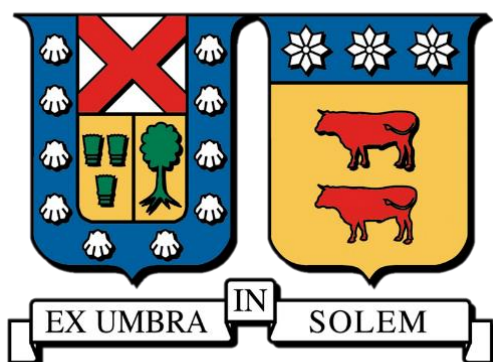


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AMBIENTAL
VALPARAISO – CHILE



**DISEÑO Y DESARROLLO DE UN SISTEMA DE SECADO
DE VENTANA REFRACTIVA ACOPLADO CON VACÍO:
ELABORACIÓN DE POLVOS BIOACTIVOS DE FRUTAS.**

RODRIGO ERIC RETAMAL VILLARROEL

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL QUÍMICO

PROFESOR GUÍA: Dr. CRISTIAN RAMÍREZ BUSTOS

PROFESOR CORREFERENTE: Dr. SERGIO ALMONACID

NOVIEMBRE – 2023



AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría agradecer a mis padres, quienes me acompañaron durante todo el transcurso de mi educación y también agradecerles por apoyarme en mis días de cansancio y estrés.

Agradecer a mi profesor guía Cristian Ramírez por su disposición a ayudar y aportar ideas para el desarrollo de este trabajo, así como también a mi profesor Sergio Almonacid quien hizo que despertara mi interés por el área de alimentos. También a la gente de pañol, por ayudar en el diseño y detalles constructivos de este trabajo.

Un agradecimiento a Jamill Elitin y todos mis compañeros del laboratorio de alimentos, quienes fueron siempre un gran apoyo durante este último año.

A mi novia y mis amigos de la universidad por los lindos e inolvidables momentos vividos durante mi trayecto en la universidad, muchas gracias y espero que sigamos juntando más recuerdos en esta nueva etapa de nuestras vidas. Gracias a mi gato Chayanne por despertarme en las mañanas y recibirme en las noches al llegar a casa.

Finalmente, un agradecimiento al proyecto FONDECYT N°1230506 por el financiamiento de este trabajo.

RESUMEN

El secado es una de las técnicas más utilizadas para la conservación en la industria de los alimentos. Es natural que a lo largo de los años las tecnologías de secado vayan evolucionando durante la búsqueda de mayor eficiencia y calidad en sus productos, especialmente en el contenido de compuestos bioactivos que son considerados beneficiosos para la salud. El desarrollo de tecnologías es de suma importancia en la actualidad, es por esto que la presente investigación pone su foco en el diseño y desarrollo de un sistema híbrido, el cual acopla la tecnología de ventana refractiva con el secado al vacío (VRV).

El sistema desarrollado consta de un baño termorregulado, una cámara de vacío, una trampa de vapor, un regulador de presión y una bomba de vacío. Este se compara con la ventana refractiva (VR) y el liofilizado, el cual fue usado como estándar de calidad. Para producir polvo de manzana, se secó muestras de pomasa de manzana de 3 mm de espesor utilizando la VR a 65, 75 y 85°C a presión atmosférica y la VRV a las mismas temperaturas, a 0.15, 0.25 y 0.45 bar de presión de vacío. Se registro los perfiles de temperatura en distintos puntos de la VR y VRV durante el secado y se midió el tiempo de secado, actividad de agua, humedad, distribución de tamaño, sólidos solubles totales, color, contenido de polifenoles y la actividad antioxidante del producto final, adicionalmente se midió el contenido de fibra dietética para una sola condición de operación.

Los resultados obtenidos muestran que los tiempos de secado con la VRV se redujeron entre un 17 y 25% con respecto a la VR al aplicar una presión de vacío de 0.45 bar. Además, partir de los datos experimentales se logró validar el modelo difusivo propuesto por Crank, obteniendo un R^2 entre 0.973 y 0.995. Con respecto a los perfiles de temperatura, se observa que la temperatura del mylar de la VRV es cerca de 10°C mayor que en la VR para una misma temperatura del agua.

En general la VR y VRV obtuvieron resultados similares para actividad de agua, humedad, distribución de tamaño y sólidos solubles totales. El análisis de color mostró grandes diferencias entre el liofilizado y las otras tecnologías, siendo poco apreciable la diferencia de color entre la VR y VRV, a excepción del secado con VRV a 85°C y 0.45 bar el cual obtuvo color más cercano al liofilizado ($\Delta E=3.1\pm0.1$). Con respecto a los polifenoles, la VRV presentó valores similares al liofilizado, no así la VR. Por otro lado, con respecto a la actividad antioxidante, tanto la VR como la VRV presentaron valores similares al liofilizado. El mayor contenido de polifenoles y de actividad antioxidante entre la VR y VRV se consiguió con la VRV a 65°C y 0.45 bar, obteniéndose 5.84 ± 0.29 mg GAE/g_{bs} y 50.0 ± 1.30 μ mol TE/g_{bs} respectivamente, mientras que el contenido de fibra dietaria a estas mismas condiciones fue de 43.8 g/100g, siendo 32.4 g fibra insoluble y 11.4 g fibra soluble.



ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN.....	9
1.1. Objetivos.....	10
1.1.1 Objetivo General.....	10
1.1.2 Objetivos específicos.....	10
2. MARCO TEÓRICO	11
2.1. Deshidratación de los alimentos	11
2.2. Técnicas de deshidratación	11
2.2.1 Secado por ventana refractiva.....	12
2.2.2 Secado al vacío	13
2.2.3 Secado por liofilización.....	15
2.2.4 Tecnologías híbridas.....	16
2.3. Procesos difusivos.....	16
2.4. Modelo difusivo de Crank	17
2.5. Pomasa de manzana	18
2.6. Pretratamiento para Deshidratación de alimentos.....	19
2.6.1 Escaldado.....	19
2.6.2 Acidificación	19
2.7. Parámetros fisicoquímicos	19
2.7.1 Actividad de agua	19
2.7.2 Tamaño de partícula	20
2.7.3 Sólidos solubles totales.....	20
2.7.4 Color	21
2.7.5 Compuestos fenólicos y actividad antioxidante	22
2.7.6 Fibra dietaria.....	23
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	25
3.1. Diseño del sistema de secado.....	25
3.1.1 Fundamento teórico	29



3.2.	Diseño experimental	30
3.3.	Metodología	32
3.3.1	Materia prima	32
3.3.2	Secado.....	32
3.3.2.1	Ventana refractiva	32
3.3.2.2	Ventana refractiva acoplada con vacío	33
3.3.2.3	Liofilizador	34
3.3.3	Perfil de temperatura	35
3.3.4	Molienda y caracterización.....	36
3.3.5	Almacenamiento	36
3.3.6	Determinación de actividad de agua.....	36
3.3.7	Determinación de humedad	36
3.3.8	Determinación de sólidos solubles totales.....	37
3.3.9	Determinación de Color.....	37
3.3.10	Determinación de Polifenoles.....	38
3.3.11	Determinación de actividad antioxidante	39
3.3.12	Determinación de fibra dietaria	40
3.3.13	Análisis estadístico	40
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	41
4.1.	Perfiles de temperatura	41
4.2.	Actividad de agua y tiempo de secado.....	42
4.3.	Curvas de secado y humedad final	44
4.4.	Distribución de tamaño	48
4.5.	Sólidos solubles totales.....	50
4.6.	Color	51
4.7.	Polifenoles	55
4.8.	Actividad antioxidante	57
4.9.	Fibra dietética	58
5.	CONCLUSIONES.....	60
6.	RECOMENDACIONES	61

7.	REFERENCIAS	62
8.	ANEXOS	69
8.1.	Anexo 1: Perfiles de temperatura.....	69
8.2.	Anexo 2: Curvas de actividad de agua.....	75
8.3.	Anexo 3: Curva de calibración ácido gálico equivalente.....	77
8.4.	Anexo 4: Curva de calibración trolox equivalente	77
8.5.	Anexo 5: Promedio de datos experimentales.....	78

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1:	Secadores desarrollados durante la historia, (Kumar et al., 2021).....	12
Tabla 2:	Constantes de Antoine para el agua, (Banat, 1994)	15
Tabla 3:	Composición de la pomasa de manzana (Shalini & Gupta, 2009).....	18
Tabla 4:	Criterio de diferencia de color, (Mujumdar & Chen, 2008).....	22
Tabla 5:	Clasificación de compuestos fenólicos de la manzana (Feng et al., 2021)	23
Tabla 6:	Composición de la fibra dietaria (Arroyo et al., 2008)	24
Tabla 7:	Balance de masa del agua del sistema.....	30
Tabla 8:	Diseño experimental.....	31
Tabla 9:	Resumen perfiles de temperatura	41
Tabla 10:	Tiempo de secado de experimentos con VR y VRV.....	44
Tabla 11:	Difusividad efectiva y coeficiente de correlación entre las MR experimentales y teóricas.....	47
Tabla 12:	Humedad en de polvo de manzana secado con VR, VRV y liofilizado	48
Tabla 13:	Diámetro medio (d50) del polvo de manzana	49
Tabla 14:	Parámetros del espacio CIELAB en el polvo de manzana.....	53
Tabla 15:	Fibra dietaria en polvo de manzana secado con VRV	58
Tabla 16:	Promedio de datos experimentales.....	78

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Dibujo esquemático del secado por ventana refractiva (VR)	12
Figura 2: Diagrama esquemático de los mecanismos de transferencia de energía en un sistema de ventana refractiva (VR), (Adaptado de Nindo & Tang, 2007)	13
Figura 3: Curva de equilibrio líquido-vapor del agua	14
Figura 4: Espacio de color del sistema CIELAB, (Konica Minolta, 2022)	21
Figura 5: Interacción entre radicales libres y antioxidantes, (Adaptado de Coronado et al, 2015).....	23
Figura 6: Esquema del sistema de secado con ventana refractiva acoplada con vacío (VRV)	25
Figura 7: Baño termorregulado marca Mermmet, modelo WNB	25
Figura 8: Perforación en tapa de acrílico	26
Figura 9: Tapa de desecador instalada en cámara de vacío.....	26
Figura 10: Fondo de cámara de vacío	27
Figura 11: Trampa de vapor	27
Figura 12: Regulador de presión del sistema	28
Figura 13: Bomba de vacío de doble etapa modelo VP6D*	28
Figura 14: Secado por ventana refractiva (VR)	33
Figura 15: Secado por ventana refractiva acoplada con vacío (VRV).....	34
Figura 16: Secado por liofilización	35
Figura 17: Esquema de la medición del perfil de temperatura del sistema.....	35
Figura 18: Actividad de agua en polvo de manzana secado con VR, VRV y liofilizado ...	43
Figura 19: Curva de secado experimental y teórica en VR a 65,75 y 85°C	45
Figura 20: Curva de secado experimental y teórica en VR y VRV a 65°C.....	45
Figura 21: Curva de secado experimental y teórica en VR y VRV a 75°C.....	46
Figura 22: Curva de secado experimental y teórica en VR y VRV a 85°C.....	46
Figura 23: Fracciones de polvo de manzana posterior al tamizado	49
Figura 24: Distribución de tamaño de partícula del polvo	50
Figura 25: Curva granulométrica del polvo	50

Figura 26: Sólidos solubles totales en de polvo de manzana secado con VR, VRV y liofilizado.....	51
Figura 27: Polvo de manzana liofilizado (referencia).....	52
Figura 28: Polvo de manzana a 65°C y Atmosférica, 0.15, 0.25 y 0.45 bar de presión de vacío, respectivamente.....	52
Figura 29: Polvo de manzana a 75°C y Atmosférica, 0.15, 0.25 y 0.45 bar de presión de vacío, respectivamente.....	52
Figura 30: Polvo de manzana a 85°C y Atmosférica, 0.15, 0.25 y 0.45 bar de presión de vacío, respectivamente.....	53
Figura 31: Diferencia de color en polvo de manzana secado con VR y VRV	54
Figura 32: Polifenoles totales en polvo de manzana secado con VR, VRV y liofilizado...	56
Figura 33: Actividad antioxidante en polvo de manzana secado con VR, VRV y liofilizado	57
Figura 34: Perfil de temperatura a 65°C y presión atmosférica	69
Figura 35: Perfil de temperatura a 65°C y 0.15 bar de presión de vacío.....	69
Figura 36: Perfil de temperatura a 65°C y 0.25 bar de presión de vacío.....	70
Figura 37: Perfil de temperatura a 65°C y 0.45 bar de presión de vacío.....	70
Figura 38: Perfil de temperatura a 75°C y de presión atmosférica.....	71
Figura 39: Perfil de temperatura a 75°C y 0.15 bar de presión de vacío.....	71
Figura 40: Perfil de temperatura a 75°C y 0.25 bar de presión de vacío.....	72
Figura 41: Perfil de temperatura a 75°C y 0.45 bar de presión de vacío.....	72
Figura 42: Perfil de temperatura a 85°C y de presión atmosférica.....	73
Figura 43: Perfil de temperatura a 85°C y 0.15 bar de presión de vacío.....	73
Figura 44: Perfil de temperatura a 85°C y 0.25 bar de presión de vacío.....	74
Figura 45: Perfil de temperatura a 85°C y 0.45 bar de presión de vacío.....	74
Figura 46: Curva de actividad de agua en VR a 65, 75 y 85°C.....	75
Figura 47: Curva de actividad de agua en VR y VRV a 65°C	75
Figura 48: Curva de actividad de agua en VR y VRV a 75°C	76
Figura 49: Curva de actividad de agua en VR y VRV a 85°C	76
Figura 50: Curva de calibración ácido gálico equivalente	77
Figura 51: Curva de calibración trolox equivalente	77

1. INTRODUCCIÓN

El secado es uno de los métodos más utilizados para la conservación de alimentos a través de los tiempos, ya que esta depende de su contenido de humedad. Las primeras técnicas de secado se basaban en secar utilizando el calor del sol, pero debido a las limitaciones de este en climas templados y la posibilidad de contaminación, se han desarrollado una variedad de tecnologías a lo largo de los años con el objetivo de mejorar la eficiencia del secado y la calidad de los productos (Bazyma & Kutovoy, 2005).

Una de las tecnologías que se han desarrollado es de ventana refractiva (VR), este es un secador de cuarta generación que se ha destacado al presentar una muy alta retención del color, aroma, compuestos antioxidantes y propiedades nutricionales. Esta tecnología se basa en secar el producto a través de una fina lámina de plástico transparente (mylar) utilizando todos los métodos de transferencia de calor (conducción, convección y radiación). A pesar de producir alimentos de alta calidad, la temperatura de secado, tiempos, costos y energía consumida por esta tecnología son menores que otras tecnologías como el secado por tambor, liofilización, aspersión o por bandeja (Kumar et al., 2021).

Otra tecnología es la de secado al vacío, esta es ampliamente utilizada en las industrias químicas, farmacéuticas y alimentaria para procesar materiales o alimentos termosensibles. Esta tecnología se basa en adicionar calor indirectamente a través de una pared o por radiación, mientras que se mantiene una condición de presión reducida. Las presiones más bajas ayudan a una evaporación más rápida del agua, lo que permite también utilizar temperaturas más bajas cuando es requerido, generalmente en el rango entre 30 y 80°C. (Bazyma & Kutovoy, 2005).

Por otro lado, las frutas y vegetales han demostrado ser esenciales para una dieta balanceada, incluso hay investigaciones clínicas que asocian las dietas ricas en frutas y vegetales con la reducción en el riesgo de padecer una serie de enfermedades, y se cree que esto es principalmente debido a sus compuestos bioactivos como la fibra, vitaminas, minerales y compuestos fenólicos. Debido a su alto contenido de humedad, las frutas y verduras son productos que se deterioran en cortos períodos de tiempo si no se manejan correctamente, por lo que el secado de estas se ha convertido en una práctica común para preservarlas. Más aún, las frutas y verduras deshidratadas y sus aplicaciones en forma de polvo se han vuelto un producto de interés para la industria alimentaria (Karam et al., 2016).

La pomasa de manzana es el subproducto que se obtiene de la manzana después de extraer el jugo. Se producen cerca de 3.8 millones de toneladas de este subproducto al año y

estas son desechadas, generando altos costos y problemas de contaminación, ya que debido a su gran contenido de humedad es altamente fermentable (Cruz et al., 2018). Sin embargo, algunas investigaciones han intentado encontrar usos para la pomasa de manzana, ya que esta mantiene la mayoría de los compuestos bioactivos presentes en la manzana, siendo los más importantes la fibra y los compuestos fenólicos responsables de su alta actividad antioxidante (Shalini & Gupta, 2009). Se han encontrado muchos usos potenciales que aún están en estudio o se efectúan a pequeña escala debido a la viabilidad económica, siendo uno de estos la incorporación de pomasa de manzana en polvo a los productos horneados para aumentar su contenido nutricional (Carson, et al., 1994).

En este trabajo se desarrolla un sistema que acople la ventana refractiva con el secado al vacío, buscando que esta tecnología híbrida logre un secado más rápido y la producción de un polvo de pomasa de manzana con mayor cantidad de compuestos bioactivos que la ventana refractiva convencional, además de compararlo con el polvo de manzana liofilizado, el cual será utilizado como estándar de calidad.

1.1. Objetivos

1.1.1 Objetivo General

Desarrollar un sistema secado híbrido utilizando ventana refractiva acoplada con vacío, para obtener pomasa de manzana en polvo y evaluar sus compuestos bioactivos.

1.1.2 Objetivos específicos

- Establecer el tiempo de secado requerido para alcanzar una actividad de agua (a_w) de 0.4 para cada una de las condiciones de operación.
- Obtención de curvas de secado bajo diferentes condiciones de operación ventana refractiva (VR) y ventana refractiva con vacío (VRV), y validar el modelo de difusividad propuesto por Crank.
- Analizar el tiempo de secado ($a_w < 0.4$) y propiedades fisicoquímicas (tamaño, color, humedad, actividad de agua, sólidos solubles, polifenoles totales, actividad antioxidante) del polvo de manzana obtenido con VR y VRV a distintas condiciones de operación.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Deshidratación de los alimentos

La deshidratación de los alimentos es un proceso utilizado en la industria alimentaria para detener el crecimiento bacteriano e inactivar procesos enzimáticos, con el objetivo de alargar la vida útil y conservar la calidad de los alimentos sin necesidad de refrigerarlos.

