka et al., 2022).

4.1.2. Actividad de agua

Se midió la actividad de agua hasta que esta fuera menor a 0.4 con la finalidad de determinar el tiempo de secado. Los resultados se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Resultados actividad de agua

Temperatura °C	Actividad de agua	Tiempo (min)	Humedad
75	0.396 ± 0.006	140	0.0436 ± 0.0040
85	0.393 ± 0.011	120	0.0588 ± 0.0032
95	0.362 ± 0.03	70	0.0599 ± 0.0054

A partir de estos resultados es posible determinar que a mayor temperatura el tiempo de secado es menor. Este es un resultado dentro de lo esperado de acuerdo con lo reportado por Shende & Datta (2019), donde se especifica que cuando la temperatura del agua circulante es mayor se logra una deshidratación más rápida.

Además, se puede mencionar que la humedad alcanzada al final del secado es mejor para el caso del secado a 75°C, esto puede deberse al mayor tiempo de deshidratación al que se vio expuesta la pulpa de frutilla a esa temperatura.

4.1.3. Curvas de humedad

Los datos de masa recopilados durante proceso de secado en ventana refractiva a 75°C, 85°C y 95°C permiten determinar la curva de humedad experimental para dichas temperaturas. Posteriormente, se lleva a cabo la modelación de la curva de humedad empleando el modelo basado en la Segunda Ley de Fick. El proceso de modelado se realiza utilizando el software MATLAB, mientras que las representaciones gráficas se generan mediante el programa SigmaPlot. En las figuras 14, 15 y 16, se muestra la comparación entre lo obtenido por el modelo y los datos experimentales.

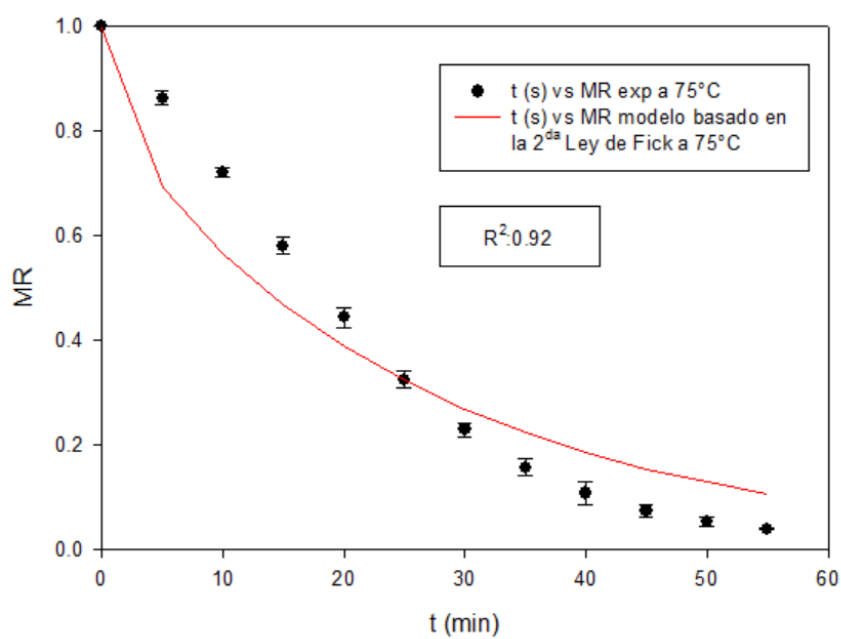


Figura 14. Ajuste modelo basado en la Segunda Ley de Fick para secado en VR a 75°C

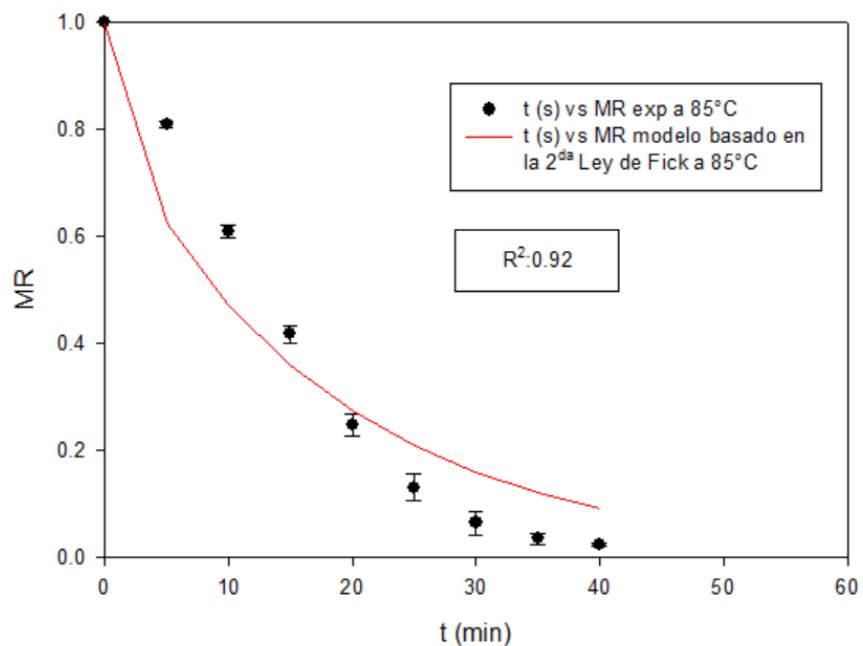


Figura 15. Ajuste modelo basado en la Segunda Ley de Fick para secado en VR a 85°C

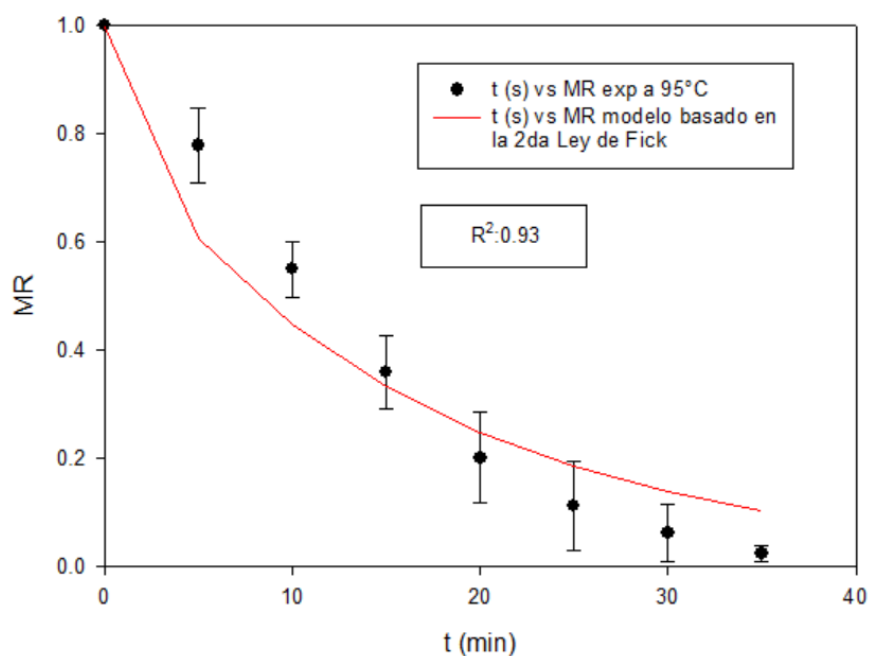


Figura 16. Ajuste modelo basado en la Segunda Ley de Fick para secado en VR a 95°C

De la misma forma, se procede a aplicar el modelo anómalo, obteniéndose lo mostrado en las figuras 17, 18 y 19.

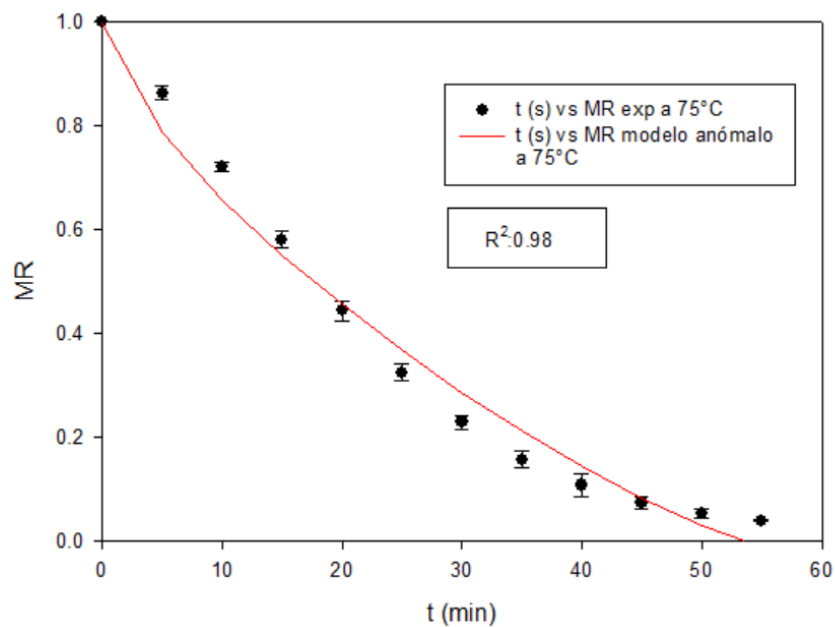


Figura 17. Ajuste modelo anómalo para secado en VR a 75°C

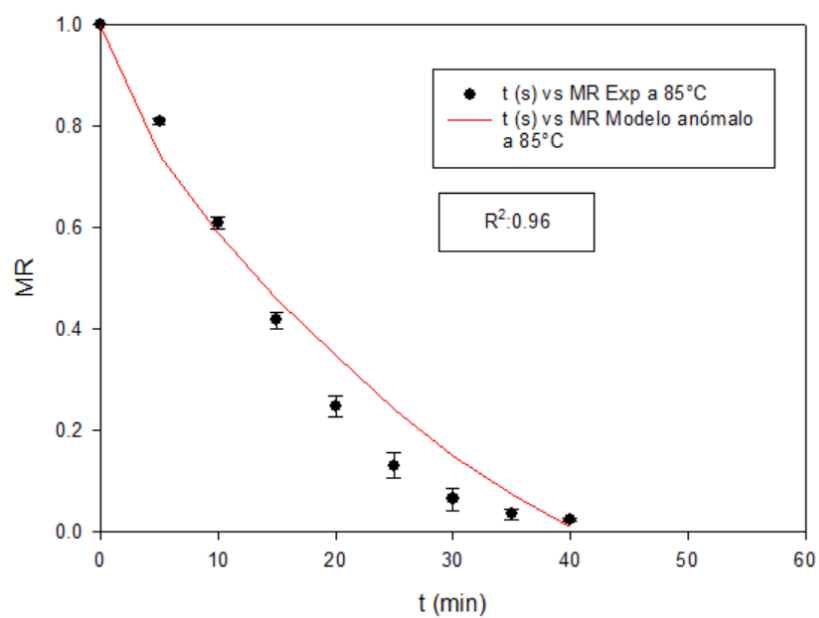


Figura 18. Ajuste modelo anómalo para secado en VR a 85°C

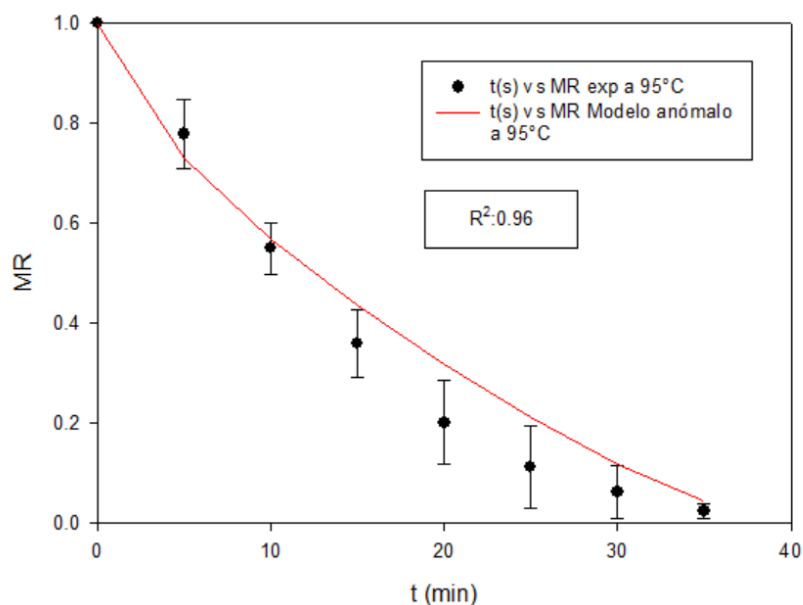


Figura 19. Ajuste modelo anómalo para secado en VR a 95°C

A partir de los mostrado anteriormente, es posible determinar que el modelo anómalo se ajusta de mejor manera que el modelo basado en la Segunda Ley de Fick. Esto es lo esperado según Franco et al., (2019), dado que el modelo anómalo puede proporcionar una representación más adecuada al proceso de secado en alimentos considerando una descripción fenomenológica del alimento.

Tabla 5. Coeficiente de difusión efectiva para modelo basado en segunda Ley de Fick y modelo anómalo

T°C	Deff (m²/s) Modelo basado en la 2 ^{da} Ley de Fick	R²	Deff (m²/s ^a) Modelo anómalo	A	R²
75	$3.0 \cdot 10^{-9} \pm 7.4 \cdot 10^{-11}{}^a$	0.92	$2.2 \cdot 10^{-10} \pm 3.3 \cdot 10^{-12}{}^a$	1.34 ± 0.03	0.98
85	$4.4 \cdot 10^{-9} \pm 1.8 \cdot 10^{-10}{}^b$	0.92	$3.2 \cdot 10^{-10} \pm 7.7 \cdot 10^{-12}{}^b$	1.34 ± 0.02	0.96
95	$4.8 \cdot 10^{-9} \pm 9.5 \cdot 10^{-10}{}^b$	0.93	$3.8 \cdot 10^{-10} \pm 3.9 \cdot 10^{-11}{}^c$	1.32 ± 0.05	0.96

Letras distintas dentro de la misma columna significan que sí existen diferencias estadísticamente significativas con un nivel de confianza del 95%.

A partir de los resultados mostrados en la tabla 5, es posible determinar que a medida que aumenta la temperatura, el coeficiente de difusión también aumenta, este es un resultado esperado dado que a medida que la temperatura es mayor, la energía cinética de las moléculas aumenta, por lo que la difusión ocurre en menos tiempo.

Los valores obtenidos son cercanos a lo observados en otros estudios. Por ejemplo, Ağçam, (2022) determinó que el coeficiente de difusión efectiva en un proceso de deshidratación de frutilla en un secador de cabina a escala piloto con circulación de aire fue de entre $3.69 \cdot 10^{-10}$ y $9.75 \cdot 10^{-10}$ m²/s para 45, 55 y 65°C.

En otro estudio realizado con un secador convectivo, Stamenković et al., (2019) el coeficiente de difusión efectiva para 45°C fue de $1.115 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$.

Para el caso de una deshidratación en ventana refractiva, Franco et al., (2019) determinaron que para láminas de manzana el coeficiente de difusión efectiva fue de $2.65 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ para 55°C y de $14.3 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ para 95°C.

Los resultados para el modelo basado en la Segunda Ley de Fick no muestran diferencias significativas para el coeficiente de difusión efectiva de las temperaturas de 85°C y 95°C, pero éstas sí muestran diferencias con el coeficiente correspondiente a 75°C.

Para el caso del modelo anómalo, los coeficientes de difusión efectiva sí muestran diferencias significativas para las distintas temperaturas.

4.1.4. Energía de Activación

A partir de los datos de coeficiente de difusión obtenidos para ambos modelos a distintas temperaturas, es posible determinar el valor de la energía de activación para pulpa de frutilla deshidratada en ventana refractiva.

En la figura 20 y 21 se muestra la regresión aplicada para los datos de $(1/T)$ y $\ln(\text{Deff})$ obtenidos a partir del modelo basado en la Segunda Ley de Fick y modelo anómalo respectivamente.

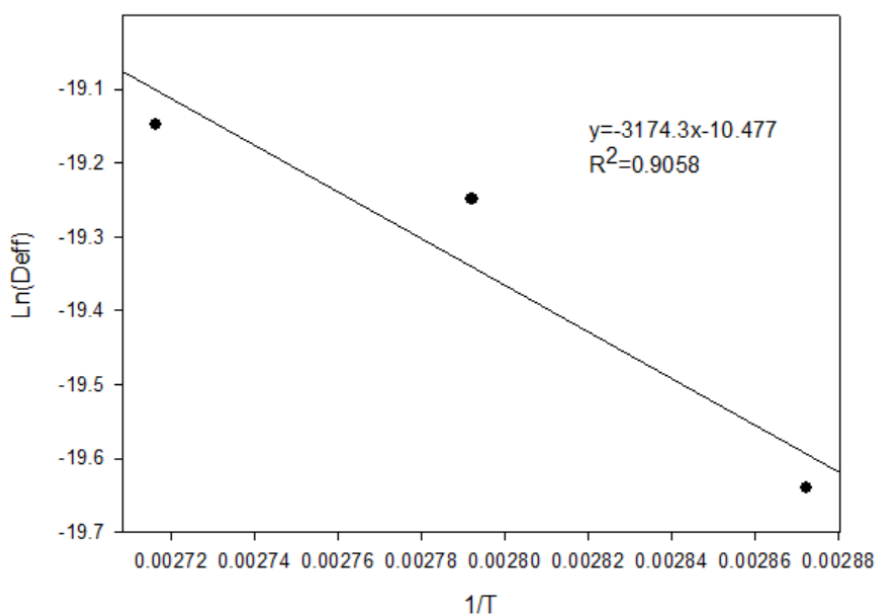


Figura 20. $\ln(\text{Deff})$ vs $1/T$ para determinación energía de activación caso modelo basado en la Segunda Ley de Fick