El primer método conocido para la conservación de los alimentos es el secado. El proceso de secado es por definición el proceso simultáneo de transferencia de calor y materia para extraer el agua de los alimentos. Se suministra calor al producto ya sea de forma directa o indirecta, evaporándose el agua de la superficie de este y posteriormente el agua interna se mueve a la superficie. Los alimentos secos obtenidos son sabrosos, saludables y fáciles de almacenar o transportar, sin embargo, dependiendo del método, temperatura y tiempo de secado se ven afectadas sus propiedades organolépticas y valor nutricional (Ahmed et al., 2013; Kumar et al., 2021).

2.2. Técnicas de deshidratación

Históricamente, las frutas, carnes, cereales y hierbas han sido secadas por medio del sol, el viento o humo. Para mejorar la calidad de los productos, las técnicas de secado tradicionales se han ido sustituyendo por secadores industriales, como los secadores por liofilización o por convección con aire caliente. El secado por liofilización puede generar productos de muy alta calidad, sin embargo, este es un método costoso, lo que limita su aplicación a escala industrial (Doymaz, 2010). Por otro lado, el secado por convección de aire caliente es uno de los métodos de secados más antiguos y utilizados en la industria, más del 85% de los secadores industriales son de este tipo, sin embargo, este también presenta grandes desventajas como su alto consumo energético, una lenta transferencia de calor y largos tiempos de secado, degradando color, sabor y propiedades nutricionales. Debido a estas dificultades se requieren métodos de secado más rápidos, seguros y controlables que también generen productos de mayor calidad para cumplir los estándares del mercado (Zarein et al., 2015).

De hecho, se han diseñado muchos tipos de secadores para intentar superar las distintas limitaciones que se han presentado a lo largo de los años, las cuales son principalmente los altos costos iniciales del equipo, el requerimiento de un espacio amplio, la capacidad de producción, costos de mantenimiento, limitación a productos específicos, pérdida de aroma, color y compuestos bioactivos, falta de control sobre los parámetros operacionales y la lentitud del proceso.

Los secadores desarrollados a lo largo de la historia se pueden clasificar en cuatro grupos, de primera, segunda, tercera y cuarta generación como se muestra en la **Tabla 1**.

Durante el desarrollo de todos estos secadores se dio énfasis a la calidad del producto, temperatura, tiempo y eficiencia del secado (Kumar et al., 2021).

Tabla 1: Secadores desarrollados durante la historia, (Kumar et al., 2021)

1° Generación	2° Generación	3° Generación	4° Generación
Secador de horno	Secador de spray	Liofilizador	Secador microondas
Secador de bandeja	Secador de lecho fluidizado	Secador osmótico	Secador de radiofrecuencia
Secador de bandejas de camión	Secador flash		Secador de ventana refractiva
Secador rotatorio	Secador de tambor		
Secador de túnel			

2.2.1 Secado por ventana refractiva

El secado por ventana refractiva (VR) fue patentado por Magoon en 1986 y desarrollado por MCD technologies Inc. (Tacoma, Washington, USA). Este es uno de los métodos más recientes para secar productos termosensibles como rodajas o pulpas de frutas y vegetales (Ortiz-Jerez et al., 2015). Esta técnica se asocia con eficiencia energética y mejor retención de color, sabor y compuestos bioactivos a un menor costo de equipamiento y operación en comparación con secados convencionales (Asiimwe et al., 2022; Nindo & Tang, 2007).

En la **Figura 1** se representa un sistema batch de ventana refractiva, utilizando un baño termorregulado para mantener la temperatura del agua constante.

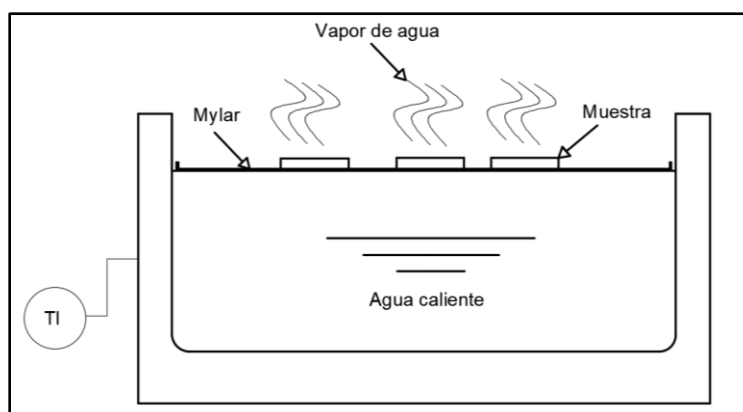


Figura 1: Dibujo esquemático del secado por ventana refractiva (VR)

En el secado por VR el producto a secar se deposita la parte superior de una película de plástico transparente o mylar, generalmente hecho de tereftalato de polietileno (PET), mientras que por la superficie inferior del mylar está en contacto directo con agua caliente como fuente de energía térmica.

La transferencia de calor en el secado por VR se produce a través de los mecanismos de conducción (q_{cond}), convección (q_{conv}), y radiación (q_{rad}) (Nindo & Tang, 2007). Para el caso del sistema batch de ventana refractiva, la energía térmica del agua es transmitida a través del mylar hacia el alimento solo por conducción y radiación, mientras que la humedad evaporada de los alimentos es transportada por el aire que fluye sobre estos como se muestra en la **Figura 2**.

La mayor parte de energía se transfiere por el mecanismo de conducción, ya que la incidencia de la radiación depende del espesor y de la humedad del alimento, por lo que a medida que se va secando, el índice de refracción incrementa, reflejando la mayoría de la radiación de vuelta al agua, aportando menos del 5% del calor total transferido (Ortiz-Jerez & Ochoa-Martínez, 2015). Para el caso de las pulpas, se recomienda secar muestras con espesores cercanos a los 3 mm, el cual resultó ser la condición eficiente entre 2, 3 y 5 mm según estudios (Zotarelli et al., 2015).

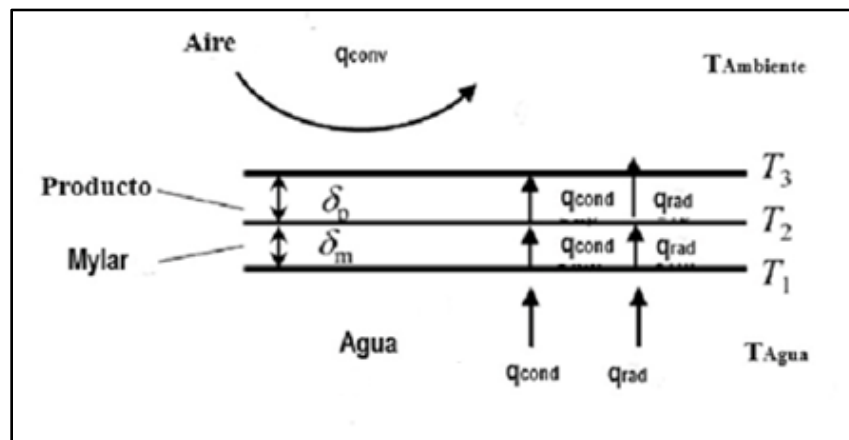


Figura 2: Diagrama esquemático de los mecanismos de transferencia de energía en un sistema de ventana refractiva (VR), (Adaptado de Nindo & Tang, 2007)

2.2.2 Secado al vacío

El secado al vacío es un proceso en el que se seca un material en un ambiente de presión reducida. Los secadores al vacío son secadores de calor indirecto, es decir, que el calor se transfiere al material en el momento en que este entra en contacto con una superficie calentada, secando el material por conducción y en algunos casos también por radiación.

Una amplia variedad de productos en el mercado, son sensibles al calor o al oxígeno, deteriorando sus propiedades originales. Por lo cual, el secado al vacío ofrece ciertas ventajas que pueden ayudar a mejorar la calidad y valor nutritivo de los productos secados.

Algunas de las ventajas proporcionadas por esta tecnología son el control de la presión y temperatura del proceso, al disminuir la presión, disminuye también la temperatura de ebullición del líquido, permitiendo remover la humedad del material a menores temperaturas que a presión atmosférica (**Figura 3**). Los secadores al vacío generalmente utilizan vacíos absolutos menores a 0.15 bar buscando la ebullición con un rango de temperaturas entre 30 y 60°C (Rajkumar et al., 2007; Mauro et al., 2004), mientras que, en otros casos en los que no se busca la ebullición, se utilizan vacíos absolutos cercanos a 0.5 bar con un rango de temperaturas entre 40 y 80°C (Almeida-Transviña et al., 2014). Además, al proporcionar un ambiente con oxígeno reducido, minimiza la posibilidad de reacciones de oxidación, mejorando la calidad de los productos. Por último, condensa y contiene compuestos peligrosos que se evaporen del producto seco, evitando que estos sean una amenaza para los trabajadores o el ambiente (Parikh, 2015).

Por otro lado, el secado al vacío también presenta limitaciones. Una de las características más buscadas en los secados es una alta remoción de la humedad del material con un bajo consumo energético. En este caso, el secado al vacío requiere de equipos adicionales, principalmente de una bomba de vacío, la cual es la principal responsable del nivel de vacío dentro del equipo, teniendo un alto consumo energético en relación con otras tecnologías de secado (Motevali et al., 2011). Otra limitación es que la temperatura alcanzada en secadores al vacío está limitada por la superficie disponible para la transferencia de calor, a diferencia de los métodos de secado directos. Por último, estos secadores operan principalmente de forma batch, por lo que incorporarlo en un sistema productivo continuo presenta ciertas dificultades.

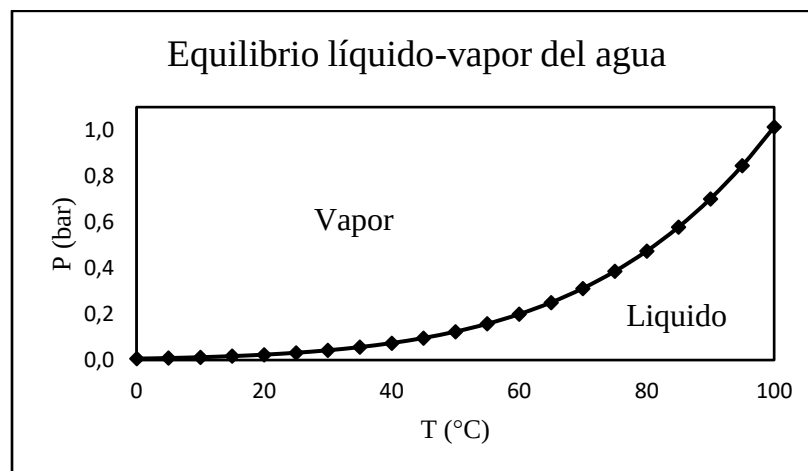


Figura 3: Curva de equilibrio líquido-vapor del agua

En la **Figura 3**, se observa la curva de temperatura de equilibrio líquido-vapor del agua obtenida de la ecuación de Antoine, la cual corresponde a la **Ecuación 1**.

$$\log_{10}(P) = A - \frac{B}{T + C} \quad (1)$$

Donde:

- P es la presión de equilibrio, mm Hg.
- T es la temperatura de equilibrio, °C.
- A, B, C son constantes específicas del fluido.

En la **Tabla 2** se encuentran los valores de las constantes de Antoine para el agua.

Tabla 2: Constantes de Antoine para el agua, (Banat, 1994)

A	B	C
8.07131	1730.63	233.426

2.2.3 Secado por liofilización

Este método de secado es un caso de secado al vacío realizado a una temperatura por debajo del punto triple del agua, por lo que el agua se sublima y pasa directamente desde hielo a vapor manteniendo la estructura del producto casi intacta.

La liofilización cuenta con tres etapas, congelación, secado primario y secado secundario. En la congelación, el producto es enfriado hasta temperaturas menores a las de solidificación, al final de esta fase, dependiendo del material, entre el 65% y 90% del agua está congelada, el resto del agua corresponde al agua absorbida o ligada.

En el secado primario el material se coloca en una cámara de vacío a presiones muy bajas en las que se permite la sublimación del agua congelada. Sin embargo, cuando las moléculas de hielo son sublimadas la temperatura del material se reduce debido al calor latente de sublimación del hielo, por lo que para que la presión de vapor del agua a la temperatura del material no alcance el equilibrio con la presión de vapor de la cámara de vacío se debe incluir una fuente de calor por conducción, convección o radiación, de otra forma el proceso de sublimación se detendrá. Sin embargo, la cantidad de calor suministrado tiene una limitación y esta tiene relación con la máxima temperatura que puede tolerar el material sin sufrir deterioros en su estructura, color y propiedades bioactivas.

El secundario comienza cuando toda el agua congelada se ha sublimado, en esta etapa se remueve el agua ligada del material que no se congeló, la cual es entre el 10% y 35% del agua inicial del material, sin embargo, su remoción puede tardar tanto como la del agua libre. La remoción del agua ligada se realiza calentando el material entre 10°C y 35°C para materiales termosensibles y 50°C para materiales menos termosensibles, siendo vapor de agua desorbido transportado a través de los poros del material que se seca. La humedad restante al final del proceso es crítica para su almacenamiento, esta generalmente es entre 2% y 0,1%.

Este secado es considerado uno de los más caros, ya que requiere de una alta inversión y tiene un alto consumo energético en comparación a los secados convencionales, pero genera un producto con una muy buena calidad y retención de sus nutrientes (Mujumdar & Chen, 2008).

2.2.4 Tecnologías híbridas

Las tecnologías híbridas contemplan la implementación de diferentes métodos de transferencia de calor, dos o más etapas de un mismo método de transferencia de calor o la implementación de diferentes tipos de tecnologías. Estas se estudian con el objetivo de obtener los beneficios de ambas tecnologías o métodos, buscando así mejorar la calidad y la eficiencia del proceso de secado en lo que respecta a energía y tiempo utilizado.

La cantidad de combinaciones es basta y sigue incrementando a medida que se realizan más estudios, algunas tecnologías prometedoras recientemente estudiadas son el secado asistido por ondas electromagnéticas, ultrasonido o infrarrojo. De la misma forma, la tecnología de vacío se ha acoplado a los distintos equipos de secado de la industria (horno, tambor, rotatorio, spray, microondas), creando así una variedad de secadores al vacío, los cuales han resultado en menores costos de energía y productos de mejor calidad de producto (Bazyma & Kutovoy, 2005).

2.3. Procesos difusivos

El secado es un proceso difusivo, la difusión es el movimiento de materia que ocurre por una diferencia de concentración, temperatura o presión. En este fenómeno, las partículas se movilizan desde una región de alta concentración a una región de menor concentración para alcanzar el equilibrio. El modelo fenomenológico más conocido para representar la difusión es el modelo de Crank, el cual es un conjunto de soluciones de la segunda ley de Fick para diferentes geometrías, condiciones de contorno y condiciones iniciales (Simpson et al., 2015).

2.4. Modelo difusivo de Crank

Como se mencionó, el modelo de Crank proviene de la segunda ley de Fick, la cual se muestra en la **Ecuación 2**.

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

Donde:

- D_{eff} es el coeficiente de difusión, (m^2/s).
- C es el contenido de humedad del producto, (kg agua/kg producto).
- T es el tiempo, (s).
- x : Distancia en la dirección de la transferencia de masa, (m).

Crank resuelve esta ecuación utilizando como supuesto que la difusión es unidireccional, un coeficiente de difusión constante y que una lámina de alimento se comporta como placa infinita, es decir, que la humedad del alimento se mueve desde el centro hasta la superficie por diferencia de concentración. Además, el modelo no considera el encogimiento de la muestra o cualquier resistencia al transporte de masa (Crank, 1975). Finalmente, el modelo presentado por Crank corresponde a la **Ecuación 3**.

$$MR = \frac{C(t) - C_{eq}}{C_0 - C_{eq}} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} e^{-D_{eff} \left(\frac{(2n-1)\pi}{2L} \right)^2 t} \quad (3)$$

Donde:

- MR es la humedad adimensional.
- $C(t)$ es el contenido de humedad en el tiempo, (t).
- C_{eq} es el contenido de humedad en equilibrio.
- C_0 es el contenido de humedad inicial.
- L es el espesor de la muestra, (m).

En casos de realizar un análisis para tiempos largos de secado, la ecuación puede ser simplificada a los primeros términos de la serie, como se muestra en la **Ecuación 4**. Esto logra un cálculo más simple sin perder precisión en los resultados.

$$MR = \frac{C(t) - C_{eq}}{C_0 - C_{eq}} = \frac{8}{\pi^2} \left[\exp \left(-D_{eff} \cdot t \cdot \left(\frac{\pi}{2L} \right)^2 \right) \right] \quad (4)$$

Sin embargo, en el caso de frutas y vegetales, la solución de esta ecuación suele no ajustarse de buena forma a los datos obtenidos experimentalmente debido a que muchos de los supuestos no se ajustan a la naturaleza compleja de los tejidos vegetales, la contracción y cambios de volumen debido a la pérdida de agua durante el secado y los complejos procesos de transferencia de masa (Simpson et al, 2015).

2.5. Pomasa de manzana

La manzana se ha convertido en uno de los frutos más cultivados en el mundo debido a su alto valor nutricional. La producción mundial de manzanas el año 2022 fue de 78,8 millones de toneladas (Iqonsulting, 2023), las que en su mayoría son consumidas como fruta fresca, por otro lado, entre un 25 y 30% son convertidas en distintos productos por la industria, tales como jugo de manzana, chips, sidra o vinagre.

El jugo de manzana es el segundo más popular a nivel mundial después del jugo de naranja, siendo la industria del jugo es la que tiene mayor participación en el procesamiento de manzanas, abarcando un 65% del total de productos procesados de manzana. Durante la extracción del jugo se genera como principal subproducto la pomasa de manzana, representando aproximadamente el 25% del peso de la manzana fresca (Cruz et al., 2018), por lo que la industria del jugo genera aproximadamente 3.8 millones de toneladas de pomasa de manzana al año, la cual es considerada un desperdicio y se elimina principalmente en vertederos, adicionando un costo para el productor y al mismo tiempo generando un problema medioambiental.

La pomasa de manzana corresponde a los restos fibrosos de pulpa, la cáscara, semillas y tallos de la fruta que sobra luego de extraer el jugo, esta contiene típicamente entre un 66.4 y 78.2% de humedad (Shalini & Gupta, 2009). A pesar de ser desechada por la industria, la pomasa de manzana es una muy buena fuente de carbohidratos, fibra dietética, azúcares fermentables, vitaminas, minerales y compuestos fenólicos. En la **Tabla 3** se aprecia los componentes principales de la pomasa de manzana, siendo las sustancias más importantes la fibra y los compuestos fenólicos responsables por la actividad antioxidante.

Tabla 3: Composición de la pomasa de manzana (Shalini & Gupta, 2009)

Composición	Cantidad (%)
Humedad	66.4-78.2
Carbohidratos	9.5-22.0
Proteína	4.0
Azúcares	3.6
Celulosa	6.8
Ceniza	0.38
Ácidos	0.42
Calcio	0.0087

Afortunadamente, a pesar de ser considerada un desecho, ya se han hecho esfuerzos por aprovechar este subproducto. En los últimos años se ha encontrado diversos usos para la pomasa de manzana, tales como:

- Uso de pomasa fresca o seca como alimento para el ganado.
- Como biocombustible para la generación de vapor.
- Producción de etanol por medio de la fermentación de la pomasa.
- Recuperación de pectina, para su uso en la industria alimentaria y farmacéutica.
- Incorporación de polvo de pomasa en productos horneados, para aumentar el contenido nutricional en los alimentos.

2.6. Pretratamiento para Deshidratación de alimentos

2.6.1 Escaldado

Consiste en la inmersión del producto en trozos en agua caliente durante un tiempo de 3 a 5 minutos, luego, sumergir en agua fría para cortar el efecto del calor. Este proceso permite ablandar tejidos, reducir cargas microbianas e inactivar enzimas responsables del pardeamiento (Quizama & Ciccioli, 2021). Existen estudios con diversas combinaciones de temperaturas y tiempos de escaldado, Lin & Brewer, (2005) y Heras-Ramírez et al., (2012) utilizan tiempos de escaldado de 4 minutos a 90°C y 86°C, mientras que García & Guerrero, (2014) utiliza tiempos de escaldado de 1,5 y 2,5 minutos a temperaturas cercanas a 100 °C. De cualquier forma, Zhu et al., (2010) indica que realizar un escaldado a temperaturas menores a 70°C resulta en tiempos muy largos de escaldado, mientras que temperaturas sobre 80°C logran más rápidamente la inactivación enzimática.

2.6.2 Acidificación

Consiste en la inmersión del producto en trozos en una solución de ácido ascórbico y cítrico, durante 2 o 3 minutos. Esto logra neutralizar las enzimas que provocan el pardeamiento por oxidación y minimizar las pérdidas de vitamina A y C (Quizama & Ciccioli, 2021). La concentración de los ácidos varía según estudios, Moreno et al., (2011) recomienda la utilización de una solución con concentraciones de 2% p/p ácido cítrico y 1% p/p de ácido ascórbico por 3 minutos para evitar el pardeamiento enzimático en manzanas, mientras que Heras-Ramírez et al., (2012) recomienda utilizar una solución con concentraciones de 1% p/p para ambos ácidos.

2.7. Parámetros fisicoquímicos

2.7.1 Actividad de agua

La actividad de agua (a_w) se define como la presión de vapor del alimento sobre la presión de vapor del agua pura a la misma temperatura. A pesar de que otros factores como

la temperatura, pH o presión osmótica también pueden afectar a la vida útil de los alimentos, la a_w es el factor más influyente.

La actividad de agua (a_w) es una cuantificación del agua que se encuentra disponible para crecimiento microbiano, reacciones enzimáticas o químicas, cuando su valor es 1 indica que toda el agua se encuentra disponible, cuando su valor es 0, no hay disponibilidad de esta, teniendo cada microorganismo un rango óptimo de a_w en que se produce su proliferación. Mujumdar & Chen, (2008) menciona que para actividades de a_w menores a 0.5, se detiene la proliferación de microorganismos.

Este parámetro es ampliamente utilizado en la industria alimentaria, principalmente al controlar la vida útil de los alimentos, ya que el consumo de alimentos mezclados con toxinas producidas por algunos microorganismos puede dar como resultado una intoxicación alimentaria. (Mujumdar & Chen, 2008).

2.7.2 Tamaño de partícula

La molienda es un proceso ampliamente utilizado en la industria alimentaria, este es un proceso de reducción del tamaño de partículas por medio de fuerzas mecánicas. Los resultados de la molienda dependen en gran medida a la naturaleza del alimento, la tecnología utilizada y la intensidad aplicada por la herramienta (Karam et al., 2016). El tamaño de partícula es una propiedad importante, ya que influye directamente en la calidad de un producto. Algunos estudios indican que la molienda a tamaños muy pequeños puede afectar propiedades físicas y sensoriales, tales como el color y el sabor (Yan et al., 2023). No solo eso, también puede afectar el contenido nutricional de un alimento, redistribuyendo el contenido de fibra dietaria insoluble y soluble o incluso afectando el contenido de polifenoles totales y actividad antioxidante. (Liu et al., 2016; Cossignani et al., 2023).

2.7.3 Sólidos solubles totales

Los sólidos solubles representan entre un 10 y 20% del peso de la fruta y aumentan con el grado de maduración de esta, así como también dependen de distintos factores, genéticos, agronómicos, climáticos y manejo post cosecha. Los sólidos solubles de una fruta corresponden principalmente a azúcares, pero también a ácidos orgánicos y algunos otros compuestos solubles en agua presentes en las células de la fruta. Uno de los parámetros más utilizadas para medir el contenido de azúcares en las frutas son los sólidos solubles totales (SST). Los azúcares son los principales responsables por el sabor dulce de estas, siendo un componente importante para la calidad de la fruta (Beckles, 2012).

2.7.4 Color

El color está definido como la longitud de onda en el espectro visible que puede detectar el ojo humano, es decir, entre 380 y 770 nm. Este es un parámetro que tiene una gran relevancia para los consumidores al momento de seleccionar un producto, y no solo eso, también se han realizado estudios que correlacionan el color de frutas y verduras con el contenido de compuestos bioactivos presentes en estas.

Entre las diferentes metodologías para realizar una cuantificación objetiva del color, la más utilizada en aplicaciones industriales, particularmente en la industria de los alimentos, es el espacio de color CIELAB. En este espacio de colores se define como un sistema cartesiano en tres dimensiones, como se presenta en la **Figura 4**, en este se tienen tres coordenadas, L^* la cual presenta valores en el rango de 0 a 100 y se relaciona con la luminosidad, correspondiendo 0 al negro y 100 al blanco. La coordenada a^* , esta presenta valores negativos y positivos, correspondiendo los valores negativos a tonalidades verdes y los valores positivos a tonalidades rojas. Por último, la coordenada b^* también presenta valores negativos y positivos, correspondiendo los valores negativos a tonalidades azules y los valores positivos a tonalidades amarillas (Sant'Anna et al., 2013).

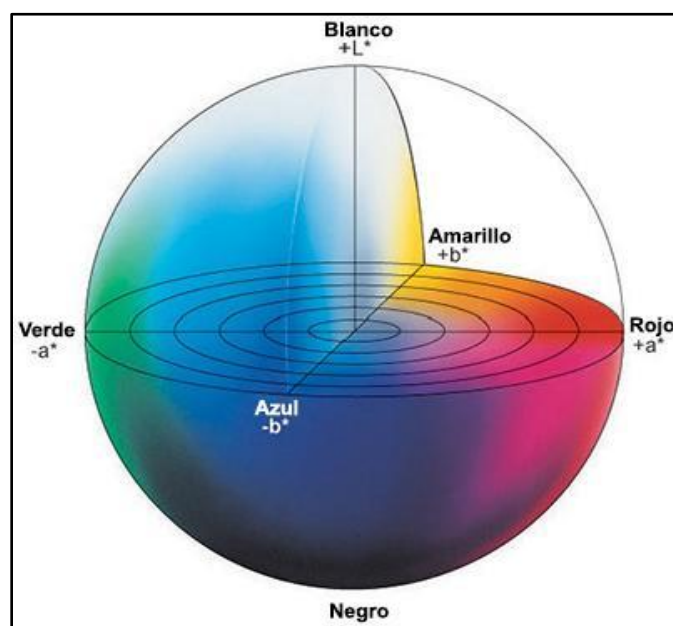


Figura 4: Espacio de color del sistema CIELAB, (Konica Minolta, 2022)

La diferencia de color (ΔE) en el espacio CIELAB se calcula como la distancia entre 2 puntos del sistema tridimensional, la **Tabla 4** muestra el criterio de evaluación para determinar qué tan perceptible es esta diferencia de color.

Tabla 4: Criterio de diferencia de color, (Mujumdar & Chen, 2008)

Diferencia de color	ΔE
Imperceptible	0-0.5
Ligero	0.5-1.5
Perceptible	1.5-3.0
Apreciable	3.0-6.0
Grande	5.0-12.0
Muy obvio	>12.0

2.7.5 Compuestos fenólicos y actividad antioxidante

Los compuestos fenólicos son sustancias bioactivas que presentan al menos un anillo aromático con uno o más grupos hidroxilo unidos. Estos compuestos se encuentran en casi todos los alimentos de origen vegetal. La concentración de polifenoles de cualquier alimento es muy variable ya que esta depende de los factores ambientales, la variedad y el grado de maduración, incluso, en el caso de las frutas existe una gran variación en la cantidad de polifenoles presentes en cada una de sus partes, siendo mucho mayor en la cáscara de la fruta. Además, es sabido que los distintos procesos tecnológicos o culinarios pueden reducir en gran parte la cantidad de compuestos fenólicos. (Feng et al., 2021)

Por otro lado, la oxidación es el fenómeno químico en que un átomo, molécula o ion pierde uno o varios de sus electrones, siendo el oxígeno el elemento que usualmente acepta dichos electrones. Se tiene conocimiento que el oxígeno es necesario para que exista la vida, pero esta es una molécula altamente reactiva que daña a los seres vivos produciendo radicales libres, es decir, un compuesto químico con uno o más electrones no apareados, los cuales pueden dañar las células comenzando reacciones químicas en cadena.

En condiciones normales existe un equilibrio entre la producción de radicales libres y los mecanismos antioxidantes del cuerpo, cuando este equilibrio se rompe se denomina estrés oxidativo, produciéndose daños celulares, asociado a múltiples enfermedades. El cuerpo tiene mecanismos internos para protegerse de los radicales libres, pero estos mecanismos requieren de apoyo externo, es decir, la incorporación de antioxidantes en la dieta diaria (Coronado et al., 2015). Como se muestra en la **Figura 5**, los antioxidantes terminan reacciones de oxidación captando los radicales libres y oxidándose ellos mismos.

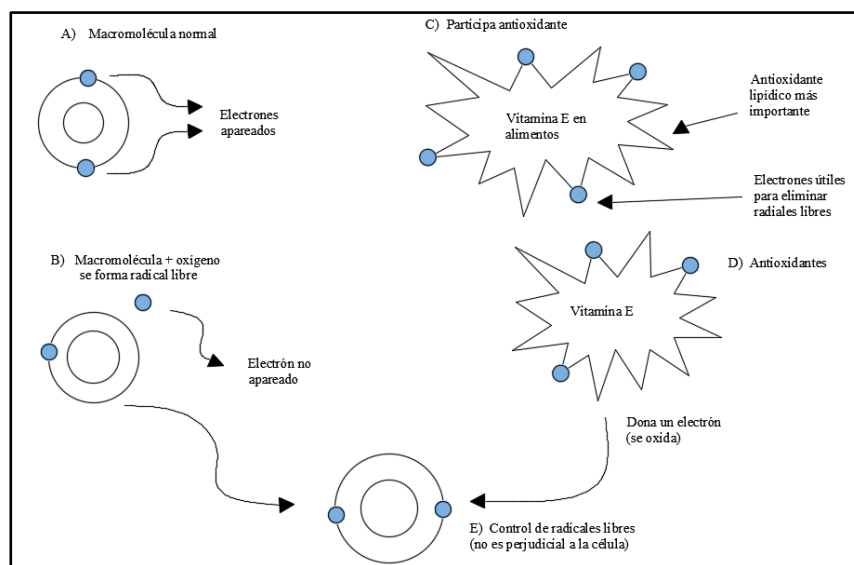


Figura 5: Interacción entre radicales libres y antioxidantes, (Adaptado de Coronado et al, 2015)

Los compuestos fenólicos mencionados anteriormente presentan una alta actividad antioxidante, tanto como captadores de radicales libres como quelantes de metales, evitando la formación de radicales libres. Estas propiedades antioxidantes resultan ser beneficiosas para la salud humana, previniendo el cáncer, las enfermedades cardiovasculares o incluso enfermedades neurodegenerativas (Creus, 2004).

Específicamente la manzana contiene una amplia variedad de compuestos fenólicos, estos pueden clasificarse en general como flavonoides y no flavonoide como se muestra en la **Tabla 5**.

Tabla 5: Clasificación de compuestos fenólicos de la manzana (Feng et al., 2021)

Flavonoides	No flavonoides
Flavanoles	Ácidos hidroxibenzóicos
Flavonoles	Ácidos hidroxicinámicos
Antocianinas	
Dihidrochalconas	

2.7.6 Fibra dietaria

La fibra dietaria es una sustancia comestible que se puede encontrar en las células vegetales, está conformada por polisacáridos (celulosa, hemicelulosa y pectina), lignina y

otras sustancias que no son digeribles por las enzimas del cuerpo humano. La fibra dietaria tienen efectos benéficos para la salud, previniendo enfermedades intestinales, diabetes, cáncer de colon, trastornos cardiovasculares, entre otros (Escudero & González, 2006). En las últimas décadas, numerosas organizaciones internacionales recomiendan un consumo de fibra de entre 20 y 40 g/día para un adulto sano.

La composición química de la fibra dietaria es heterogénea y compleja. Esta se divide en dos categorías, soluble e insoluble, como se muestra en la **Tabla 6**, dependiendo de su capacidad para disolverse o no en agua. Algunos alimentos contienen ambos tipos de fibra, mientras que en otros predomina uno, en el caso de los cereales, predomina un alto nivel de fibra insoluble, mientras las frutas y vegetales tienen una alta cantidad de fibra soluble (Arroyo et al., 2008). De cualquier forma, para ser considerado una fuente ideal de fibra un alimento debe tener una proporción balanceada entre ambos tipos de fibra, en una proporción de 3:1 entre insoluble y soluble (Escudero & González, 2006).

Tabla 6: Composición de la fibra dietaria (Arroyo et al., 2008)

Fibra Soluble	Fibra Insoluble
Pectinas	Celulosa
Gomas	Lignina
Mucílagos	Hemicelulosa insoluble
Polisacáridos	
Hemicelulosa soluble	

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Diseño del sistema de secado

El sistema de secado está integrado por un baño termostático, una cámara de vacío, una trampa de vapor, un regulador de presión y una bomba de vacío, tal como se muestra en la **Figura 6**.

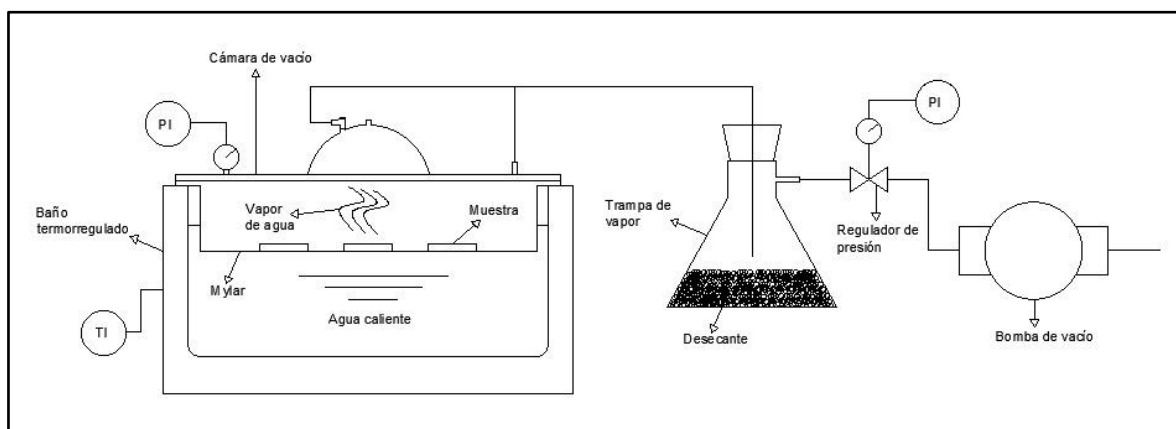


Figura 6: Esquema del sistema de secado con ventana refractiva acoplada con vacío (VRV)

El secado se efectúa al colocar las muestras húmedas dentro de la cámara de vacío, la cual está conectada a la trampa de vapor. Posteriormente, el otro extremo de la trampa de vapor se conecta al regulador de presión y a la bomba de vacío.

El baño termostático marca Mermmet, modelo WNB (**Figura 7**), usa agua como medio calefactor y puede alcanzar temperaturas de hasta 95°C, sin embargo, en este trabajo se realizó estudios en un rango entre 65°C y 85°C para la temperatura del agua.

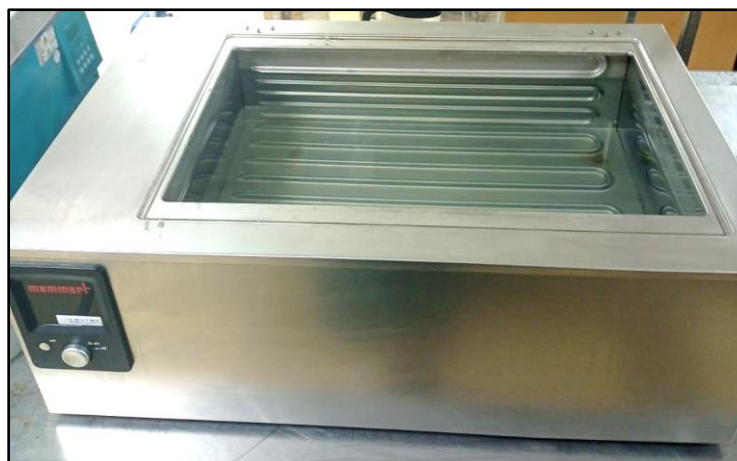


Figura 7: Baño termostático marca Mermmet, modelo WNB

La cámara de vacío está fabricada de acero inoxidable y tiene una forma rectangular, cuenta con un largo de 34 cm, 25 cm de ancho y 7.6 cm de alto sin contar la tapa. La cámara de vacío cuenta con una tapa de acrílico apernada de 38 cm de largo, 28 de ancho y 1 cm de espesor, siendo ligeramente más grande al cuerpo de la cámara, esta le permite encajar y apoyarse en la cavidad del baño termostático sin hundirse, además esta tapa cuenta con un manómetro integrado y una salida de vapor.