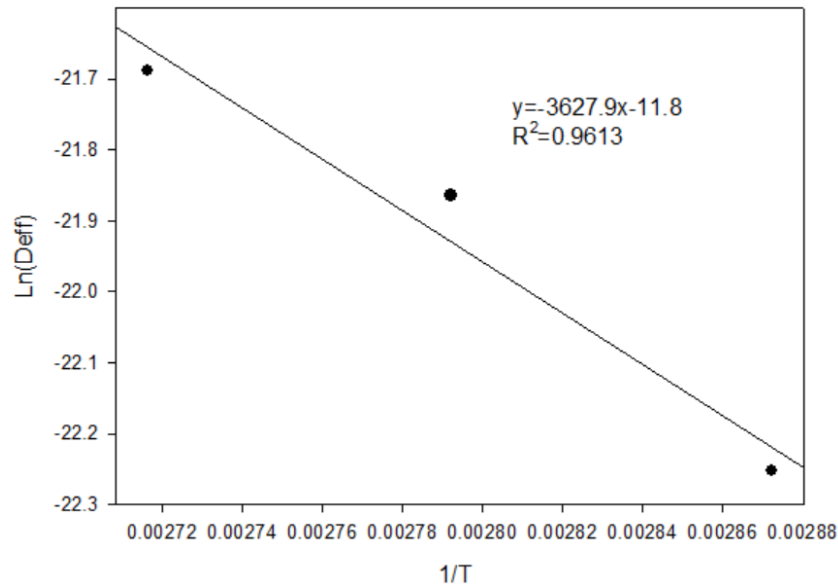


Figura 21. $\ln(D_{eff})$ vs $1/T$ para determinación energía de activación caso modelo anómalo

Para el cálculo de la energía de activación se tiene en cuenta que la pendiente corresponde a E_a/R , donde R es igual a 8.314 J/molK . En el caso del modelo anómalo se obtuvo una energía de activación de 30.16 kJ/molK , mientras que para el modelo basado en la segunda Ley de Fick este valor fue de 26.39 kJ/molK .

Pavkov et al., (2018) realiza un estudio donde compara muestras de frutillas deshidratadas mediante secado convectivo con y sin pretratamiento de osmosis. Las muestras fueron secadas en una solución de sacarosa a 50°C en concentraciones de 50 y 65°Bx , luego se realizó un secado con una corriente de aire a 60°C , 70°C y 80°C . El estudio reporta que los valores de energía de activación fueron de 31.23, 23.89 y 12.16 kJ/mol , en muestra sin pretratamiento y con pretratamiento a 50 y 65°Bx respectivamente, posiblemente debido a que las moléculas de sacarosa saturaban la superficie, dificultando la absorción de agua y vapor de agua.

Ağçam, (2022) reportó un valor de 43.42 kJ/mol para el secado de muestras de frutilla en un secador de cabina con circulación de aire a escala piloto a 45°C , 55°C y 65°C . Uno de los principales factores que están relacionado a la energía de activación es la temperatura. A medida que aumenta la temperatura, una mayor fracción de moléculas posee la energía necesaria para reaccionar, alcanzando la energía de activación más rápido. Por lo tanto, en este caso, a menor temperatura, la velocidad de reacción es más lenta que en el caso de secado con ventana refractiva.

4.1.5. Contenido de polifenoles totales en muestras deshidratadas

Para la pulpa de frutilla deshidratada a 75°C se obtuvo un contenido de polifenoles de $8.87 \pm 0.19 \text{ (mg GAE/ g bs)}$, mientras que a 85°C este contenido disminuye llegando a $7.04 \pm 0.97 \text{ (mg GAE/ g bs)}$ y finalmente, a 95°C la concentración de polifenoles es $6.74 \pm 0.38 \text{ (mg GAE/ g bs)}$, estos resultados se comparan con lo obtenido por el método de liofilización. Para esta

tecnología se obtuvo una reducción del contenido de polifenoles llegando a 4.01 ± 0.34 (mg GAE/ g bs) con muestras cuya actividad de agua fue en promedio de 0.33 ± 0.06 .

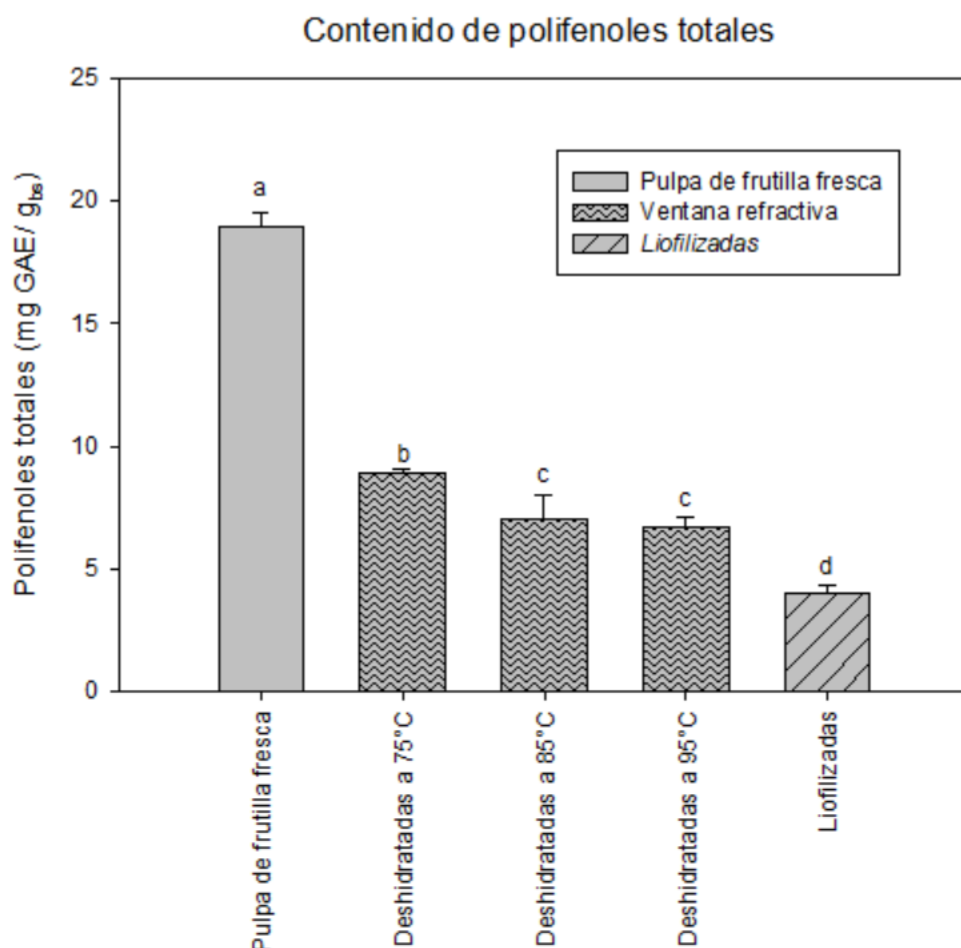


Figura 22. Polifenoles totales (mg GAE/ g bs) en muestras secadas en VR

De acuerdo con estos resultados se determina que a medida que aumenta la temperatura, el contenido de polifenoles disminuye. Este resultado es el esperado según lo reportado por Shrivastav et al., (2021) donde también se presenta una disminución de los polifenoles en un secado a 75°C en ventana refractiva, puesto el contenido de polifenoles solo puede mantenerse o disminuir respecto a su valor inicial.

Respecto a lo obtenido para el método de liofilización, no es un resultado esperado dado que estudios anteriores especifican que una baja temperatura y una evaporación gradual de las capas de agua del material congelado ayuda a preservar la estructura de la fruta y evitan cualquier pérdida significativa de compuestos fenólicos (Sidor et al., 2021). Sin embargo, Muñoz-Fariña et al., (2023) realizan en un estudio sobre distintos métodos de deshidratación, entre ellos el método de liofilización, obteniendo una disminución de polifenoles en arándanos, llegando a 3.8 ± 0.1 (mg GAE/ g bs). Adicionalmente, Bustos et al., (2018), también determinan que para frutas del tipo berries una deshidratación mediante liofilización puede producir una disminución de un 63% en el contenido de polifenoles y explican que puede deberse a la polimerización de estos compuestos, reduciendo la cantidad de polifenoles libres.

Se recomienda seguir investigando sobre el efecto de la liofilización en la concentración de polifenoles en la pulpa de frutilla para poder llegar a conclusiones más claras al respecto.

Además, respecto a lo mostrado en la figura 22, es posible determinar que el contenido de polifenoles en la pulpa de frutilla fresca presenta diferencias significativas con la pulpa de frutilla deshidratada a 75°C, a 85°C y a 95°C, sin embargo, la muestra de pulpa de frutilla deshidratada a 95°C no presenta diferencias significativas con la muestra deshidratada a 85°C.

4.1.6. Medición de color en muestras deshidratadas

En la tabla 6, se muestran los parámetros relacionados a la variación de color observada en los distintos tratamientos de secado aplicados a la pulpa de frutilla. Debido a la dificultad de comparar directamente la pulpa de frutilla fresca en su estado líquido con la pulpa de frutilla deshidratada que adquiere un estado sólido (polvo) como se observa en la figura 23, se recurre a la pulpa de frutilla liofilizada para realizar la comparación.

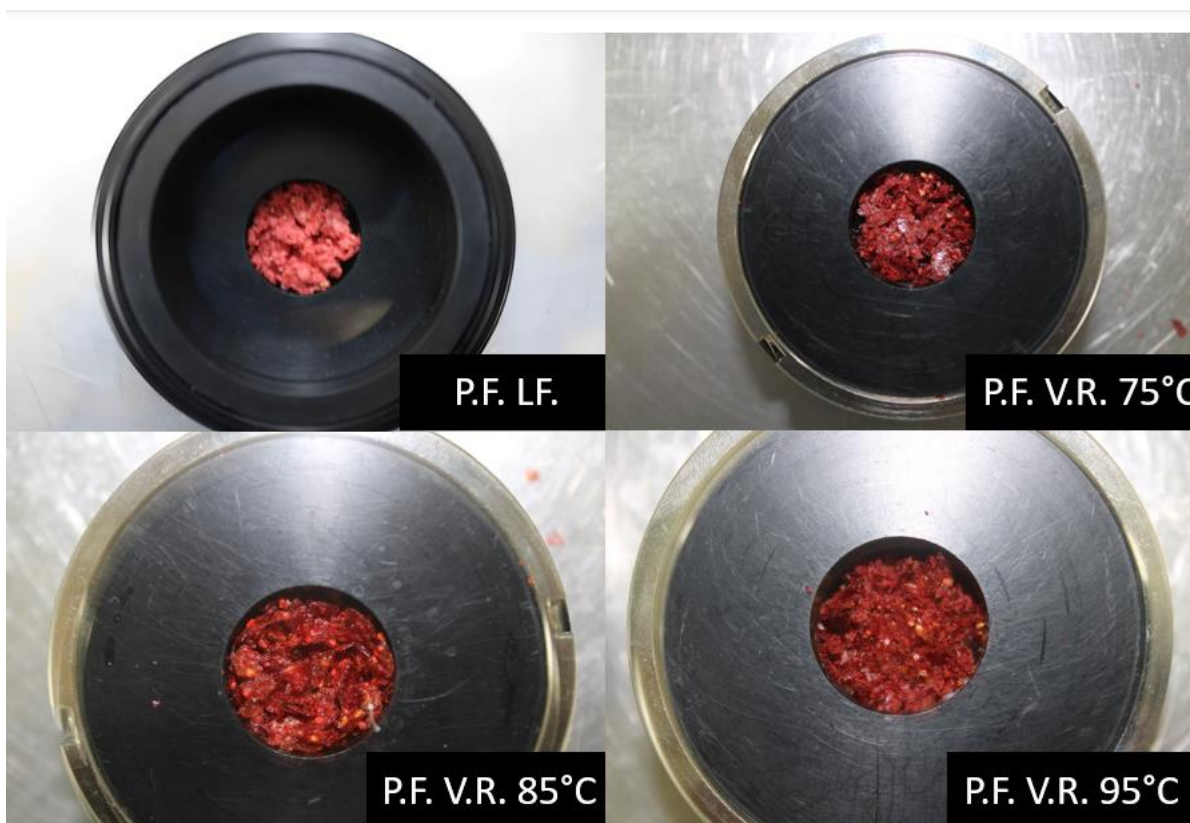


Figura 23. Muestras de pulpa de frutilla a distintas temperaturas.

P.F es pulpa de frutilla, LF es liofilizado, V.R es ventana refractiva.

Tabla 6. Parámetros medición de color en muestras de pulpa de frutilla deshidratadas en liofilizador y en ventana refractiva

Tipo de pulpa de frutillas	L*	a*	b*	Hue	Croma	ΔE
Liofilizadas	37.31 $\pm$ 1.73 ^a	22.22 $\pm$ 0.02 ^a	14.29 $\pm$ 0.08 ^a	32.76	26.42	-
Deshidratadas a 75°C	26.22 $\pm$ 1.22 ^b	8.34 $\pm$ 1.00 ^b	8.08 $\pm$ 0.47 ^b	44.10	11.61	18.83 $\pm$ 1.40 ^a
Deshidratadas a 85°C	26.34 $\pm$ 0.94 ^b	7.61 $\pm$ 1.00 ^b	8.31 $\pm$ 0.34 ^b	47.52	11.27	19.23 $\pm$ 1.09 ^a
Deshidratadas a 95°C	26.09 $\pm$ 1.55 ^b	8.22 $\pm$ 0.05 ^b	8.36 $\pm$ 0.41 ^b	45.50	11.72	18.93 $\pm$ 0.81 ^a

Letras iguales dentro de la misma columna significan que no existen diferencias estadísticamente significativas con un nivel de confianza del 95%.

Respecto a la luminosidad (L*) se obtiene un color más brillante (valor de L* más alto) en la pulpa de frutilla liofilizada en comparación a la pulpa de frutilla deshidratada en ventana refractiva a cualquier temperatura. Entre los tratamientos de secado en ventana refractiva, este parámetro no presenta diferencias significativas.

En cuanto a la tonalidad de verde a rojo ($\pm a^*$) todas las muestras de pulpa de frutilla deshidratadas a cualquier temperatura presentan diferencias significativas con la pulpa de frutilla liofilizada. El producto con la tonalidad más cercana al rojo es la pulpa de frutilla liofilizada, mientras que las muestras deshidratadas en ventana refractiva muestran valores más bajos, alejándose de esta tonalidad.

Referente a la tonalidad de azul a amarillo ($\pm b$), nuevamente, todas las muestras de pulpa de frutillas deshidratada a cualquier temperatura muestran diferencias significativas con las muestras de pulpa de frutilla liofilizada. Además, todas las muestras se acercan a la tonalidad amarilla, siendo la muestra de pulpa de frutilla liofilizada la que muestra un valor mayor.

Las muestras de pulpa de frutilla deshidratadas son más oscuras (mayor valor de Hue) que las muestras liofilizadas, mientras que valor de Croma, que es la medición de saturación de materiales que tienen hue y luminosidades similares, muestran una disminución entre ambos tratamientos, más no existe mayor diferencia entre la deshidratación a distintas temperaturas.

Finalmente, se analiza la diferencia total de color entre el tratamiento de liofilización y la deshidratación en ventana refractiva para cada temperatura. Si bien, el secado en ventana refractiva a 85°C presenta una diferencia total de color mayor, no hay diferencias significativas con el secado a las otras temperaturas.

Nindo & Tang, (2007), también presentan diferencias significativas entre los parámetros anteriormente analizados para tratamiento de liofilización y secado en ventana refractiva de pulpa de frutilla. Mientras que Abonyi et al., (2002), también muestra que el parámetro L* es mayor en el caso de la pulpa de frutilla liofilizada, sin embargo, los otros parámetros muestran valores mayores para el caso de la deshidratación en ventana refractiva, posiblemente debido al uso de maltodextrina.

4.1.7. Perfil de temperatura.

A continuación, en las figuras 24, 25 y 26 se muestran los perfiles de temperatura de la pulpa de frutilla, de la zona inferior del Mylar y del baño termorregulado durante el secado en ventana refractiva a 75, 85 y 95 °.