Como se mencionó, para lograr un sellado hermético la tapa de acrílico se encuentra apernada, por lo que, para lograr una apertura rápida de la cámara, la tapa de acrílico cuenta adicionalmente con una perforación circular de 19 cm de diámetro en su centro y a un sacado circular de 23 cm de diámetro, replicando la base de un desecador (**Figura 8**). En la perforación circular se sitúa un oring, el cual es una junta de plástico con forma toroidal y la tapa de un desecador de plástico (**Figura 9**), adicionando también la salida de vapor de la tapa del desecador.

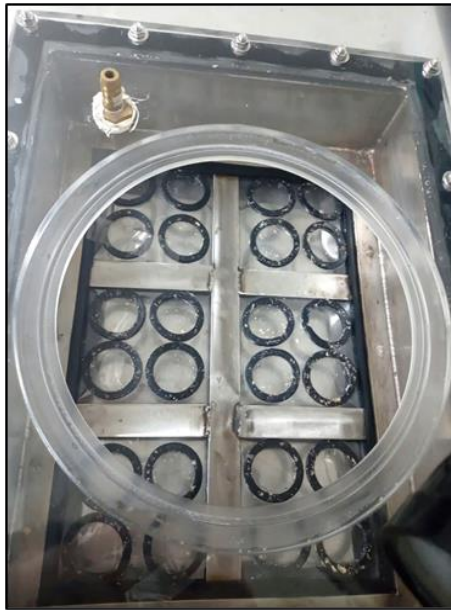


Figura 8: Perforación en tapa de acrílico

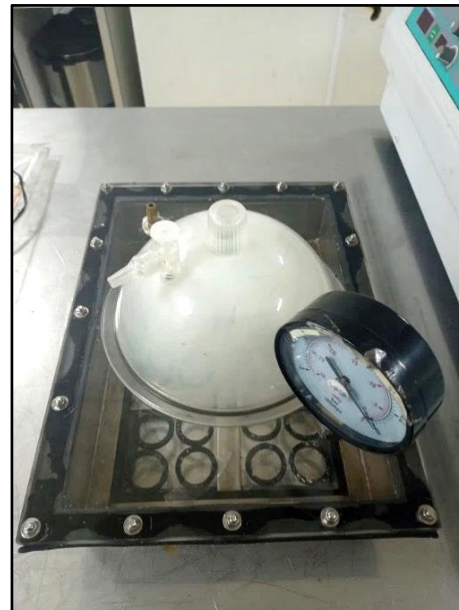


Figura 9: Tapa de desecador instalada en cámara de vacío

El fondo de la cámara de vacío es apernado al igual que la tapa de acrílico, siendo este intercambiable para poder utilizar distintos materiales, sin embargo, durante este trabajo se evalúa solo el Mylar (PET) de espesor 0.1 mm como fondo. En el Mylar se sitúan 24 moldes de goma circulares de 3 cm de diámetro y 3 mm de espesor para obtener un secado homogéneo. Adicionalmente para el fondo se diseña una rejilla de acero, la cual se sitúa sobre el mylar (**Figura 10**) para permitir que este soporte la presión exterior ejercida por el ambiente sin rasgarse, ayudando también a evitar la separación de la superficie del Mylar y

el agua. Además, tanto en la tapa de acrílico como en el fondo, se utilizan marcos de goma y de acero para mantener la hermeticidad durante la operación al vacío.



Figura 10: Fondo de cámara de vacío

La trampa de vapor consta de un matraz Kitasato hecho de borosilicato con un desecante en su interior, el cual para este trabajo será silica gel. La trampa de vapor busca evitar que los fluidos condensables extraídos del proceso lleguen a la bomba de vacío y provoquen algún daño. La trampa tiene dos salidas, una va conectada por medio de una manguera con bypass a las dos salidas de vapor de la cámara de vacío, mientras que la otra salida del matraz está conectada al regulador de presión, tal como se muestra en la **Figura 11**.



Figura 11: Trampa de vapor

El regulador de presión es una válvula manual con un manómetro digital acoplado, este se muestra en la **Figura 12**. La válvula manual permite el ingreso de aire ambiental a la

línea, sirviendo como mecanismo para regular el vacío generado y para disminuir la humedad del aire que pueda ingresar a la bomba de vacío.



Figura 12: Regulador de presión del sistema

La bomba de vacío de doble etapa modelo VP6D* (**Figura 13**), genera un desplazamiento de 144 (l/min) de aire, permitiendo obtener una presión parcial de vacío dentro del equipo mayor a 0.9 bar en menos de 1 minuto, sin embargo, el vacío evaluado durante este trabajo se encuentra en el rango entre 0.15 bar y 0.45 bar de presión de vacío, debido a que al utilizar fondo de Mylar, la aplicación de vacíos mayores a este rango provoca la inundación de la cámara de vacío.



*Figura 13: Bomba de vacío de doble etapa modelo VP6D**

3.1.1 Fundamento teórico

La ebullición ocurre cuando la presión parcial del vapor de agua es igual a la presión del sistema. Como se mencionó anteriormente, el secado al vacío disminuye la temperatura de ebullición del agua al disminuir la presión del sistema, sin embargo, en el sistema VRV el vacío aplicado se encuentra limitado a un máximo de 0.45 bar, lo que implica que para que la presión parcial del vapor de agua y del sistema sean iguales, es decir, para que se produzca la ebullición, se requiere de una temperatura mayor a 83.8°C.

Como aprecia en la **Sección 6.1**, en ningún experimento la temperatura de la muestra alcanza una temperatura necesaria para la ebullición. Debido a lo anterior, el secado se lleva a cabo por evaporación y no por ebullición, siendo la fuerza impulsora del proceso la diferencia entre la presión del vapor de agua de la superficie evaporante y la presión de vapor de agua en la cámara de vacío (Almeida-Transviña et al., 2014).

El funcionamiento de la bomba de vacío de forma continua se utiliza para manejar el nivel de humedad dentro de la cámara de vacío. Al producirse más vapor de agua, este es extraído para mantener la presión establecida por la bomba de vacío, por lo que se espera que una mayor presión de vacío provoque una mayor velocidad de secado.

Durante la operación del sistema VRV el agua evaporada de la muestra es retirada por la bomba de vacío y retenida en la trampa de vapor, a pesar de esto, parte del agua extraída también se condensa en la tapa de la cámara, así como otra parte de esta llega hasta la bomba de vacío. Se llevaron a cabo pruebas del sistema VRV a 65°C y 0.45 bar de presión de vacío para realizar un balance hídrico del proceso de secado según la **Ecuación 5**, los resultados se presentan en la **Tabla 7**.

$$M_e + M_p = M_c + M_t + M_b \quad (5)$$

Donde:

- M_e es la masa de agua evaporada de la muestra, (g).
- M_p es la masa de agua que permea a través del mylar, (g).
- M_c es la masa de agua condensada en la tapa de la cámara, (g).
- M_t es la masa de agua retenida en la trampa de vapor, (g).
- M_b es la masa de agua que llega a la bomba de vacío, (g).

Tabla 7: Balance de masa del agua del sistema

Experimento	M _e	M _p	M _c	M _t	M _b
1	35.11	2.30	9.66	14.95	12.80
2	35.22	2.30	11.78	12.66	13.08
3	35.20	2.30	11.16	13.30	13.04
4	35.18	2.30	11.87	12.11	13.50
5	35.11	2.30	8.02	15.75	13.64
6	35.23	2.30	8.37	14.08	15.08
Promedio	35.17±0.05	2.30±0	10.14±1.71	13.81±1.39	13.52±0.83

Como se observa en la **Tabla 7**, además del agua evaporada de la muestra, a la cámara de vacío hacen ingreso 2.3 gramos de agua a través del Mylar por medio de permeación. Un 27% del agua que se busca extraer (permeado más evaporado) se condensa en la tapa de la cámara de vacío antes de ser extraída debido a la baja temperatura de la tapa, la cantidad de condensado puede disminuirse precalentando el equipo antes del secado en el caso de que la muestra a secar se sitúe en la cámara de manera inmediata antes del secado, lo cual no fue posible durante este trabajo. Por otro lado, un 37% del agua es retenida en la trampa de vapor y un 36% llega hasta la bomba de vacío, se considera que esta cantidad de agua que llega a la bomba repartida durante el tiempo de secado no producirá daño a la bomba de vacío, de cualquier forma, para aumentar la eficiencia de la trampa de vapor se podría utilizar una mayor cantidad de desecante.

3.2. Diseño experimental

En la presente investigación, se busca evaluar la efectividad del secado de pomasa de manzana en un sistema diseñado con tecnología híbrida, acoplando la ventana refractiva con vacío y compararlo con el sistema convencional de secado de ventana refractiva. Se busca hacer una comparación de la cinética de secado y las propiedades fisicoquímicas del producto a distintas condiciones de temperatura y presiones de vacío.

Para realizar lo anterior, se proponen la siguiente serie de experimentos. Para la VR se estudiará 1 variable en 3 niveles, variando solamente la temperatura, realizando las pruebas con el sistema abierto a presión atmosférica. Por otro lado, para la VRV se estudiará 2 variables en 3 niveles, variando temperatura y presión con el objetivo de establecer el efecto de los distintos niveles de vacío en el secado, dejando un espesor de pulpa fijo de 3 mm en todos los casos. Según lo planteado, se establecen un total de 3 condiciones de operación distintas para la VR, 9 para la VRV y un único experimento de liofilizado con las condiciones propuestas en la **Tabla 8**.

Tabla 8: *Diseño experimental*

Condiciones de Operación	Ventana Refractiva	Ventana Refractiva acoplada con Vacío	Liofilizado
Temperatura (°C)	65-75-85	65-75-85	20
Presión de vacío (bar)	Atmosférica	0.15-0.25-0.45	6.3E-4 (Absoluta)
Espesor (mm)	3	3	n/d

*n/d: no determinado

Para cada uno de los experimentos de la **Tabla 8** se realizará una curva de actividad de agua, retirando una muestra y midiendo su actividad de agua cada cierto período de tiempo hasta que la muestra presente valores menores a 0.4, asegurando así que ya no exista crecimiento bacteriano. El tiempo de secado corresponderá al momento en que la muestra cumpla el criterio de actividad de agua y pueda formarse polvo de manzana con esta.

Una vez determinado el tiempo de secado, se obtiene los perfiles de temperatura del sistema según lo establecido en la **Sección 5.3**, esto se realiza para cada una de las condiciones de operación con el objetivo de establecer la verdadera temperatura a la que se realiza el secado, y entender cómo se comporta la temperatura del sistema al operarlo con y sin vacío.

Luego se procede a construir la curva de secado, lo que se realiza por medio de ensayos de humedad como está establecido en la **Sección 5.7**. Para la construcción de cada curva se realizan ensayos de humedad en 4 puntos del secado, a la materia prima antes de iniciar el secado, a un tercio del tiempo total del secado, a dos tercios del tiempo total del secado y al producto final del secado. Debido a la cantidad de ensayos se realiza una medición única.

Por último, se realizan los análisis de distribución de tamaño, color, sólidos solubles totales, polifenoles totales, actividad antioxidante para el polvo de pomasa de manzana producido en cada experimento planteado en la **Tabla 8**, según lo establecido en las **Secciones 5.5 a 5.11**, realizando los lotes de secado que sean necesarios para tener todas las mediciones en duplicado o triplicado. Adicionalmente se analiza la fibra dietaria presente en el polvo bioactivo de manzana, este ensayo solo se realiza para el polvo producido a 65°C y 0.45 bar en una medición única debido a la alta cantidad de producto requerido y al alto costo monetario del ensayo.

3.3. Metodología

3.3.1 Materia prima

La materia prima corresponde a la pomasa de manzana. Esta es elaborada con manzana Granny Smith, la cual será comprada en el mercado local de Valparaíso y serán almacenadas a 5°C hasta su utilización.

Para preparar la pomasa de manzana estas se lavan y se cortan en 24 trozos de igual tamaño para luego extraer semillas y pedúnculo.

Como pretratamiento se utilizará las técnicas de escaldado y acidificación, para esto se prepara una solución con agua destilada con 1% (p/p) de ácido cítrico y ascórbico, esta solución se calienta a baño maría hasta alcanzar 86°C en un baño termorregulado a 95°C. Se sumerge los trozos de manzana en la solución caliente durante 4 minutos (Heras-Ramírez et al., 2012), pasado el tiempo se sumergen en agua con hielo hasta enfriar, para luego dejarlas secar sobre papel absorbente.

Los trozos de manzana son procesados con una minipimer marca Philips de 700 watts durante 2 minutos hasta obtener una pulpa homogénea. Posteriormente, la pulpa de manzana es exprimida manualmente utilizando tela muselina hasta retirar gran parte del jugo, dejando un 20% de la masa inicial.

Finalmente, la pomasa será almacenada en bolsas herméticas y almacenada en un congelador a -86°C hasta su uso. Antes del secado, la pulpa es descongelada a 5°C la noche anterior a su uso (Puentes et al., 2020).

3.3.2 Secado

3.3.2.1 Ventana refractiva

El secado por ventana refractiva se lleva a cabo en la cámara de vacío propuesta en la **Sección 3**, esta se utiliza abierta, sin la tapa de acrílico y con el fondo de mylar apernado como muestra la **Figura 14**.

Antes de realizar el secado, se pesan 1.955 ± 0.01 gramos de pomasa de manzana previamente descongelada y se acomodan en cada uno de los 24 moldes circulares dispuestos en el mylar con el objetivo de obtener un secado lo más homogéneo posible. Una vez la cámara se apoya en el baño termorregulado y comienza el secado, se extrae el aire que queda atrapado entre el fondo de mylar y el agua del baño termorregulado, ya que este aire afecta negativamente a la conducción de calor a través del mylar. La extracción del aire se realiza con una bomba de agua sumergible modelo MY-355 de caudal máximo 350 l/h, la bomba de

agua se sujeta a un brazo de alambre el cual se sumerge bajo la cámara, extrayendo el agua y las burbujas de aire situadas bajo el mylar.

Finalmente, al alcanzar el tiempo de secado establecido se retira la pomasa de manzana en forma de hojuelas para su posterior molienda, obteniéndose entre 9 y 10 gramos de producto por cada lote de secado.



Figura 14: Secado por ventana refractiva (VR)

3.3.2.2 Ventana refractiva acoplada con vacío

Para acoplar la ventana refractiva con el secado al vacío, el secado se realiza utilizando el sistema completo propuesto en la **Sección 3**.

Antes de realizar el secado, análogamente con el secado por VR, se pesan 1.955 ± 0.01 gramos de pomasa de manzana y se acomodan cada uno de los moldes circulares dispuestos en el mylar. Una vez que la cámara de vacío se encuentra en su lugar y comienza el secado, la extracción del aire atrapado bajo el mylar se realiza de la misma forma que en la sección anterior, con la cámara abierta para tener una mejor visión. Sin embargo, finalizada la extracción de las burbujas de aire, se coloca la tapa de desecador y se enciende la bomba de vacío, cerrando la cámara herméticamente como se muestra en la **Figura 15**, para posteriormente regular el nivel de vacío dentro de esta.

La bomba de vacío opera de manera semicontinua realizando una sola parada a los 20 minutos de secado para retirar el condensado y evitar la formación de gotas en la tapa de la cámara.

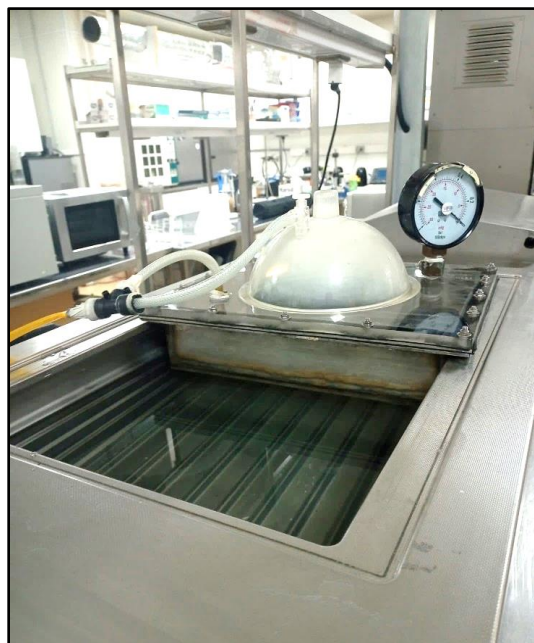


Figura 15: Secado por ventana refractiva acoplada con vacío (VRV)

3.3.2.3 Liofilizador

Para secar en el liofilizador, se programa un software asociado al equipo con las condiciones de secado propuestas en la **Tabla 8**, es decir, un tiempo de 48 horas de secado, con una temperatura de platos de 20°C y una presión absoluta de 6.3E-4 bar (Karwacka et al., 2022). Por otro lado, se congela previamente pomasa de manzana en una bolsa plástica hermética en una congeladora Haier ULT Freezer DW-86W100J. La muestra se congeló durante 24 horas a una temperatura de -87°C con la forma de una fina lamina para facilitar su separación y disposición en placas Petri, siendo envueltas en tela muselina para evitar cualquier salpicadura dentro del equipo.

El secado por liofilización busca secar las muestras sublimando el agua congelada en estas, por lo que rápidamente se sitúa las placas Petri en los platos dentro de la cámara de vacío del liofilizador Christ Alpha 2-4 LCSplus y se comienza el secado antes de que el agua en las muestras vuelva a estado líquido. Se obtiene como producto final hojuelas muy secas, las cuales son fácilmente convertidas en polvo con la minipimer para su posterior análisis.