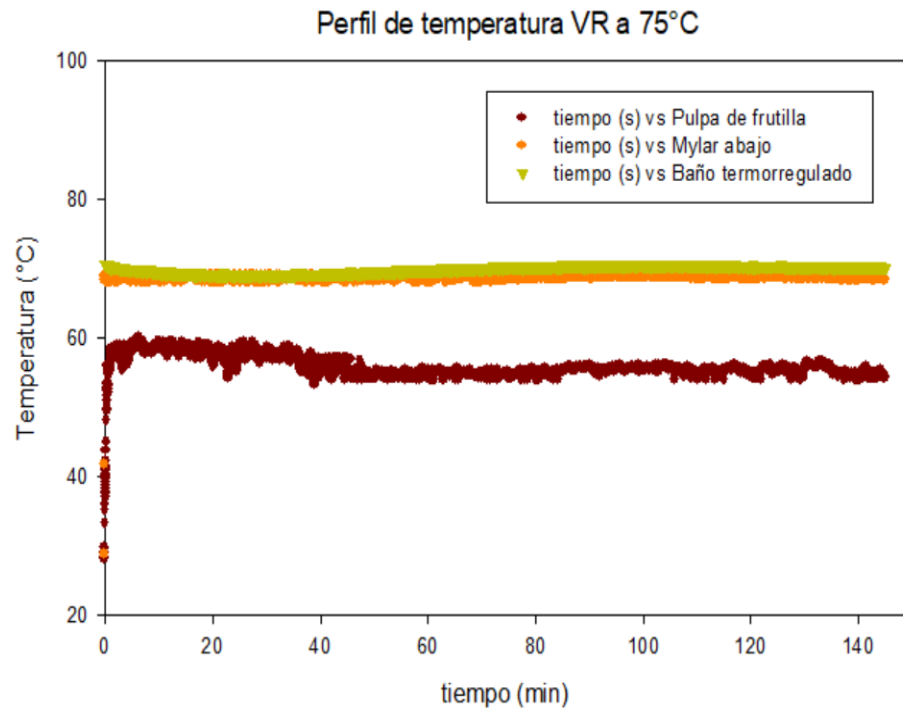


Figura 24. Perfil de Temperatura VR a 75°C

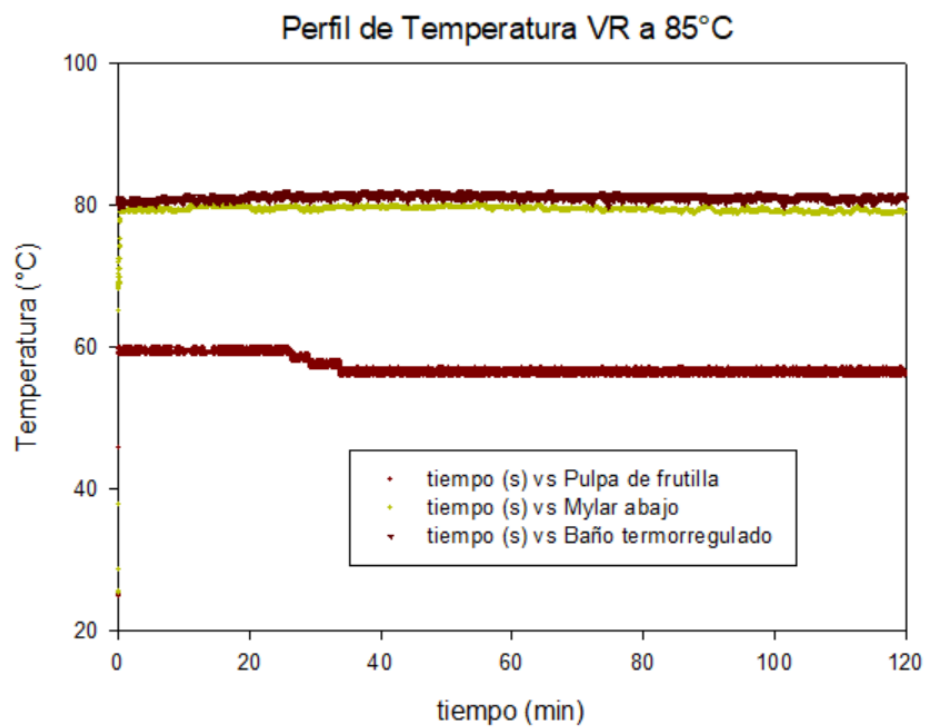


Figura 25. Perfil de Temperatura VR a 85°C

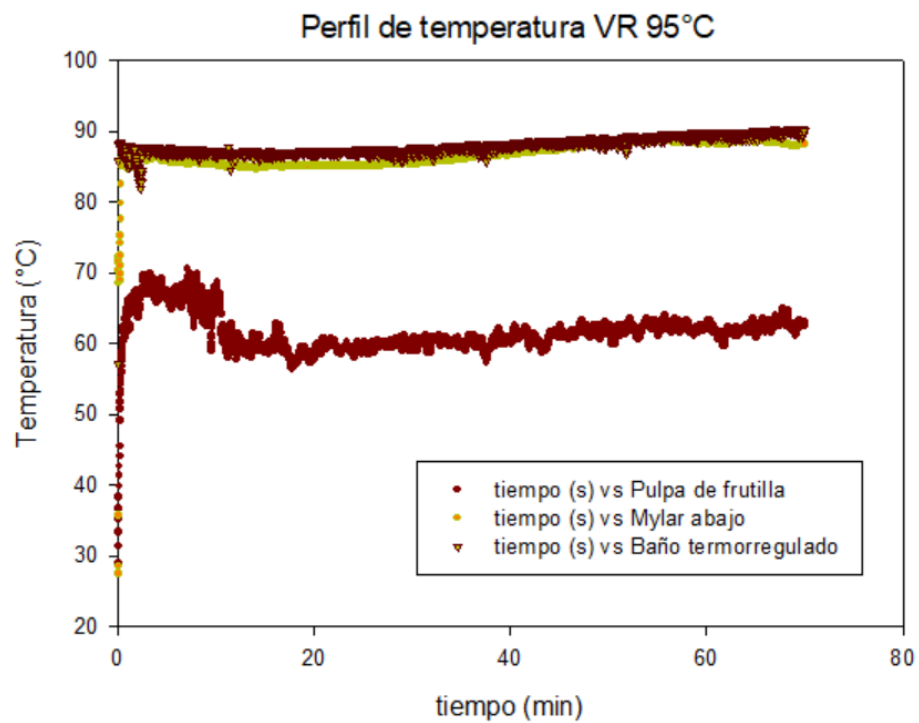


Figura 26. Perfil de Temperatura VR a 95°C

Para los tres casos se observa que la temperatura del baño termorregulado y de la zona inferior del Mylar es mayor que la temperatura de la pulpa de frutilla, posiblemente se deba a la baja conducción térmica de esta misma.

Además, es posible observar que, pasado un cierto periodo de tiempo, la temperatura en la pulpa de frutilla disminuye, esto se puede explicar debido a que, durante el secado, la evaporación del agua del alimento hace que el grosor de la muestra disminuya, lo que permite que la termocupla quede más expuesta al medio ambiente, bajando así su temperatura.

Capítulo 5

5.1. Conclusiones y recomendaciones

A partir de los resultados obtenidos durante el trabajo experimental se pudo determinar cuáles son los efectos del secado de la pulpa de frutilla mediante ventana refractiva sobre la concentración de polifenoles, el tiempo de secado, y el color del producto final.

Respecto a la cinética de secado, se observa que, en primer lugar, el modelo anómalo se ajusta de mejor que manera que el modelo de Crank basado en la 2^{da} Ley de Fick para las tres temperaturas. En segundo lugar, se observa que a medida que se aumenta la temperatura el coeficiente de difusión también lo hace, por lo tanto, la difusión de agua es más rápida.

En cuanto a la medición de polifenoles totales en muestra de pulpa frutilla fresca y muestras de pulpa de frutilla deshidratadas, se observó que a mayor temperatura el contenido de polifenoles totales va disminuyendo en un 53%, 63% y 65% para 75°C, 85°C y 95°C respectivamente. Este es un comportamiento esperado dado que durante el secado no ocurren reacciones que permitan la formación de polifenoles, por lo que se espera que el contenido se mantenga o disminuya. Además, se determinó que estos valores fueron mayores que el obtenido para muestras de pulpa de frutilla liofilizada, si bien este resultado es contradictorio con lo observado en otros estudios, esto se puede explicar por la polimerización de los polifenoles, efecto observado durante el secado en frutas de tipo berries.

En lo que respecta al color, los resultados obtenidos indicaron que las muestras liofilizadas presentaron mayor luminosidad que las muestras deshidratadas en ventana refractiva. Asimismo, se observó una mayor tonalidad roja y amarilla en las muestras liofilizadas. Además, las muestras deshidratadas fueron más oscuras que las muestras liofilizadas y presentaron una disminución en la saturación del color. Es importante mencionar que no se encontraron diferencias significativas entre los parámetros luminosidad (L^*), tonalidad roja (a^*) y tonalidad amarilla (b^*) ni en el cambio total de color entre las muestras deshidratadas a distintas temperaturas.

Como recomendación se propone la utilización de maltodextrina puesto que puede ayudar a preservar la estructura y las propiedades físicas del alimento, evitando la aglomeración, esto podría permitir una mayor exposición de la superficie del alimento, lo que eventualmente podría significar una disminución en el tiempo del secado. También se recomienda colar la pulpa con la finalidad de separar las semillas, que pueden resultar en un problema a la hora de realizar la curva de secado. Finalmente se recomienda realizar mediciones de furanos al final de secado y compararlos con los datos de polifenoles obtenidos con el objetivo de determinar si es que existe alguna relación.

Referencias

- Abonyi, B. I., Feng, H., Tang, J., Edwards, C. G., Chew, B. P., Mattinson, D. S., & Fellman, J. K. (2002). Quality retention in strawberry and carrot purees dried with Refractance Window™ system. *Journal of Food Science*, 67(3). <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2002.tb09452.x>
- Ağcam, E. (2022). Effect of Different Temperatures on Drying Kinetics and Some Quality Attributes of Strawberry. *Turkish Journal of Agriculture*, 10(7), 1270–1280.
- Aguilera, J. M. (2005). Why food micro structure? *Journal of Food Engineering*, 67(1–2), 3–11. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.05.050>
- Biernacka, B., Dziki, D., Rudy, S., Krzykowski, A., Polak, R., & Dziki, L. (2022). Influence of Pretreatments and Freeze-Drying Conditions of Strawberries on Drying Kinetics and Physicochemical Properties. *Processes*, 10(8). <https://doi.org/10.3390/pr10081588>
- Bijak, M., Saluk, J., Szelenberger, R., & Nowak, P. (2016). Popular naturally occurring antioxidants as potential anticoagulant drugs. En *Chemico-Biological Interactions* (Vol. 257). <https://doi.org/10.1016/j.cbi.2016.07.022>
- Borja, E. (2010). *Estudio de la conservación de fresas (Fragaria vesca) mediante tratamientos térmicos* [Universidad Técnica de Ambato]. <https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/865/1/AL427%20Ref.%203273.pdf>
- Bustamante, C. (2021). *Estudio de inhibidores enzimáticos presentes en frutillas (Fragaria Ananassa) aplicando análisis efecto dirigido sobre cromatografía planar*. Universidad de Concepción.
- Bustos, M. C., Rocha-Parra, D., Sampedro, I., De Pascual-Teresa, S., & León, A. E. (2018). The Influence of Different Air-Drying Conditions on Bioactive Compounds and Antioxidant Activity of Berries. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(11). <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b05395>
- Chamorro, I. M. R. (2018). Comparación de técnicas de secado de ventana refractiva y convección forzada en frutas tropicales. En *International Journal of Machine Tools and Manufacture* (Vol. 5, Número 1).
- Cheng, Y. C., Sheen, J. M., Hu, W. L., & Hung, Y. C. (2017). Polyphenols and Oxidative Stress in Atherosclerosis-Related Ischemic Heart Disease and Stroke. En *Oxidative Medicine and Cellular Longevity* (Vol. 2017). <https://doi.org/10.1155/2017/8526438>
- Contigiani, E. (2019). *Desarrollo de estrategias alternativas para la conservación post-cosecha de frutillas* [Universidad de Buenos Aires]. <https://core.ac.uk/download/pdf/224999329.pdf>
- Crank, J. (s. f.). *THE MATHEMATICS OF DIFFUSION* CLARENDON PRESS OXFORD 1975.
- Crank, J. (1979). *The mathematics of diffusion*. 2nd Edn. <https://doi.org/10.1088/0031-9112/26/11/044>

- Dadet, M. (2018). *Evaluación del comportamiento del cultivo de frutilla sin suelo bajo dos sistemas de conducción* [Universidad Nacional de Luján]. <https://ri.unlu.edu.ar/xmlui/bitstream/handle/rediunlu/1314/Agronomia-%20DADET%20MARIA%20CELESTE%20-%20TFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- de Souza, E. L., de Albuquerque, T. M. R., dos Santos, A. S., Massa, N. M. L., & de Brito Alves, J. L. (2019). Potential interactions among phenolic compounds and probiotics for mutual boosting of their health-promoting properties and food functionalities—A review. En *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* (Vol. 59, Número 10). <https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1425285>
- Departamento de Agricultura de Estados Unidos. (2019). *Strawberries, raw (SR legacy, 167762)*. <https://fdc.nal.usda.gov/fdc-app.html#/food-details/167762/nutrients>
- FAO. (2023). *FAOSTAT-Crops and livestock products*. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL/visualize>.
- Fito, P., Andrés, A., Barat, J., & Albors, A. (2016). *Introducción al secado de alimentos por aire caliente* (First). Editorial Universitat Politècnica de València. www.lalibreria.upv.es
- Francis, S. T., Head, K., Morris, P. G., & Macdonald, I. A. (2006). The effect of flavanol-rich cocoa on the fMRI response to a cognitive task in healthy young people. *Journal of Cardiovascular Pharmacology*, 47(SUPPL. 2). <https://doi.org/10.1097/00005344-200606001-00018>
- Franco, S., Jaques, A., Pinto, M., Fardella, M., Valencia, P., Núñez, H., Ramírez, C., & Simpson, R. (2019). Dehydration of salmon (Atlantic salmon), beef, and apple (Granny Smith) using Refractance window™: Effect on diffusion behavior, texture, and color changes. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 52, 8–16. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.12.001>
- Galetto, C. D., Verdini, R. A., Zorrilla, S. E., & Rubiolo, A. C. (2010). Freezing of strawberries by immersion in CaCl₂ solutions. *Food Chemistry*, 123(2). <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.04.018>
- Ganesan, K., & Xu, B. (2017). A critical review on polyphenols and health benefits of black soybeans. En *Nutrients* (Vol. 9, Número 5). <https://doi.org/10.3390/nu9050455>
- Gutiérrez, E. (2016). *Determinación del contenido basal de estilbenos en hojas de vid mediante HPLC-MS*. Universidad Autónoma de Madrid.
- Hernández-Martínez, N. R., Blanchard, C., Wells, D., & Salazar-Gutiérrez, M. R. (2023). Current state and future perspectives of commercial strawberry production: A review. En *Scientia Horticulturae* (Vol. 312). <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.111893>
- Home & Garden Information Center. (2023, junio 30). *Drying food*. Clemson Cooperative Extension.
- Hussain, T., Tan, B., Yin, Y., Blachier, F., Tossou, M. C. B., & Rahu, N. (2016). Oxidative Stress and Inflammation: What Polyphenols Can Do for Us? En *Oxidative Medicine and Cellular Longevity* (Vol. 2016). <https://doi.org/10.1155/2016/7432797>

- Japa, L. (2022). *Efectos de los métodos de deshidratación de frutas sobre sus propiedades nutricionales y sensoriales* [Universidad Técnica de Ambato]. <https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/34929/1/AL%20820.pdf>
- Katel, S., Mandal, H. R., Kattel, S., Yadav, S. P. S., & Lamshal, B. S. (2022). Impacts of plant growth regulators in strawberry plant: A review. En *Heliyon* (Vol. 8, Número 12). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11959>
- Kim, Y. A., Keogh, J. B., & Clifton, P. M. (2016). Polyphenols Polyphenols and Glycemic Control. *Nutrients*, 8(1).
- Kowalska, J., Kowalska, H., Marzec, A., Brzeziński, T., Samborska, K., & Lenart, A. (2018). Dried strawberries as a high nutritional value fruit snack. *Food Science and Biotechnology*, 27(3). <https://doi.org/10.1007/s10068-018-0304-6>
- Krikorian, R., Nash, T. A., Shidler, M. D., Shukitt-Hale, B., & Joseph, J. A. (2010). Concord grape juice supplementation improves memory function in older adults with mild cognitive impairment. *British Journal of Nutrition*, 103(5). <https://doi.org/10.1017/S0007114509992364>
- Lee, S. J., & Boonsupthip, W. (2014). Mathematical Modeling of Browning Induction Period in Drying Onion as Influenced by Temperature, Equilibrium Relative Humidity, and Inhibitor. *Drying Technology*, 33(1), 120–127. <https://doi.org/10.1080/07373937.2014.933845>
- Leiton, Y. (2012). *Evaluación del método de secado por ventana de refractancia™ en pulpa de guayaba (Psidium guajava)* [Universidad del Valle]. <https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/handle/10893/9323/CB-0472478.pdf;jsessionid=3EBFDA664EAD62BA78A99B48D3B3AE2D?sequence=1>
- Martínez-Valverde, I., Periago, M. J., & Ros Gaspar. (2000). Significado nutricional de los compuestos fenólicos de la dieta. *Archivos Impresos Latinoamericanos de Nutrición*, 50, 5–18.
- Moon, J. H., Pan, C. H., & Yoon, W. B. (2015). Drying characteristics and thermal degradation kinetics of hardness, anthocyanin content and colour in purple- and red-fleshed potato (*Solanum tuberosum* L.) during hot air drying. *International Journal of Food Science & Technology*, 50(5), 1255–1267. <https://doi.org/10.1111/IJFS.12740>
- Muñoz, S., & Naranjo, J. (2012). *Caracterización de las propiedades físico químicas y estudio de los atributos de calidad en el comportamiento pos cosecha de dos variedades de frutilla (fragaria chiloensis) en la provincia de Imbabura* [Universidad Técnica del Norte]. <http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/1968/3/03%20EIA%20321%20RESUMEN%20EJECUTIVO.pdf>
- Muñoz-Fariña, O., López-Casanova, V., García-Figueroa, O., Roman-Benn, A., Ah-Hen, K., Bastias-Montes, J. M., Quevedo-León, R., & Ravanal-Espinosa, M. C. (2023). Bioaccessibility of phenolic compounds in fresh and dehydrated blueberries (*Vaccinium corymbosum* L.). *Food Chemistry Advances*, 2. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2022.100171>
- Nemzer, B., Vargas, L., Xia, X., Sintara, M., & Feng, H. (2018). Phytochemical and physical properties of blueberries, tart cherries, strawberries, and cranberries as affected by