Figura 16: Secado por liofilización

3.3.3 Perfil de temperatura

Se utiliza el software Loggin OMEGA para estudiar las temperaturas a lo largo del proceso de secado en distintos puntos del sistema. Para realizar la medición se sitúan termocuplas tipo T, en el agua del baño termorregulado, en la parte inferior del mylar, en la parte superior del mylar, en el aire dentro de la cámara de vacío y en la pomasa de manzana, tal como muestra en la **Figura 17**.

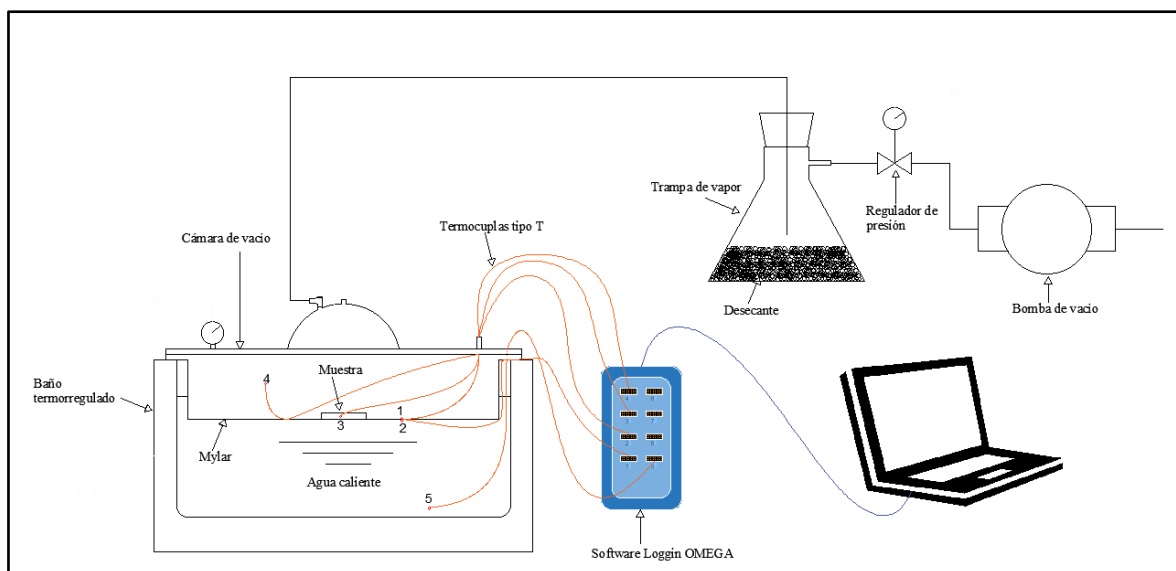


Figura 17: Esquema de la medición del perfil de temperatura del sistema

3.3.4 Molienda y caracterización

La hojuela obtenida del secado es procesada con la minipimer durante 10 minutos obteniéndose el polvo bioactivo de manzana.

Se realiza una caracterización de tamaño de grano por medio de tamices. Para esto se utilizan 3 tamices, con tamaños de apertura de malla de 710, 425 y 210 μm . Se pesan de 10 a 20 gramos de polvo de manzana y se sitúa en el tamiz superior, es decir, el de mayor tamaño de apertura, luego se coloca la tapa y el fondo a los tamices y se agita durante 10 minutos hasta que el peso del polvo retenido en cada tamiz no cambie.

El peso de cada fracción de polvo es utilizado para confeccionar una curva granulométrica y la distribución de tamaño, obteniéndose el d_{50} , el cual es un parámetro utilizado para representar el tamaño medio de partícula. Una vez determinado el tamaño de partícula se reúnen las fracciones para obtener nuevamente un polvo heterogéneo.

3.3.5 Almacenamiento

Posterior al secado, molienda y caracterización de tamaño el polvo bioactivo de manzana es almacenado dentro de bolsas herméticas hasta su uso. Además, las bolsas herméticas son conservadas dentro de otra bolsa más grande, para evitar la reabsorción de humedad por parte del polvo de manzana.

3.3.6 Determinación de actividad de agua

La determinación de la actividad de agua de las muestras, la cual dictará el tiempo de secado de los experimentos, será determinada mediante un higrómetro de punto de rocío marca Rotronic hydropalm (Caparino et al, 2011).

3.3.7 Determinación de humedad

La humedad de las muestras de manzana se determinará en base a la norma 934.06 de la AOAC (Association of Official Analytical Chemists) (AOAC, 1996). La metodología es la siguiente:

- Pesar una placa Petri vacía anteriormente secada en una estufa a 60°C en una balanza analítica.
- Adicionar entre 5g de muestra en la placa Petri, pesarla nuevamente en una balanza analítica e introducirla en un desecador.
- Utilizar una bomba de vacío hasta alcanzar una presión menor a 100 mm Hg dentro del desecador.
- Colocar el desecador en una estufa marca Memmert modelo 800 a una temperatura de 60°C durante 24 horas o hasta que la muestra alcance una masa constante.

- Sacar la placa Petri y pesarla nuevamente en la balanza analítica.

En la **Ecuación 6 y 7** se muestra el cálculo de la humedad de las muestras.

$$H = \frac{m_i - m_f}{m_i - m_p} \quad (6) \quad H_{bs} = \frac{m_i - m_f}{m_f - m_p} \quad (7)$$

Donde:

- H es la humedad en base húmeda, (g de agua / g de muestra)
- H_{bs} es la humedad en base seca, (g de agua / g de muestra seca).
- m_p es la masa de la placa Petri, (g).
- m_i es la masa de la placa más la masa inicial de la muestra, (g).
- m_f es la masa de la placa más la masa final de la muestra al sacarla de la estufa, (g).

3.3.8 Determinación de sólidos solubles totales

Para determinar los sólidos solubles totales en las muestras, disuelve 1 g de muestra en 10 ml de agua destilada y se agita, luego se coloca una gota de solución en la lente de un refractómetro analítico marca Hanna Instruments modelo HI-96801, entregando la medición de sólidos solubles en grados BRIX (Dadhaneeya et al, 2023). El refractómetro debe ser calibrado colocando agua destilada sobre la lente antes de su uso.

La **Ecuación 8** simplificada de (Navarro & Martínez, 2020), muestra el cálculo de los sólidos solubles totales de las muestras en (g_{SST}/g_{bs}).

$$SST = \frac{(M_p + M_w \cdot H) \cdot B}{M_p \cdot (100 - B)} \cdot \frac{1}{(1 - H)} \quad (8)$$

Donde:

- SST son los sólidos solubles totales, (g_{SST}/g_{bs}).
- M_p es a la masa de muestra, (g).
- M_w es a la masa de agua adicionada, (g)
- B son los °BRIX medidos por el refractómetro.

3.3.9 Determinación de Color

Para la determinación del color de las muestras se utilizará un colorímetro, el cual debe ser calibrado antes de su uso. Utilizando el colorímetro sobre las muestras se obtienen

los parámetros L^* , a^* , b^* correspondientes al modelo CIELAB, estos parámetros representan la luminosidad tonalidades entre rojo/verde y tonalidades entre amarillo/azul respectivamente (Puente, y otros, 2020). Luego, el cálculo de la variación del color en las muestras se calcula según la **Ecuación 9**.

$$\Delta E = \sqrt{[(a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2 + (L^* - L_0^*)^2]} \quad (9)$$

Donde:

- a^* , b^* y L^* representan los parámetros de la muestra analizada, que para efectos de esta investigación serán las muestras de polvo obtenido de cada una de las condiciones de operación establecidas.
- a_0^* , b_0^* , L_0^* representan los parámetros de una muestra de referencia contra la que se compara el cambio de color, en este caso, polvo obtenido por medio de secado por liofilización.

3.3.10 Determinación de Polifenoles

El contenido total de polifenoles se determinará con el método de Folin-Ciocalteu (Anggraini et al., 2015), utilizando el siguiente procedimiento:

- Se prepara un extracto metanólico con 2 gramos de muestra y 20 ml de metanol al 80%, se homogeniza y se guarda en un lugar oscuro cubierto con papel aluminio durante 60 minutos, finalmente se filtra el sobrenadante y se guarda a temperatura ambiente hasta su uso.
- Se diluye 1 ml de extracto metanólico en agua destilada en razón 1:10.
- En un tubo de ensayo se agrega 0.5 ml del extracto diluido, 3.75 ml de agua destilada, 0.25 ml de reactivo Folin-Ciocalteu (50%) y 0.5 ml de Na_2CO_3 (10%), para luego mezclar hasta homogenizar.
- El tubo de ensayo se guarda en un lugar oscuro cubierto con papel aluminio durante 60 minutos.
- Se mide la absorbancia con un espectrofotómetro marca SPECTRONIC ® GENESIS™ 5, con una longitud de onda de 765 nm.

Para obtener el resultado como concentración de ácido gálico equivalente, se construye una curva estándar de calibración. Se realiza el mismo procedimiento descrito, desde el tercer punto, cambiando el extracto metanólico por ácido gálico en distintas concentraciones entre 20 mg/L y 120 mg/L, obteniendo una absorbancia para cada concentración.

La **Ecuación 10** muestra el cálculo del contenido de polifenoles totales en las muestras.

$$PFT = f(ABS) \cdot \frac{1(L)}{1000(ml)} \cdot \frac{V_e}{M_e} \cdot F_d \cdot \frac{1}{(1-H)} \quad (10)$$

Donde:

- PFT es la concentración de polifenoles totales, (mg GAE/gbs)
- $f(ABS)$ es la concentración de ácido gálico equivalente obtenida de la curva de calibración, (mg GAE/L).
- V_e es el volumen de metanol 80% utilizado en el extracto metanólico, (ml).
- M_e es la masa de muestra utilizada en el extracto metanólico, (g).
- F_d es el factor de dilución del extracto metanólico.

3.3.11 Determinación de actividad antioxidante

El contenido de polifenoles totales se determinará con el método DPPH (Galaz et al., 2017), utilizando el siguiente procedimiento:

- Se prepara un extracto metanólico con 2 gramos de muestra y 20 ml de metanol al 80%, se homogeniza y se guarda en un lugar oscuro cubierto con papel aluminio durante 60 minutos, finalmente se filtra el sobredenante y se guarda a temperatura ambiente hasta su uso.
- Se diluye 1 ml de extracto metanólico en agua destilada en razón 1:100.
- En un tubo de ensayo, se agrega 0.5 ml del extracto diluido y 2.5 ml de DPPH a una concentración de 0.1 mM en metanol puro, para luego mezclar hasta homogenizar.
- El tubo de ensayo se guarda en un lugar oscuro cubierto con papel aluminio durante 30 minutos.
- Se mide la absorbancia con un espectrofotómetro marca SPECTRONIC ® GENESIS™ 5, con una longitud de onda de 517 nm.

Del mismo modo que para la medición de polifenoles, se realizó una curva de calibración de Trolox equivalente. Se sigue el procedimiento descrito desde el tercer punto, sustituyendo el extracto por una solución patrón de Trolox a una concentración de 0.1 mM, diluyéndola a concentraciones de 0, 50, 100 y 200 μ m, obteniendo una absorbancia para cada concentración.

La **Ecuación 11** muestra el cálculo de la actividad antioxidante de las muestras.

$$DPPH = g(ABS) \cdot \frac{1(L)}{1000(ml)} \cdot \frac{V_e}{M_e} \cdot F_d \cdot \frac{1}{(1-H)} \quad (11)$$

Donde:



- *DPPH* es la actividad antioxidante de la muestra ($\mu\text{mol TE / gbs}$).
- *g(ABS)* es la concentración de trolox equivalente obtenida de la curva de calibración, ($\mu\text{mol TE/ L}$).

3.3.12 Determinación de fibra dietaria

Para el análisis del contenido de fibra dietaria, se seca pomasa de manzana hasta obtener 50 gramos de polvo, la muestra de polvo se almacena en una bolsa hermética y se etiqueta. Esta muestra es analizada por un agente externo, el cual corresponde al laboratorio de asistencia técnica de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.

Se analiza el contenido de fibra dietaria soluble e insoluble por los métodos 993.19 y 991.42 propuestos por la AOAC (AOAC, 2016). El contenido de fibra dietaria total se obtiene según el cálculo empírico propuesto en el método 993.19 como muestra la **Ecuación 12**.

$$FDT = FDS + FDI \quad (12)$$

Donde:

- *FDT* es el contenido total de fibra dietaria, (g/100g).
- *FDS* es el contenido de fibra dietaria soluble, (g/100g).
- *FDI* es el contenido de fibra dietaria insoluble, (g/100g).

3.3.13 Análisis estadístico

Para el análisis estadístico de los resultados obtenidos en esta investigación, se utiliza el software STATGRAPHICS Centurion XVI. Utilizando el software, se realizan análisis de varianza (ANOVA) y pruebas de múltiples rangos de Duncan para determinar la existencia de diferencias significativas entre los resultados con un 95% de confianza.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Perfiles de temperatura

De acuerdo con la metodología planteada en la **Sección 5.3**, se miden las temperaturas en las distintas partes de la cámara de vacío durante la operación del secado a las 12 condiciones predefinidas en la **Tabla 8**. Se midió las temperaturas del agua del baño termorregulado, bajo y sobre el mylar, es decir, la superficie inferior del mylar, la cual está en contacto directo con el agua del baño termorregulado y la superficie superior del mylar en la cual se realiza el secado, también se midieron las temperaturas de una muestra de pomasa de manzana y la del aire dentro de la cámara de vacío durante todo el tiempo del secado. De este modo se obtuvieron los perfiles de temperatura, que se encuentran en el **Anexo 1** y se resumen en la siguiente tabla de resultados.

Tabla 9: Resumen perfiles de temperatura

Método de secado	Temperatura (°C) / Presión (bar)	Agua	Aire	Sobre mylar	Muestra	Bajo mylar
VR	65 / Atmosférica	65,1	31,1	48,7	48,2	62,5
	75 / Atmosférica	75,5	33,1	54,1	54,7	72,7
	85 / Atmosférica	86,0	35,5	62,0	60,7	82,8
VRV	65 / 0.15	65,4	51,5	57,6	57,5	64,1
	65 / 0.25	65,2	53,0	57,9	57,3	64,1
	65 / 0.45	65,1	53,2	56,6	56,0	63,9
	75 / 0.15	75,5	58,9	63,9	66,0	73,8
	75 / 0.25	74,9	61,0	61,3	64,1	73,9
	75 / 0.45	74,6	61,3	63,1	58,5	72,9
	85 / 0.15	85,2	67,3	72,1	71,0	83,9
	85 / 0.25	86,1	68,3	70,6	69,1	83,7
	85 / 0.45	85,7	67,6	71,5	68,9	83,8

De la **Tabla 9**, se puede evidenciar que existe una diferencia entre la temperatura del agua del baño termorregulado y la parte inferior del mylar, que ronda entre 1 y 2°C para todas las condiciones de temperatura y presión, estas temperaturas son muy similares, pero no son iguales debido a la conductividad térmica del material y a las pérdidas de calor ocasionadas por la diferencia de temperatura entre la parte inferior y superior del mismo mylar.

Como se mencionó, también existe una diferencia de temperatura entre la superficie inferior y superior del mylar, la cual es más notoria, esta varía entre 13 y 20°C en el caso de la VR y entre 6 y 13°C para la VRV, aumentando a temperaturas de operación más altas. La

diferencia de temperatura se reduce en el caso de la VRV, ya que esta opera con la cámara de vacío cerrada, por lo que la superficie superior del mylar no está en contacto con el aire ambiente, sino con el aire dentro de la cámara el cual se encuentra a mayor temperatura. Lo anterior provoca que la temperatura de la superficie superior del mylar de la VRV sea 10°C mayor que en la VR para una misma temperatura del agua.

La temperatura del aire para la VR varía entre 30 y 35°C, debido a que el calor transmitido por el mylar y las paredes de la cámara es disipado al ambiente. Por otro lado, la temperatura del aire para la VRV es muy similar a la temperatura de la superficie del mylar ya que, al estar cerrada, se reducen las pérdidas de calor al ambiente, calentándose así el aire al interior de la cámara hasta temperaturas más altas y de forma más rápida.

Se observa que la temperatura promedio de la muestra durante el secado es similar a la temperatura superior del mylar, con una diferencia cercana a 1°C, pero con una mayor variación en el tiempo. Así como también ambas temperaturas tardan en llegar a la temperatura de equilibrio en tiempos similares, el cual varía de 3 a 5 minutos, por lo que la temperatura de la superficie superior del mylar es la que representa de mejor manera a la temperatura de secado y no la temperatura indicada por el baño termorregulado.

4.2. Actividad de agua y tiempo de secado

La actividad de agua se mide de acuerdo con la metodología planteada en la **Sección 5.6**, obteniéndose las curvas de actividad de agua que se encuentran en el **Anexo 2**. La actividad de agua del producto final se muestra a continuación en la **Figura 18**, alcanzando en todos los casos un valor menor a 0.4, presentando diferencias significativas ($p > 0.5$) en el secado con VRV a 85°C y 0.45 bar y en el liofilizado, los cuales presentaron valores más bajos de actividad de agua, en especial el liofilizado en el cual se obtuvo una actividad de agua extremadamente baja.