- different drying methods. *Food Chemistry*, 262, 242–250. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2018.04.047>
- Ngamwonglumlert, L., & Devahastin, S. (2017). Microstructure and its relationship with quality and storage stability of dried foods. En *Food Microstructure and Its Relationship with Quality and Stability* (pp. 139–159). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100764-8.00008-3>
- Nindo, C. I., & Tang, J. (2007). Refractance Window Dehydration Technology: A Novel Contact Drying Method. *Drying Technology*, 25(1), 37–48. <https://doi.org/10.1080/07373930601152673>
- Ocoro, M. U., & Ayala, A. A. (s. f.). Evaluation of the refractance window™ technique on drying of papaya (carica papaya L.) Purée. *Vitae*, 19, 2012.
- ODEPA. (2022). *Boletín de la fruta*. <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjojNDY4ZTg4MmEtNGM2ZC00YWI2LWFhZgtODIyOTBjMWU1ZDNIiwidCI6IjMzYjdmNzA3LTZlNmYtNDJkMi04ZDZmLTk4YmZmOWZiNWZhMCIiImMiOjR9>
- Pavkov, I., Stamenković, Z., Radojčin, M., Krstan, K., Bursić, V., Bikić, S., & Mitrevski, V. (2018). Osmotic and convective drying of strawberries: Effects of experimental parameters on the drying kinetics, color and rehidration. *Journal on Processing and Energy in Agriculture*, 22(2). <https://doi.org/10.5937/jpea1802058p>
- Quiñones, M., Miguel, M., & Aleixandre, A. (2012). Los polifenoles, compuestos de origen natural con efectos saludables sobre el sistema cardiovascular. *Nutrición Hospitalaria: Órgano Oficial de la Sociedad Española de Nutrición Parenteral y Enteral*, 27(1).
- Sadik, H., Ouazzani, C., Moustaghfir, A., El Ghammarti, S., Er-Ramly, A., Essebbahi, I., Dami, A., & Balouch, L. (2023). Comparison of the nutritional proprieties of commercial strawberries, red and black raspberry consumed in Morocco. *Applied Food Research*, 3(2).
- Salentijn, E. M. J., Aharoni, A., Schaart, J. G., Boone, M. J., & Krens, F. A. (2003). Differential gene expression analysis of strawberry cultivars that differ in fruit-firmness. *Physiologia Plantarum*, 118(4). <https://doi.org/10.1034/j.1399-3054.2003.00138.x>
- Santamaría, E. M., Espitia-Lopez, J. V., Marriaga-Barroso, A. P., Paez-Logreira, H. D., Santamaría, E. M., Espitia-Lopez, J. V., Marriaga-Barroso, A. P., & Paez-Logreira, H. D. (2022). Sistema de control y monitoreo para el proceso de secado de alimentos: caso polen apícola. *Información tecnológica*, 33(3), 137–148. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642022000300137>
- Shende, D., & Datta, A. K. (2019). Refractance window drying of fruits and vegetables: a review. En *Journal of the Science of Food and Agriculture* (Vol. 99, Número 4). <https://doi.org/10.1002/jsfa.9356>
- Shrivastav, S., Ganorkar, P. M., Prajapati, K. M., & Patel, D. B. (2021). Drying kinetics, heat quantities, and physiochemical characteristics of strawberry puree by Refractance Window drying system. *Journal of Food Process Engineering*, 44(9). <https://doi.org/10.1111/jfpe.13776>

- Sidor, A., Drożdżyńska, A., Brzozowska, A., & Gramza-Michałowska, A. (2021). The effect of plant additives on the stability of polyphenols in dried black chokeberry (*Aronia melanocarpa*) fruit. *Foods*, 10(1). <https://doi.org/10.3390/foods10010044>
- Simpson, R., Jaques, A., Nuñez, H., Ramirez, C., & Almonacid, A. (2013). Fractional Calculus as a Mathematical Tool to Improve the Modeling of Mass Transfer Phenomena in Food Processing. *Food Engineering Reviews*, 5(1), 45–55. <https://doi.org/10.1007/S12393-012-9059-7/METRICS>
- Stamenković, Z., Pavkov, I., Radojčin, M., Kešelj, K., Vakula, A., & Novaković, T. (2019). Mathematical modeling of the kinetics of strawberry pulp convective drying and the effect of ascorbic acid on strawberry pulp color preservation. *Journal on Processing and Energy in Agriculture*, 23(4). <https://doi.org/10.5937/jpea1904170s>
- Toledo, R. T. (2007). *Fundamentals of Food Process Engineering (Food Science Texts Series)* (Third Edition). Georgia: Springer Science.
- Vania Urías-Orona, José Basilio Heredia, Dolores Muy-Rangel, & Guillermo Niño-Medina. (2016). Ácidos fenólicos con actividad antioxidante en salvado de maíz y salvado de trigo. En *Salvado de Trigo* (Vol. 3, Número 7).
- Virgen-Navarro, L., Herrera-López, E. J., Espinosa-Andrews, H., Guatemala-Morales, G. M., Corona-González, R. I., & Arriola-Guevara, E. (2016). Diffusivity coefficient estimation during coffee roasting in a spouted bed using a fuzzy model. *Revista Mexicana de Ingeniera Quimica*, 15(2), 513–524. <https://doi.org/10.24275/RMIQ/ALIM1163>

Anexo

Anexo 1: Actividad de agua

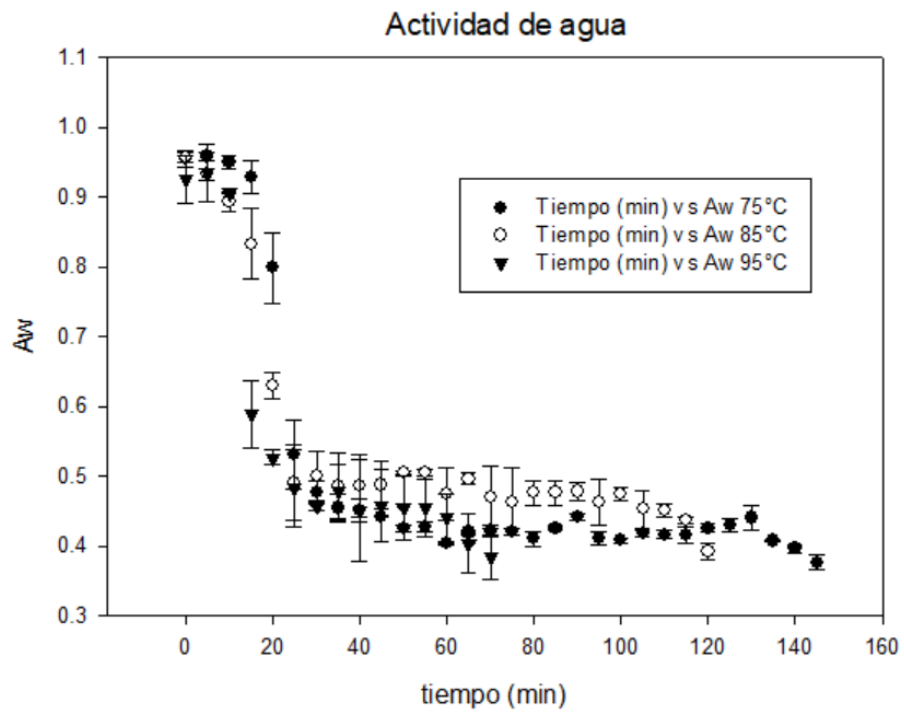


Figura 27. Actividad de agua vs tiempo a distintas temperaturas

Anexo 2: Curva de humedad

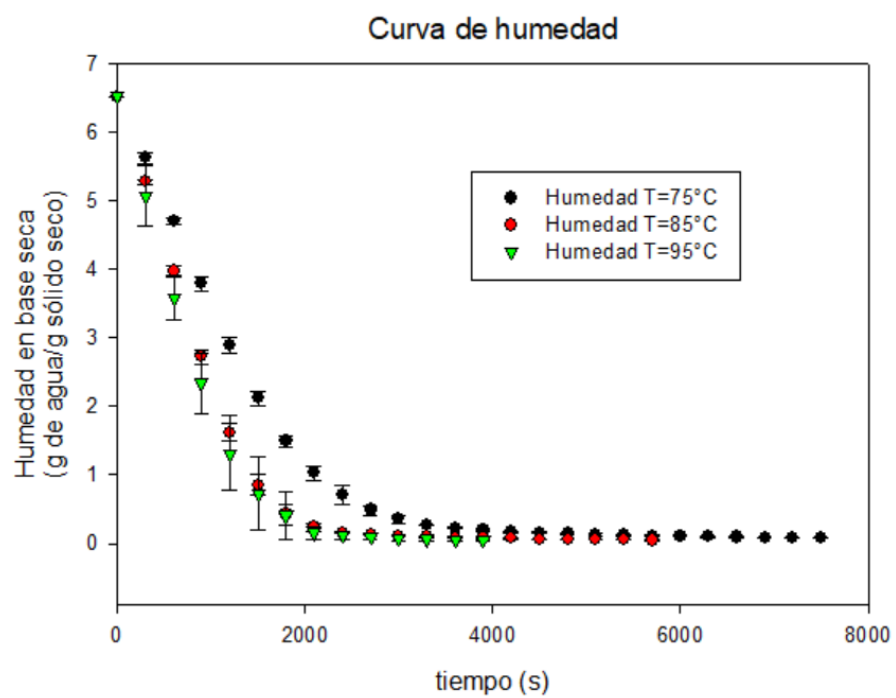


Figura 28. Curva de humedad

Anexo 3: Datos experimentales para curva de humedad

Tabla 7. Datos experimentales para curva de humedad en secado en VR a 75°C

t (min)	Masa _{i,1}	Masa _{i,2}	Masa _{i,3}	Masa _{f,1}	Masa _{f,2}	Masa _{f,3}
0	12.2356	12.1959	12.2049	10.0039	9.999	10.0089
5	10.923	11.0836	11.0714	8.6913	8.8867	8.8754
10	9.7426	9.8098	9.8333	7.5109	7.6129	7.6373
15	8.4519	8.6824	8.5956	6.2202	6.4855	6.3996
20	7.2348	7.5092	7.4131	5.0031	5.3123	5.2171
25	6.2331	6.4776	6.3539	4.0014	4.2807	4.1579
30	5.5048	5.6364	5.4297	3.2731	3.4395	3.2337
35	5.0341	4.9429	4.7373	2.8024	2.746	2.5413
40	4.3087	4.469	4.6423	2.077	2.2721	2.4463
45	4.307	4.1632	4.087	2.0753	1.9663	1.891
50	3.9717	3.9652	4.0672	1.74	1.7683	1.8712
55	3.9144	3.8672	3.8727	1.6827	1.6703	1.6767
60	3.845	3.8338	3.8452	1.6133	1.6369	1.6492
65	3.7961	3.7569	3.7981	1.5644	1.56	1.6021
70	3.7692	3.754	3.7603	1.5375	1.5571	1.5643
75	3.7524	3.7292	3.7447	1.5207	1.5323	1.5487
80	3.7239	3.7196	3.7187	1.4922	1.5227	1.5227
85	3.7135	3.7076	3.7034	1.4818	1.5107	1.5074
90	3.7022	3.6997	3.6984	1.4705	1.5028	1.5024
95	3.6973	3.6857	3.666	1.4656	1.4888	1.47
100	3.6867	3.6713	3.6578	1.455	1.4744	1.4618
105	3.681	3.6652	3.6514	1.4493	1.4683	1.4554
110	3.6754	3.6486	3.649	1.4437	1.4517	1.453
115	3.6714	3.6383	3.6392	1.4397	1.4414	1.4432
120	3.6665	3.636	3.6329	1.4348	1.4391	1.4369
125	3.6692	3.6334	3.6315	1.4375	1.4365	1.4355
130	3.6688	3.633	3.6512	1.4371	1.4361	1.4552

Tabla 8. Datos experimentales para curva de humedad en secado en VR a 85°C

t (min)	Masa_{i,1}	Masa_{i,2}	Masa_{i,3}	Masa_{f,1}	Masa_{f,2}	Masa_{f,3}
0	12.2157	12.1954	12.1933	10.0045	10.0003	9.9999
5	10.5556	10.5005	10.5954	8.3444	8.3054	8.402
10	8.7183	8.8199	8.8937	6.5071	6.6248	6.7003
15	7.0054	7.1907	7.2429	4.7942	4.9956	5.0495
20	5.5288	5.8523	5.6543	3.3176	3.6572	3.4609
25	4.5399	4.9054	4.5558	2.3287	2.7103	2.3624
30	3.9969	4.311	3.9554	1.7857	2.1159	1.762
35	3.8015	3.9368	3.7786	1.5903	1.7417	1.5852
40	3.7321	3.752	3.72	1.5209	1.5569	1.5266
45	3.7001	3.7	3.6898	1.4889	1.5049	1.4964
50	3.6974	3.6571	3.6682	1.4862	1.462	1.4748
55	3.6727	3.6371	3.6557	1.4615	1.442	1.4623
60	3.6578	3.6286	3.6438	1.4466	1.4335	1.4504
65	3.6504	3.6151	3.638	1.4392	1.42	1.4446
70	3.6289	3.6131	3.631	1.4177	1.418	1.4376
75	3.6254	3.6114	3.6109	1.4142	1.4163	1.4175
80	3.616	3.6064	3.6099	1.4048	1.4113	1.4165
85	3.6104	3.6048	3.5929	1.3992	1.4097	1.3995
90	3.6048	3.5911	3.5919	1.3936	1.396	1.3985
95	3.6031	3.5881	3.5814	1.3919	1.393	1.388

Tabla 9. Datos experimentales para curva de humedad en secado en VR a 95°C

t (min)	Masa_{i,1}	Masa_{i,2}	Masa_{i,3}	Masa_{r,1}	Masa_{r,2}	Masa_{r,3}
0	12.2125	12.2243	12.2142	10.0093	9.9999	10.0025
5	9.9256	10.9921	9.9601	7.7224	8.7677	7.7484
10	7.9731	8.8101	8.1399	5.7699	6.5857	5.9282
15	6.055	7.2491	6.6573	3.8518	5.0247	4.4456
20	4.5138	5.9735	5.38	2.3106	3.7491	3.1683
25	3.8048	5.2451	4.4901	1.6016	3.0207	2.2784
30	3.6736	4.61	3.9807	1.4704	2.3856	1.769
35	3.6359	3.9023	3.7081	1.4327	1.6779	1.4964
40	3.6239	3.7677	3.6869	1.4207	1.5433	1.4752
45	3.6026	3.7281	3.6528	1.3994	1.5037	1.4411
50	3.6018	3.6886	3.6237	1.3986	1.4642	1.412
55	3.5904	3.6662	3.6214	1.3872	1.4418	1.4097
60	3.5868	3.6492	3.6084	1.3836	1.4248	1.3967
65	3.5833	3.6455	3.6025	1.3801	1.4211	1.3908

Anexo 4: Curva de calibración

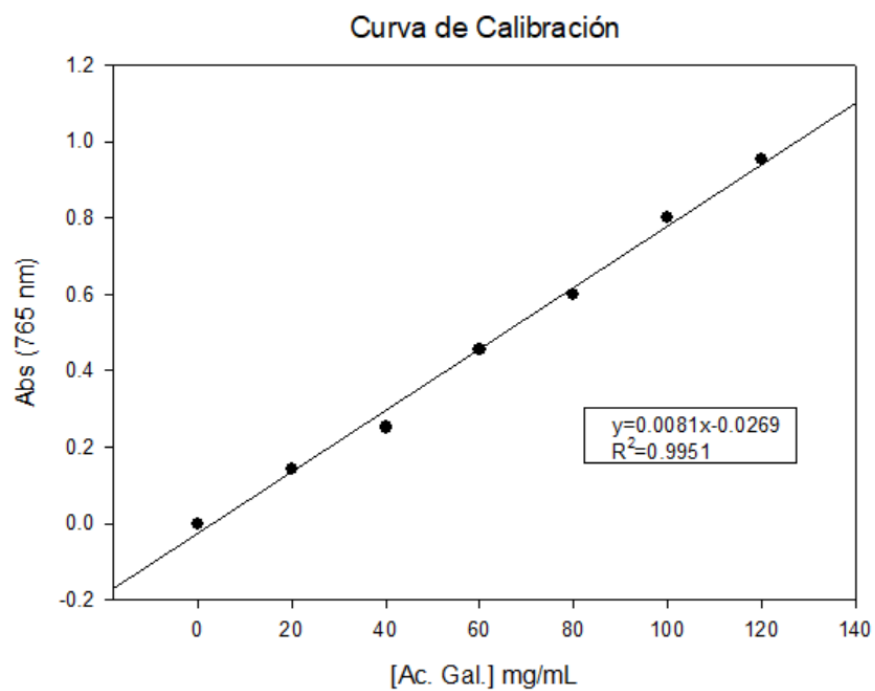


Figura 29. Curva de calibración

Anexo 5: Cálculo concentración polifenoles

Tabla 10. Resultados Absorbancia para cálculo de concentración de polifenoles

[Ac. Gal.] mg/ml	Absorbancia ₁	Absorbancia ₂	Absorbancia ₃	Promedio
120	1.092	0.786	0.982	0.953
100	0.844	0.765	0.791	0.800
80	0.508	0.593	0.697	0.599
60	0.495	0.369	0.508	0.457
40	0.268	0.269	0.219	0.252
20	0.18	0.093	0.153	0.142
0	0	0	0	0

$$\left[mg \frac{GAE}{L} \right] = \frac{Absorbancia}{A} \quad (17)$$

$$\left[mg \frac{GAE}{g \text{ b. h.}} \right] = \left[mg \frac{GAE}{L} \right] \cdot \frac{1L}{1000 \text{ ml}} \cdot 10 \text{ ml} \cdot V_{dilución} \cdot m_{dilución} \quad (18)$$

$$Factor \text{ humedad} = \frac{1}{1 - humedad} \quad (19)$$

$$\left[mg \frac{GAE}{g \text{ b. s.}} \right] = \left[mg \frac{GAE}{g \text{ b. h.}} \right] \cdot Factor \text{ humedad} \quad (20)$$