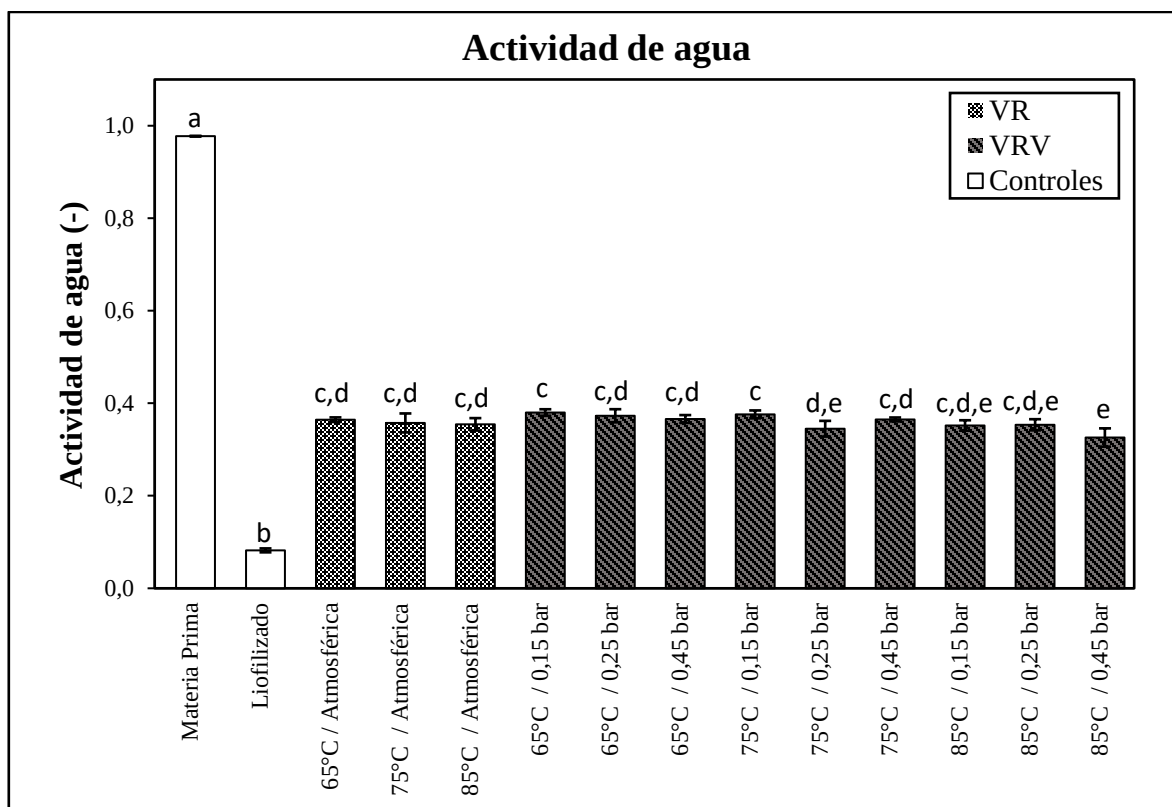


Figura 18: Actividad de agua en polvo de manzana secado con VR, VRV y liofilizado

*Diferentes letras minúsculas indican diferencias significativas entre ambas mediciones ($p \leq 0,05$)

En la **Tabla 10**, se resumen los tiempos de secado y la reducción porcentual de estos para los secados con VRV con respecto a los secados con VR para cada temperatura y presión de vacío. Se puede observar que no en todos los casos se ve una mejora en los tiempos de secado, al aplicar una presión parcial de vacío de 0,15 y 0,25 bar el tiempo de secado se mantiene a menores temperaturas y aumenta a temperaturas más altas. Lo anterior se debe principalmente a la humedad dentro de la cámara de vacío, la cual tiene un efecto negativo en los tiempos de secado. Por otro lado, en el secado por VRV con la aplicación de una presión parcial de vacío de 0,45 bar se ve una mejora de los tiempos de secado en todos los casos, puesto que un mayor vacío permite una mejor extracción de la humedad.

Tabla 10: Tiempo de secado de experimentos con VR y VRV

Método de secado	Temperatura (°C)	Presión (bar)	Tiempo (min)	Reducción de Tiempo ($\Delta\%$)
VR	65	Atmosférica	126.5±5	Ref
	75	Atmosférica	81.5±5	Ref
	85	Atmosférica	56.5±5	Ref
VRV	65	0.15	126.5±5	0
	65	0.25	126.5±5	0
	65	0.45	101.5±5	+20
	75	0.15	86.5±5	-6
	75	0.25	86.5±5	-6
	75	0.45	61.5±5	+25
	85	0.15	61.5±5	-9
	85	0.25	61.5±5	-9
	85	0.45	51.5±5	+17

Con respecto a los secados con VRV en los que se operó con una presión de vacío de 0.45 bar, la reducción porcentual de los tiempos de secado fue entre el 17 y 25% del tiempo total. Si bien la mayor reducción del tiempo de secado fue a 75°C y la menor fue a 85°C, la humedad final de los secados no es la misma, lo que podría explicar la variación en la reducción porcentual del tiempo.

4.3. Curvas de secado y humedad final

Teniendo los tiempos de secado establecidos, se utiliza la metodología propuesta en la **Sección 5.7** para obtener la humedad de la materia prima, al producto final y a dos puntos intermedios del secado. A partir de los datos experimentales, se utilizó el software MATLAB para modelar la humedad adimensional a partir del modelo difusivo propuesto por Crank (**Ecuación 13**) y obtener las curvas de secado presentadas a continuación.

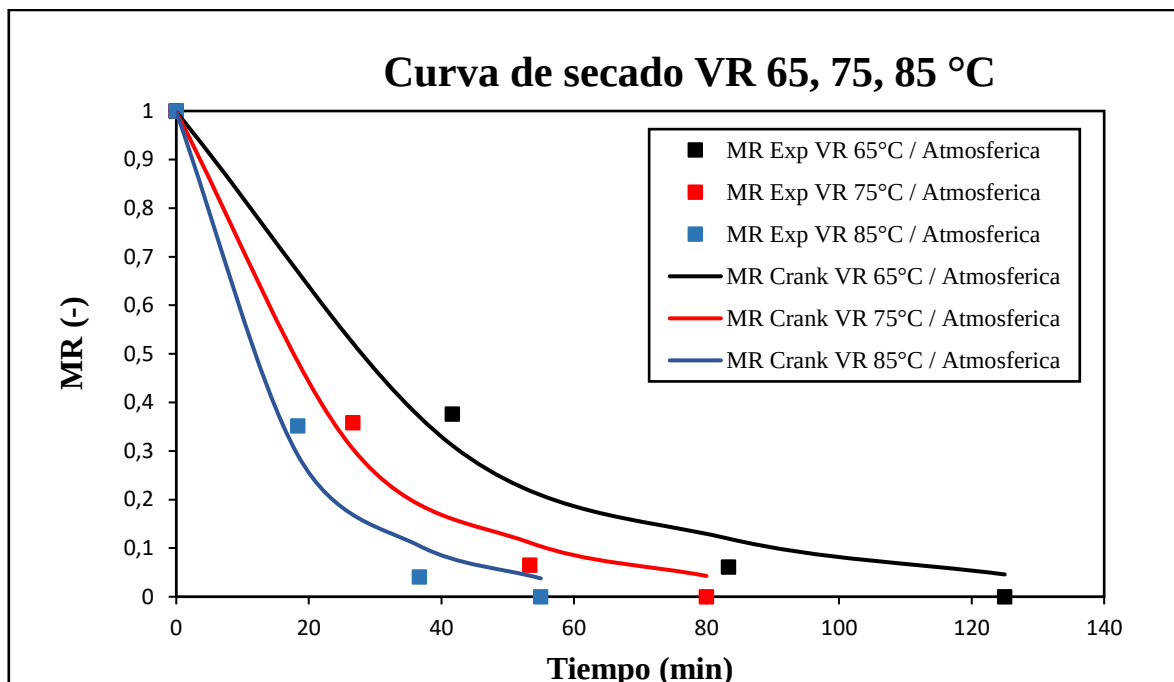


Figura 19: Curva de secado experimental y teórica en VR a 65,75 y 85°C

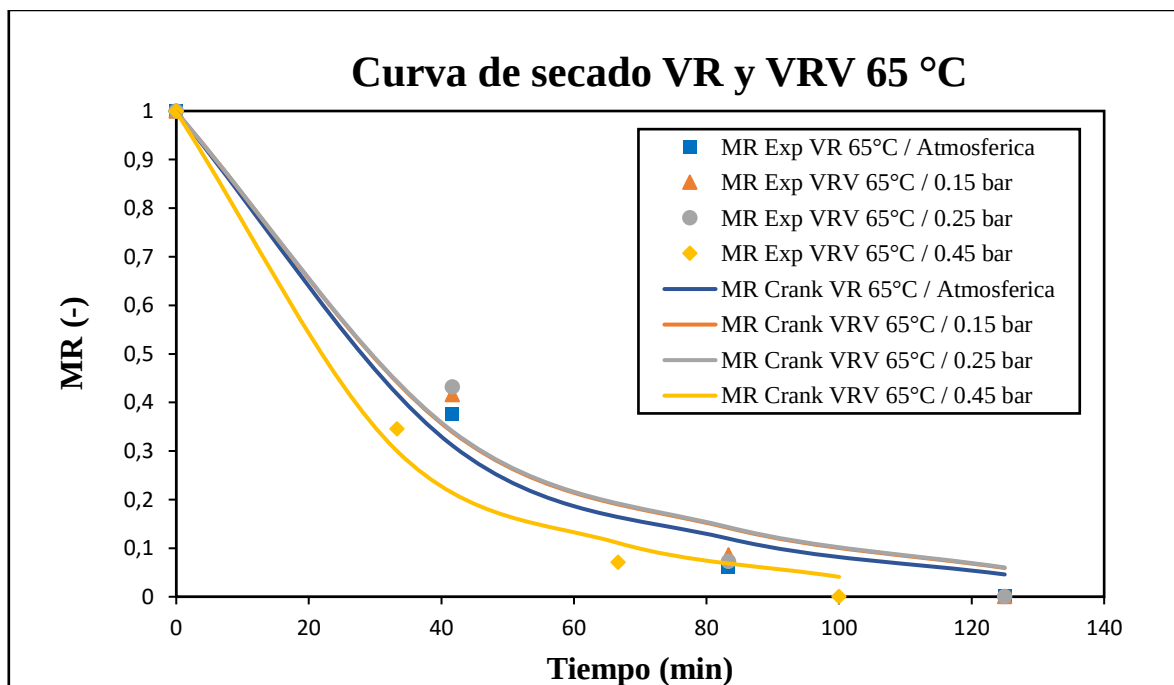


Figura 20: Curva de secado experimental y teórica en VR y VRV a 65°C

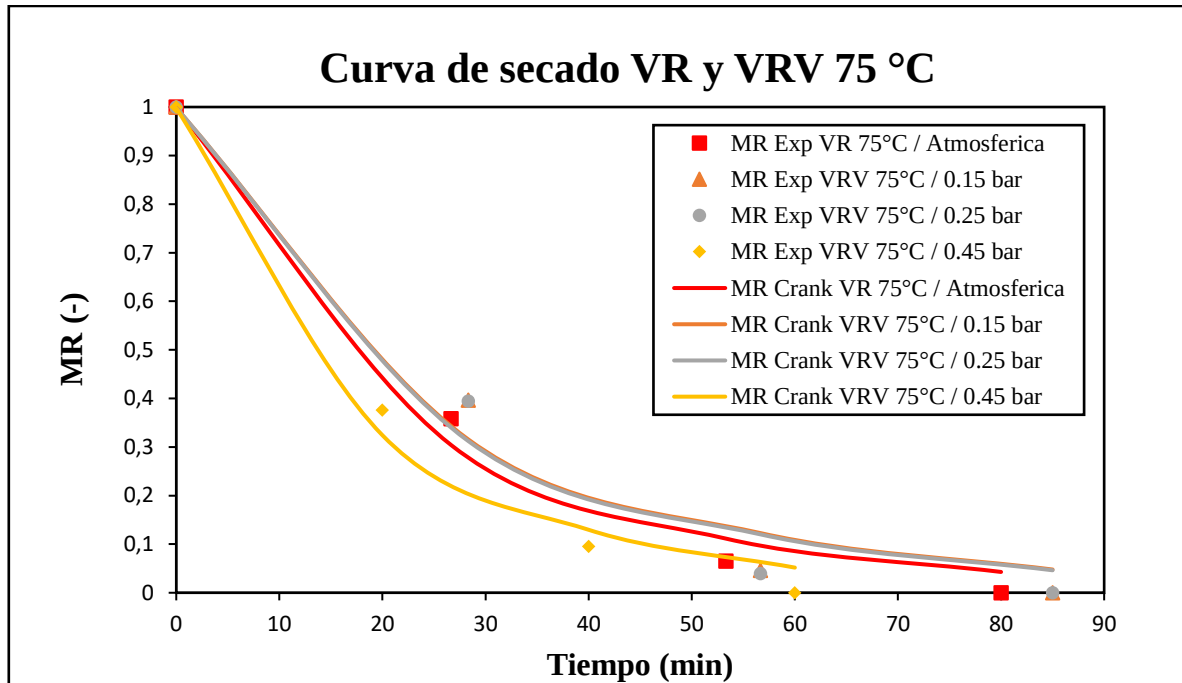


Figura 21: Curva de secado experimental y teórica en VR y VRV a 75°C

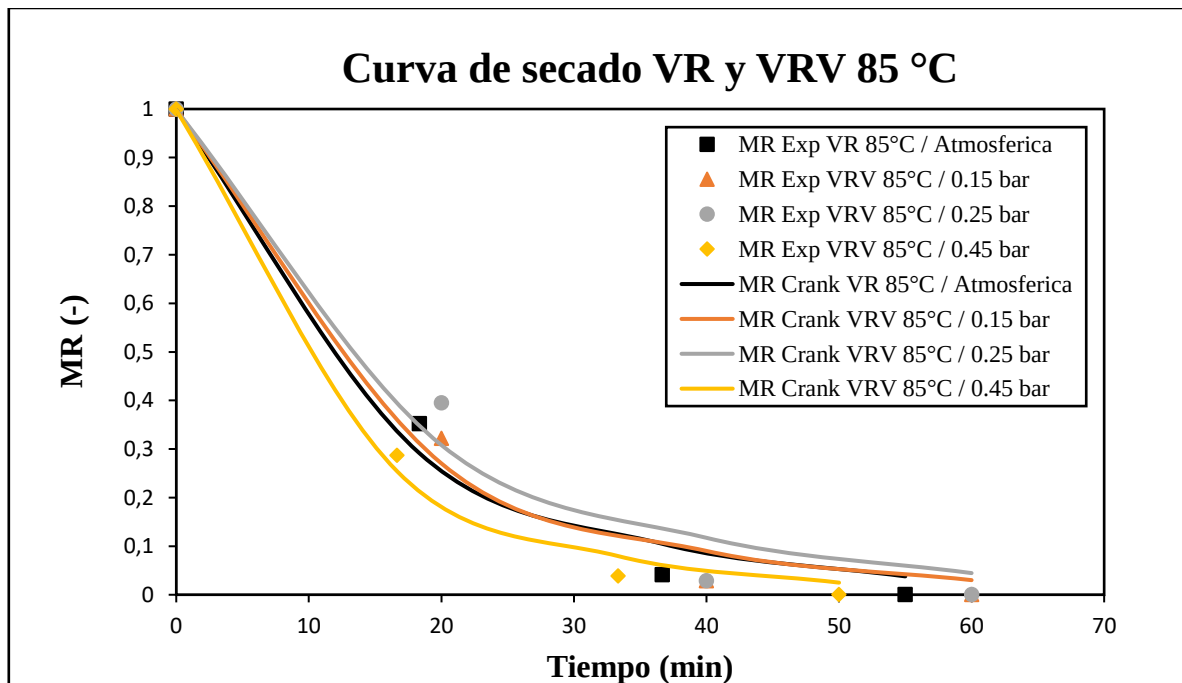


Figura 22: Curva de secado experimental y teórica en VR y VRV a 85°C

De las **Figuras 19, 20, 21 y 22** se observa que el modelo difusivo de Crank en general se ajusta de buena manera a los datos experimentales, lo que se puede observar en mayor detalle en la **Tabla 11** donde se presentan los valores de R^2 .

Tabla 11: Difusividad efectiva y coeficiente de correlación entre las MR experimentales y teóricas

Método de secado	Temperatura (°C)	Presión (bar)	D_{eff} (m ² /s)	R^2
VR	65	Atmosférica	8.38E-8	0.985
	75	Atmosférica	1.34E-7	0.989
	85	Atmosférica	2.03E-7	0.986
VRV	65	0.15	7.64E-8	0.980
	65	0.25	7.58E-8	0.973
	65	0.45	1.09E-7	0.991
	75	0.15	1.21E-7	0.977
	75	0.25	1.23E-7	0.976
	75	0.45	1.67E-7	0.989
	85	0.15	2.00E-7	0.989
	85	0.25	1.76E-7	0.973
	85	0.45	2.54E-7	0.995

Como se mencionó anteriormente, el ajuste del modelo de Crank es generalmente bueno presentando valores de R^2 entre 0.973 y 0.995. El alto ajuste del modelo puede deberse a la baja cantidad de datos experimentales utilizados, ya que, Simpson et al., (2015) asegura que este modelo no presenta un buen ajuste obteniendo valores de R^2 entre 0.926 y 0.991.

Observando los coeficientes de difusividad (D_{eff}) se obtiene que este incrementa con la temperatura de secado. Por otro lado, al utilizar la VRV, solo se tiene un aumento del D_{eff} en los experimentos en los que se operó con vacío de 0.45 bar y no así para los que utilizaron vacíos de 0.15 y 0.25 bar, los cuales presentaron valores más bajos. Al igual que en la sección anterior, esto se debe a que, al utilizar vacíos bajos la extracción de humedad es menor y aumenta la humedad dentro de la cámara de vacío, disminuyendo la diferencia de presión de vapor con la superficie de las muestras de pomasa.

En la **Tabla 12** se observa la humedad de la materia prima y la humedad final alcanzada en los productos de cada secado.

Tabla 12: Humedad en de polvo de manzana secado con VR, VRV y liofilizado

Método de secado	Temperatura (°C)	Presión (bar)	Humedad (g agua/g muestra)
Pomasa	-	-	0.788
Liofilizado	20	6.3E-4 (Absoluta)	0.011
VR	65	Atmosférica	0.054
	75	Atmosférica	0.054
	85	Atmosférica	0.070
VRV	65	0.15	0.060
	65	0.25	0.078
	65	0.45	0.073
	75	0.15	0.062
	75	0.25	0.061
	75	0.45	0.079
	85	0.15	0.063
	85	0.25	0.060
	85	0.45	0.049

La pomasa de manzana presentó una humedad inicial de 0.788 g agua /g muestra, similar a la obtenida por Almeida-Transviña et al., (2014). Con respecto a los productos, la humedad mínima alcanzada corresponde al producto liofilizado con 0.011 g agua/g muestra y el máximo valor al producto del secado con VRV a 75°C y 0.45 bar con un valor de 0.079 g agua/g muestra.

Los valores de humedad final de cada secado son variables debido a que el criterio para detener el secado no fue la humedad, sino una actividad de agua menor a 0.4. Además, la alta velocidad de secado, principalmente en los secados a mayor temperatura, genera dificultades para obtener experimentos similares.

4.4. Distribución de tamaño

Como se mencionó anteriormente, el tamaño de partícula puede afectar el color del polvo, tal como se muestra en la **Figura 23**, donde se observa una clara diferencia de color en las fracciones de polvo de manzana, el cual se encuentra separado en 4 tamaños de partícula utilizando tamices como se explica la **Sección 5.4**.



Figura 23: Fracciones de polvo de manzana posterior al tamizado

La diferencia de color apreciable en la **Figura 23** se debe a dos factores, el primero es el tamaño de las partículas de polvo, el cual aumenta la luminosidad de este y el segundo es la composición del polvo, ya que se evidencia una mayor proporción de cáscara de manzana en las fracciones de polvo más gruesa.

En la **Tabla 13** se presenta los valores de d_{50} del polvo de manzana liofilizado y de los promedios del polvo producido con VR y VRV, respectivamente.

Tabla 13: Diámetro medio (d_{50}) del polvo de manzana

Método de secado	d_{50} (μm)
Liofilizado	122
Promedio VR	389
Promedio VRV	380

En las **Figuras 24 y 25** se presentan los gráficos de distribución de tamaño de partícula y curva granulométrica para cada caso.

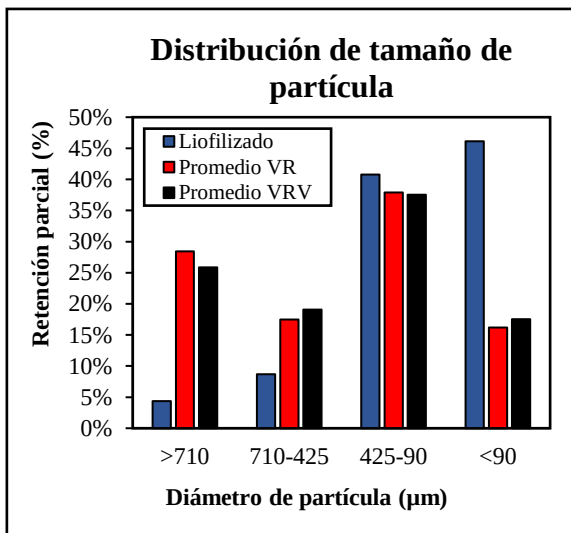


Figura 24: Distribución de tamaño de partícula del polvo

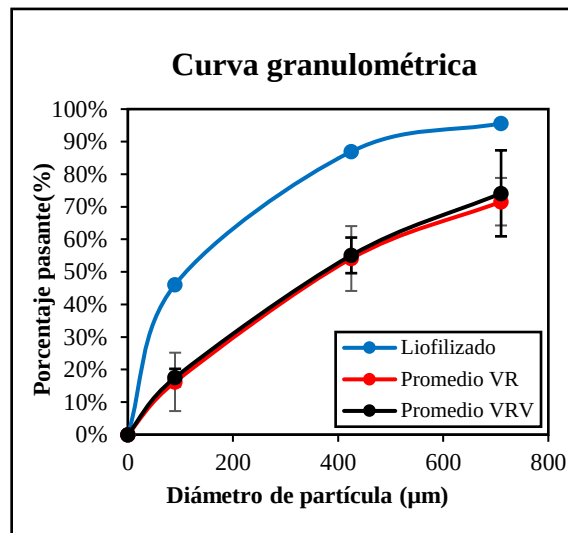


Figura 25: Curva granulométrica del polvo

En el gráfico de distribución de tamaño de partícula (**Figura 24**) se aprecia que el polvo de manzana obtenido con VR y VRV presentan una distribución de tamaño similar entre sí, mientras que el polvo liofilizado contiene una mayor proporción de polvo fino (<90 micras) y una menor proporción de polvo grueso (>710 micras). De la misma forma, los d_{50} obtenidos para VRV y VRV fueron muy similares, siendo el d_{50} del polvo liofilizado considerablemente menor.

Por otro lado, en la curva granulométrica (**Figura 25**) se observa que prácticamente la totalidad del polvo de manzana liofilizado se encuentra bajo las 710 micras, mientras que cerca del 70% del polvo de manzana obtenido con VR y VRV se encuentra también en este rango. Se considera que el tamaño ideal de partículas de fibra para consumo humano está en el rango de 50 a 500 μm , tamaños menores puede provocar problemas en la rehidratación del producto al favorecer la formación de grumos, tamaños mayores a este rango puede afectar a la apariencia del producto y dificultar la masticación y deglución (Sánchez, 2005). Desde este punto de vista, el polvo de manzana liofilizado presenta una mejor distribución de tamaño ya que más del 90% del polvo presenta un tamaño menor a las 500 micras, mientras que cerca del 60% del polvo obtenido con VR y VRV se encuentra en este rango.

4.5. Sólidos solubles totales

En la **Figura 26** se presentan los resultados de los sólidos solubles obtenidos expresados en g SST/g_{bs}.

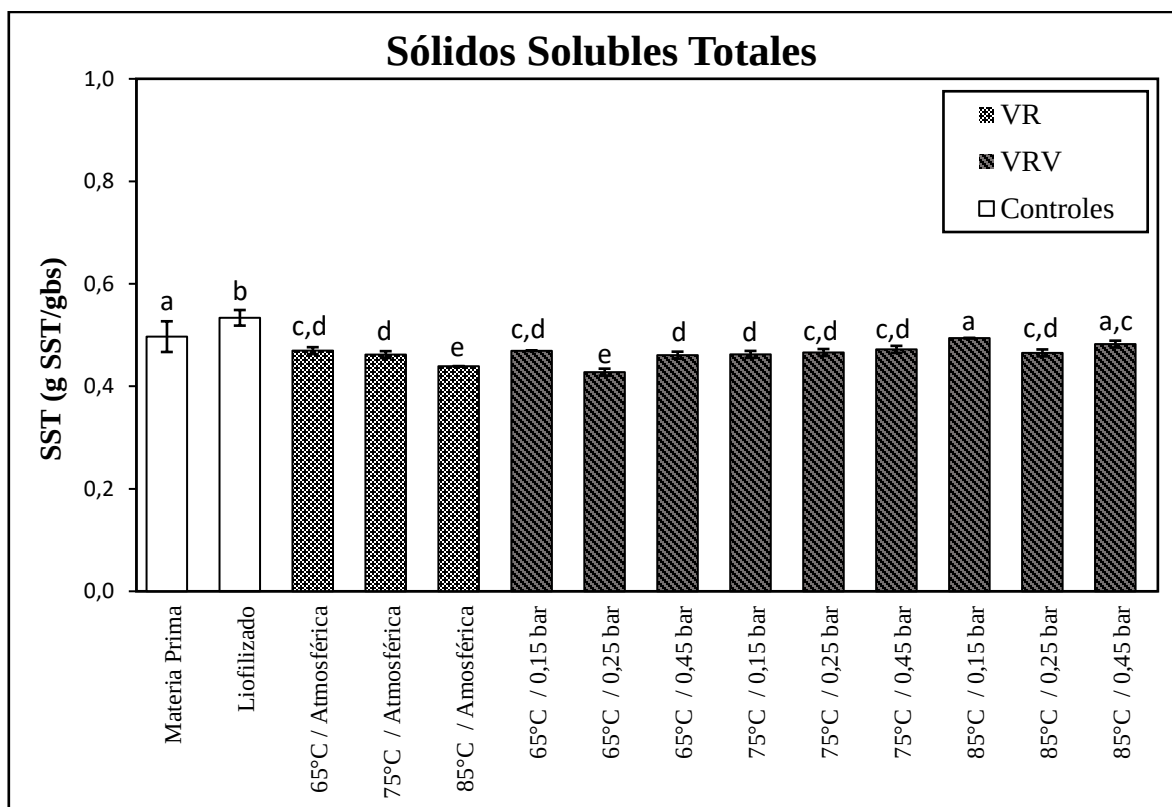


Figura 26: Sólidos solubles totales en polvo de manzana secado con VR, VRV y liofilizado

*Diferentes letras minúsculas indican diferencias significativas entre ambas mediciones ($p \leq 0,05$)

Se observa que los sólidos solubles totales tanto en la pomasa de manzana fresca como en el polvo de manzana son similares, siendo poco influenciado por las condiciones de secado. El polvo de manzana presenta con un valor promedio de $0,46 \pm 0,02$ g SST/gbs. Si bien los valores son similares, existen diferencias significativas ($p < 0,5$) para algunas condiciones de secado, estas pueden atribuirse a la diferencia del estado de maduración de las manzanas utilizadas o a la misma variabilidad del método utilizado. Los resultados obtenidos son similares a los de Sato et al., (2009) quien reportó un valor promedio de $0,394 \pm 0,085$ g SST/g producto, para pomasa de manzana en polvo producido de 11 distintos cultivos. La alta variación indicó que la pomasa de manzana de proveniente de distintos cultivos de manzana presentan distinta composición fisicoquímica.

4.6. Color

Como se indicó en la **Sección 5.9**, la colorimetría compara los parámetros obtenidos de una muestra y de una referencia para calcular el nivel de diferencia entre ambos colores. Para este trabajo se utiliza como referencia los parámetros de color del producto liofilizado, ya que este es un producto premium en el mercado y se caracteriza por presentar un mejor color con respecto a otros tipos de secados.

En las **Figuras 27** se muestra la referencia, es decir, el producto obtenido por liofilizado. En las **Figuras 28, 29 y 30** se muestran los productos obtenidos con la VR y VRV.

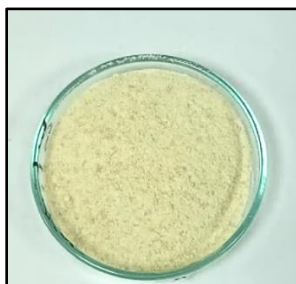


Figura 27: Polvo de manzana liofilizado (referencia)



Figura 28: Polvo de manzana a 65°C y Atmosférica, 0.15, 0.25 y 0.45 bar de presión de vacío, respectivamente

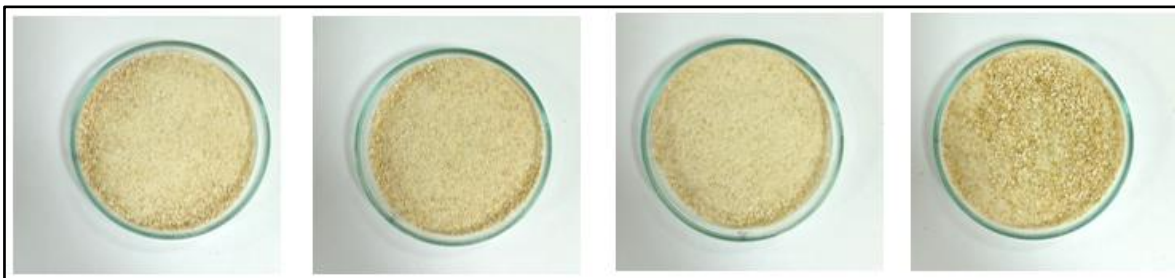


Figura 29: Polvo de manzana a 75°C y Atmosférica, 0.15, 0.25 y 0.45 bar de presión de vacío, respectivamente

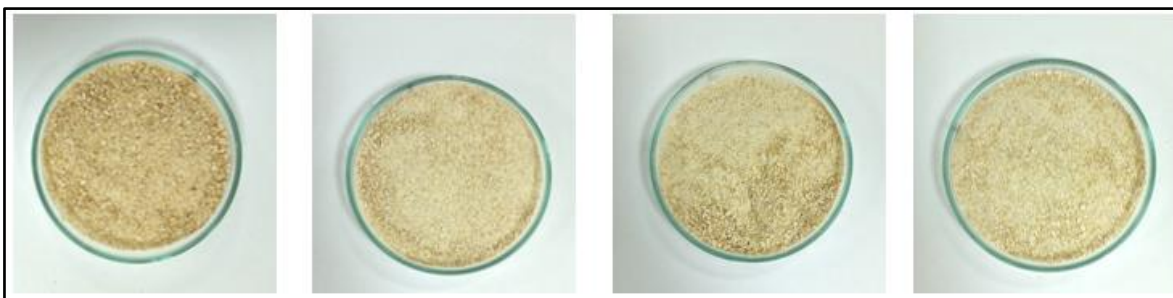


Figura 30: Polvo de manzana a 85°C y Atmosférica, 0.15, 0.25 y 0.45 bar de presión de vacío, respectivamente

En la **Tabla 14** se presentan los parámetros L^* , a^* y b^* obtenidos con el colorímetro Konica Minolta CR-410.

Tabla 14: Parámetros del espacio CIELAB en el polvo de manzana

Método de Secado	Temperatura (°C)	Presión (bar)	L^*	a^*	b^*
Liofilizado	20	6.3E-4	68.28±0.32 ^a	-3.26±0.02 ^a	13.69±0.03 ^a
Ventana refractiva	65	Atmosférica	62.06±0.03 ^b	-2.17±0.04 ^b	16.82±0.02 ^b
	75	Atmosférica	62.73±0.27 ^c	-2.07±0.03 ^c	16.01±0.19 ^c
	85	Atmosférica	58.12±0.40 ^d	-0.88±0.03 ^d	15.89±0.26 ^c
	85	Atmosférica	57.12±0.20 ⁱ	-0.95±0.02 ^d	14.56±0.10 ^h
Ventana refractiva acoplada con vacío	65	0.15	60.87±0.11 ^e	-1.54±0.03 ^e	17.88±0.17 ^d
	65	0.25	61.39±0.34 ^f	-1.82±0.02 ^f	17.10±0.15 ^{b,e}
	65	0.45	61.32±0.10 ^f	-2.82±0.04 ^g	17.31±0.32 ^e
	75	0.15	61.44±0.29 ^f	-1.79±0.05 ^f	16.48±0.26 ^f
	75	0.25	64.86±0.29 ^g	-2.38±0.01 ^h	15.59±0.01 ^f
	75	0.45	61.26±0.21 ^{e,f}	-2.34±0.02 ^h	17.20±0.05 ^e
	85	0.15	60.42±0.33 ^h	-0.79±0.14 ⁱ	15.38±0.14 ^g
	85	0.45	65.57±0.25 ^j	-1.97±0.01 ^j	14.40±0.20 ^h

*Diferentes letras minúsculas indican diferencias significativas entre ambas mediciones ($p \leq 0.05$)

Se aprecia que el mayor valor de L^* obtenido es para el producto liofilizado, es decir, que este producto presenta la mayor luminosidad. Para los secados con VR y VRV se obtiene el mayor valor para el secado con VRV a 85°C y 0.45 bar, mientras que el menor se obtiene en el secado con VR a 85°C. Los valores de L^* obtenido son similares a los reportados por Sato et al., (2009) quien obtuvo un valor promedio de 59.7±2.93 para pomasa de manzana en polvo, secada por secado convectivo con temperaturas de 60 y 42.5°C en el aire y la pomasa, respectivamente.

Los parámetros a^* presentaron valores negativos en cada uno de los experimentos, lo que indica una coloración verde, la cual es característica de la cáscara de la manzana Granny Smith. El producto que presentó un color verde más pronunciado fue el liofilizado. Luego del liofilizado, el color más verde se encontró en el secado con VRV a 65°C y 0.45 bar, mientras que para el secado con VR a 85°C presentó un color ligeramente más rojizo que el resto debido al pardeamiento producido por la temperatura.

Por último, los parámetros b^* presentaron todos valores positivos, similares a los reportados por Carson et al., (1994), el valor positivo indica una coloración amarilla, siendo el liofilizado el secado con el valor más bajo. El color amarillo más intenso se obtuvo en el secado con VRV a 65°C y 0.15 bar, lo que también indica un pardeamiento en la muestra.

La **Figura 31** presenta la diferencia total de color obtenida para cada secado con VR y VRV respecto del liofilizado. El ΔE más pequeño fue de 3.1 ± 0.1 , el cual se obtuvo en el secado por VRV a 85 y 0.45 bar.

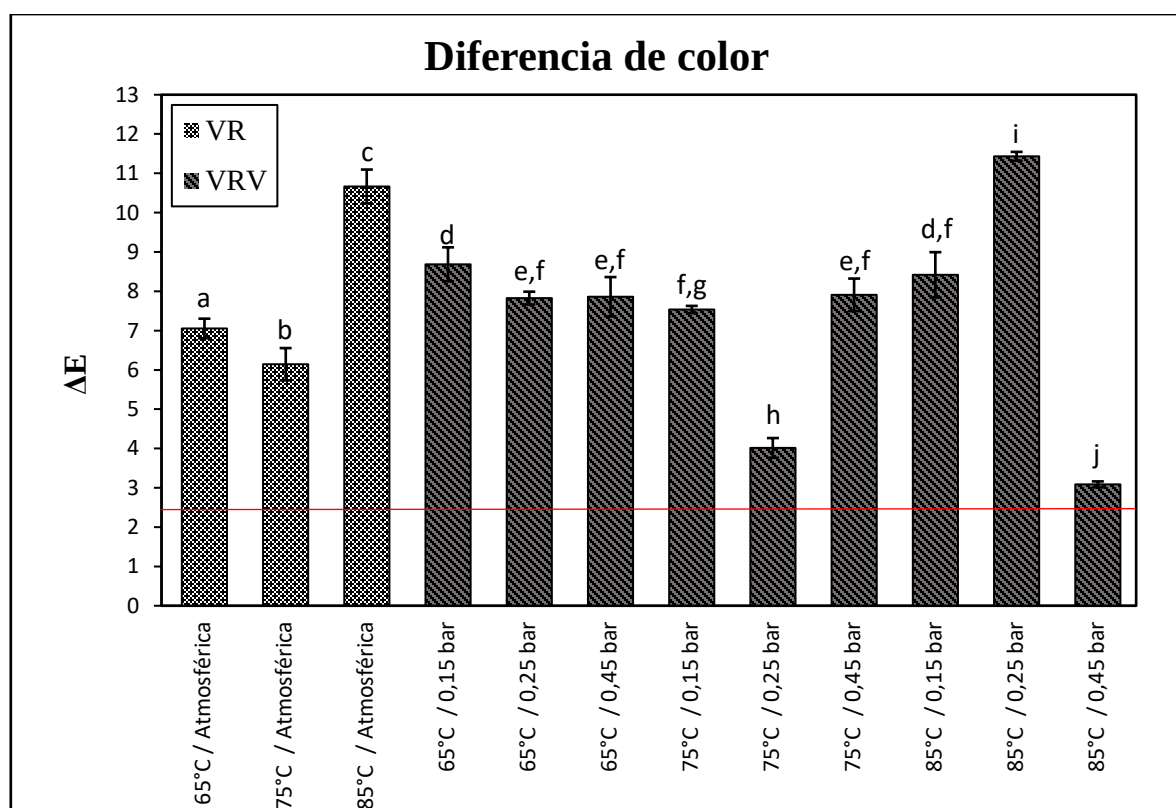


Figura 31: Diferencia de color en polvo de manzana secado con VR y VRV

*Diferentes letras minúsculas indican diferencias significativas entre ambas mediciones ($p \leq 0.05$)

Los valores de ΔE obtenidos fueron todos mayores a 3, por lo que se existe al menos una diferencia de color perceptible entre el producto liofilizado y el producto obtenido con

VR y VRV. La diferencia de color más pequeña se obtuvo en el secado con VRV a 85°C y 0.45 bar, mientras que la mayor diferencia se obtuvo en el secado con VRV a 85°C y 0.25 bar, obteniéndose una diferencia considerada grande.

Se obtuvieron diferencias significativas en el color del producto ($p > 0.05$). Se observa que la diferencia de color es más apreciable en los secados a 85°C lo cual se debe a la alta temperatura, con excepción del secado con VRV a 85°C y 0.45 bar, el cual como se mencionó presentó el color más cercano al liofilizado, esta gran diferencia puede explicarse por la reducción del oxígeno dentro de la cámara de vacío en el caso de secado a 85°C y 0.45 bar inhibiendo el pardeamiento enzimático, pero principalmente debido la reducción del tiempo de secado lo que limita el pardeamiento por temperatura.

Por otro lado, no es extraño que exista una mayor diferencia de color en los secados con VRV a 0.15 y 0.25 bar con respecto a los secados con VR, ya que estos presentaron una mayor temperatura de secado y tiempos de secado iguales o mayores, propiciando el pardeamiento.

Por último, las diferencias de color también pudieron verse afectadas por la distribución del tamaño de partícula y a la presencia de mayor cantidad de cáscara al realizar la medición.

4.7. Polifenoles

En la **Figura 32** se observan los resultados obtenidos del contenido de polifenoles totales en las muestras, y en el **Anexo 3** se muestra la curva de calibración de ácido gálico equivalente. Se obtiene que el valor máximo fue de 6.19 ± 0.12 mg GAE/g_{bs} en el polvo liofilizado, seguido por el polvo obtenido por VRV a 65°C y 0.45 bar con un valor de 5.84 ± 0.29 mg GAE/g_{bs}, mientras que el valor más bajo fue de 4.21 ± 0.09 en el polvo obtenido por VRV a 75°C y 0.15 bar.

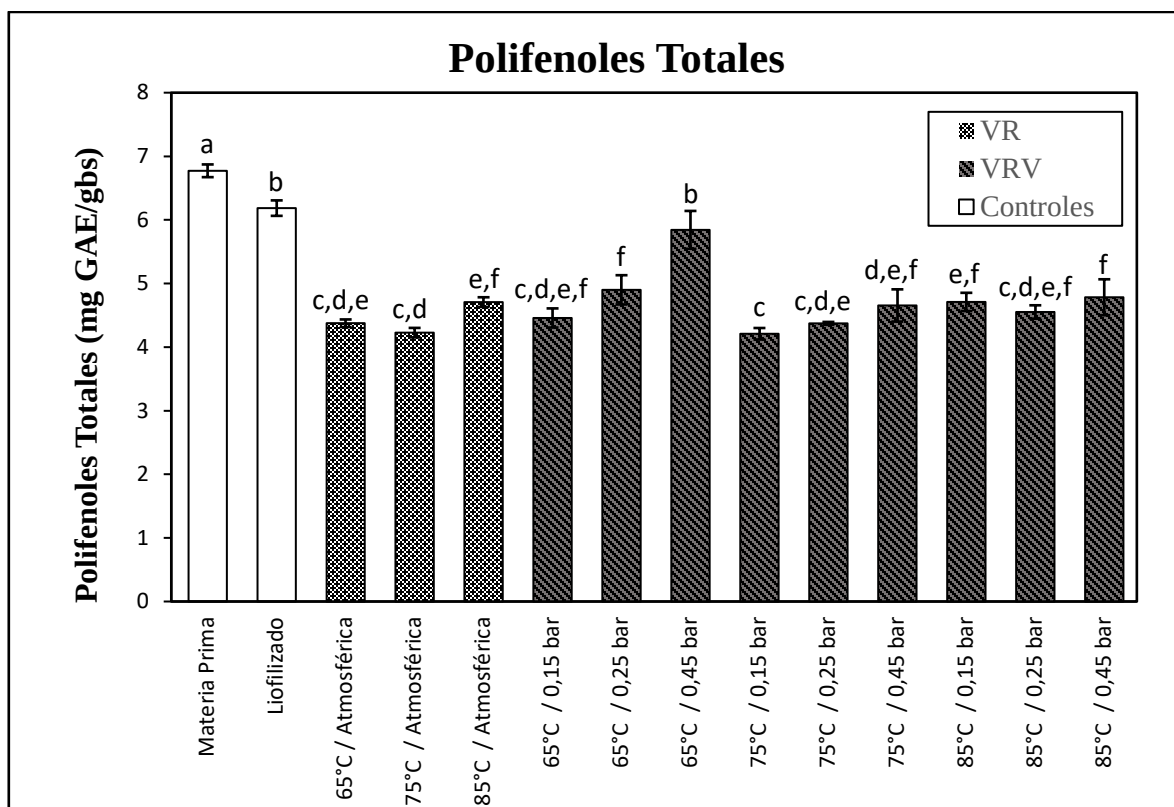


Figura 32: Polifenoles totales en polvo de manzana secado con VR, VRV y liofilizado

*Diferentes letras minúsculas indican diferencias significativas entre ambas mediciones ($p \leq 0.05$)

Con respecto al contenido de polifenoles, se puede observar que los valores obtenidos para VR y VRV a distintas presiones no presentan diferencias significativas ($p \leq 0.05$) a una misma temperatura, a excepción de los secados con VRV a 65 y 75°C con 0.45 bar los cuales sí presentan diferencias significativas ($p > 0.05$), siendo mayor el efecto del vacío a menores temperaturas, con respecto a la conservación de los compuestos fenólicos.

Al igual que lo obtenido en este trabajo, Dadhaneeya et al., (2023) quien compara la retención de polifenoles totales de rodajas y pulpa de banana, utilizando secado por VR, liofilizado, convectivo y horno al vacío, reporta una mayor retención de polifenoles en el secado por liofilización que por la ventana refractiva.

Sato et al., (2009) reportó resultados de retención de compuestos fenólicos similares a los encontrados en este trabajo, obteniendo 4.37 ± 0.08 mg GAE/g de polvo de pomasa de manzana secado con secador convectivo a 60°C, con una humedad final de $11.64 \pm 0.83\%$, lo que corresponde a 4.91 mg GAE/g_{bs}.

Por otro lado, los valores de polifenoles totales reportados por Almeida-Transviña et al., (2014) para polvo de pomasa de manzana, se encontraron en el rango de 1.89 y 2.67 mg

GAE/g para secados en horno y horno al vacío. Concluyendo que la utilización de vacío sin llegar a la ebullición logró mejorar la retención de polifenoles. Los valores obtenidos en este trabajo son mayores a los reportados por Almeida-Transviña et al., (2014), esto se puede explicar principalmente debido a que el secado con VR presenta mayor retención de polifenoles que el secado con horno (Dadhaneeya et al., 2023).

4.8. Actividad antioxidante

En la **Figura 33** se observan los resultados obtenidos de la actividad antioxidante de las muestras, y en el **Anexo 4** se muestra a modo de ejemplo una de las curvas de calibración de Trolox equivalente obtenidas, ya que, en este caso se obtuvo una curva por cada vez que fue repetido el experimento. Análogamente a los polifenoles, para la actividad antioxidante también se obtiene que el valor máximo fue en el polvo liofilizado con un valor de 54.0 ± 4.82 $\mu\text{mol TE/g}_{\text{bs}}$, seguido por el polvo obtenido con VRV a 65°C y 0.45 bar y VR a 85°C , los cuales tuvieron un valor de 50.0 ± 1.30 $\mu\text{mol TE/g}_{\text{bs}}$ y 50.0 ± 3.23 $\mu\text{mol TE/g}_{\text{bs}}$, respectivamente, mientras que el valor más bajo fue de 36.2 ± 0.18 $\mu\text{mol TE/g}_{\text{bs}}$ en el polvo obtenido por VR a 75°C .

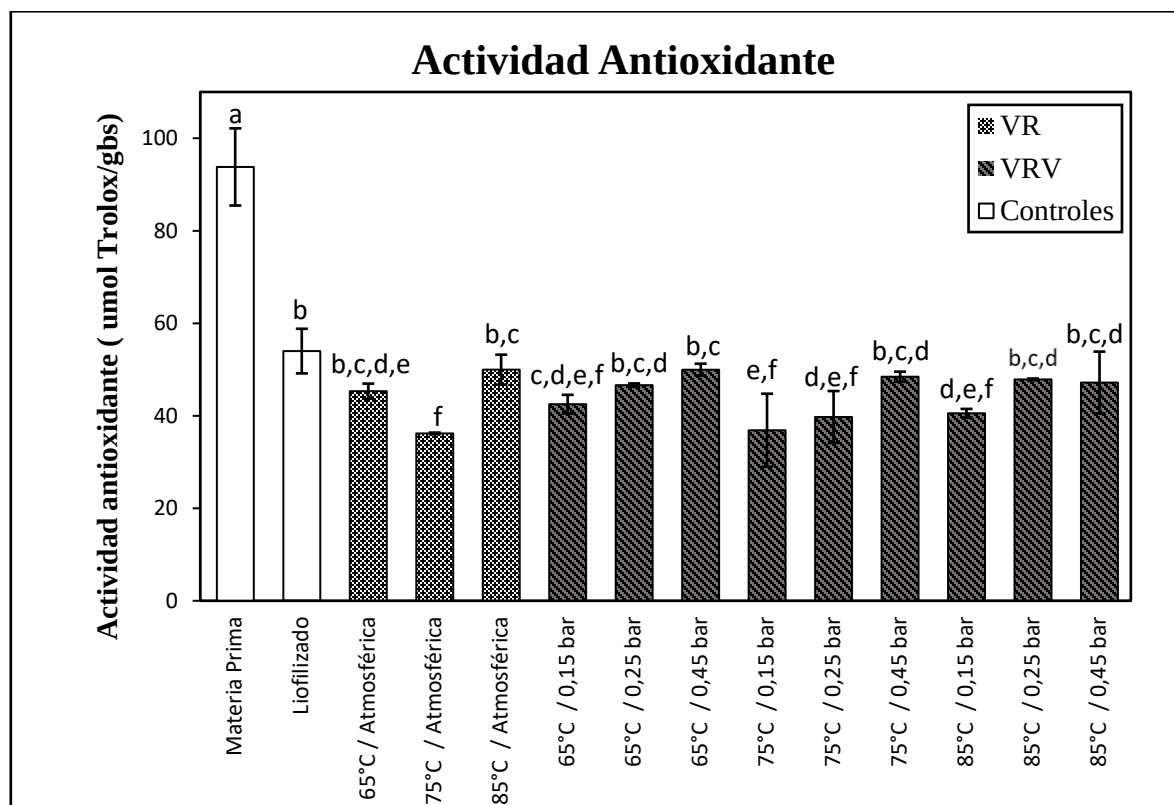


Figura 33: Actividad antioxidante en polvo de manzana secado con VR, VRV y liofilizado

*Diferentes letras minúsculas indican diferencias significativas entre ambas mediciones ($p \leq 0.05$)

Se puede apreciar que existe una gran pérdida de actividad antioxidante con respecto a la materia prima, esto debido a las reacciones de pardeamiento que tienen lugar durante el secado. Por otro lado, los valores obtenidos para el secado con VR para 75°C son menores que a 65 y 85°C, mientras que entre 65 y 85°C no se observan diferencias significativas ($p \leq 0.05$). Con respecto a los secados con VRV no se observan diferencias significativas ($p \leq 0.05$) para las diferentes presiones de vacío, a excepción del secado a 75°C y 0.45 bar el cual presento valores mayores con respecto a los demás secados a esa temperatura, pero similares a los obtenidos a 65 y 85°C.

Al igual que lo obtenido en este trabajo, Ramírez et al., (2012) reportó que para secado convectivo a 50, 60, 70 y 80°C, se obtuvo una gran reducción de la actividad antioxidante con respecto a la materia prima, sin embargo, no se obtuvieron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) entre los secados a distintas temperaturas, presentando un valor más alto a 80°C, lo que puede atribuirse principalmente a los menores tiempos de secado a temperaturas más altas.

De igual forma a los polifenoles, Dadhaneeya et al., (2023) reportó una actividad antioxidante en el secado por liofilización ligeramente mayor a la obtenida en VR.

Por último, Sato et al., (2009) reportó resultados de actividad antioxidante similares a los obtenidos en este trabajo para polvo de pomasa de manzana, reportando un valor de $46.32 \pm 0.51 \mu\text{mol TE/g}$, con una humedad de $11.64 \pm 0.83\%$, lo que corresponde a $52.04 \mu\text{mol TE/g}_{\text{bs}}$.

4.9. Fibra dietética

El análisis de la fibra dietaria total, soluble e insoluble del producto final se realiza con 50 gramos de polvo de manzana a una única condición de secado, la cual corresponde al secado con ventana refractiva acoplada con vacío a 65°C y 0.45 bar de vacío parcial. Los resultados obtenidos se presentan en la **Tabla 15**.

Tabla 15: Fibra dietaria en polvo de manzana secado con VRV

Ensayo	Cantidad (g/100g)
Fibra dietaria Insoluble	32.4
Fibra dietaria Soluble	11.4
Fibra dietaria Total	43.8

Se obtiene que el polvo bioactivo de manzana contiene un contenido total de fibra de 43.8 g/100 g, 32.4 g/100 g de fibra insoluble y 11.4 g/100g de fibra soluble, por lo que se puede decir que el polvo bioactivo de manzana es una fuente ideal de fibra, ya que la proporción entre las fibras es cercana a 3:1.

Bhushan et al., (2008) reportó que la pomasa de manzana en polvo contiene entre 35 y 60 g/100g de fibra dietética dependiendo del tipo de manzana y de método preparación empleado, de los cuales 36,5 gramos corresponden a fibra insoluble y 14.6 gramos a fibra soluble. Mientras que Yan & Kerr, (2013) reportó contenidos de fibra dietética total de 44.2 ± 2.6 ; 48.4 ± 3.2 y 49.5 ± 2.3 g/100g en polvo de pomasa de manzana secada en un secador continuo de correa al vacío a temperaturas de 80, 95 y 110°C, no presentando diferencias significativas ($P < 0.05$) entre las temperaturas de secado.

Por otro lado, otros estudios muestran que la fibra soluble puede degradarse al secar el alimento a temperaturas mayores a 100°C, como también puede modificar la proporción entre ambos tipos de fibra. Además, Henríquez et al., (2010) quien realiza experimentos con cáscara de manzana, obtiene resultados similares de fibra dietaria total, pero con una proporción de fibra soluble mucho mayor, lo que podría indicar que la fibra soluble se encuentra más concentrada en la cáscara de la fruta.

Por ultimo, los resultados de fibra dietaria total obtenidos son similares a los obtenidos por Ktenioudaki et al., (2013), quien estudia el uso del polvo de pomasa de manzana liofilizado como un suplemento funcional para la harina de trigo, reportando un contenido de 42.7 ± 0.7 g/100 g de fibra dietaria total, 36.5 ± 1.1 gramos de fibra insoluble y 6.6 ± 0.1 gramos de fibra soluble. Como ya se mencionó, la diferencia en la proporción de fibra soluble e insoluble puede deberse a muchos factores, como la tecnología utilizada, las condiciones de secado, el tipo de manzana y la composición de la pomasa.

5. CONCLUSIONES

En esta investigación consiguió desarrollar de un sistema de secado de ventana refractiva acoplada con vacío, el cual se utilizó para secar pomasa de manzana en el intervalo de 65 a 85°C y a presiones de vacío entre 0.15 a 0.45 bar.

La utilización del sistema VRV consiguió disminuir el tiempo de secado a todas las temperaturas de secado entre un 17 y 25% con respecto a la VR, solo cuando la aplicación de presión de vacío fue de 0.45 bar. Esta reducción del tiempo de secado se debe a la diferencia de presión de vapor entre el ambiente dentro de la cámara de vacío y la superficie de las muestras de pomasa. Al operar con presiones de vacío de 0.15 y 0.25 bar, no se consiguió retirar suficientemente rápido la humedad dentro de la cámara, disminuyendo esta diferencia de presión de vapor y entorpeciendo el secado. Además, al estudiar los perfiles de temperatura de los secados con VR y VRV, se observó que la temperatura de secado del sistema VRV es cerca de 10°C mayor que el secado con VR lo que también genera un secado más rápido, esto considerando como la temperatura real de secado a la temperatura de la superficie superior del mylar y no la temperatura del agua.

Se consiguió la validación del modelo de difusión propuesto por Crank obteniendo un buen ajuste a los datos experimentales con un R^2 entre 0.973 y 0.995. Además, se obtuvo los coeficientes de difusión (D_{eff}), los cuales se encuentran en el orden de 10^{-8} para los secados a 65°C y 10^{-7} para los secados a 75 y 85°C, siendo mayor al utilizar el sistema VRV a todas las temperaturas, nuevamente solo con la aplicación de una presión de vacío de 0.45 bar.

Comparativamente, utilizando el secado por liofilizado como referencia, tanto el secado con VR y VRV presentaron una buena retención de sus características fisicoquímicas y compuestos bioactivos. Después del liofilizado, polvo de pomasa de manzana secado por VRV a 65°C y 0.45 bar de presión de vacío fue el que obtuvo un mayor contenido de PFT y actividad antioxidante. Además, el polvo secado con esta configuración presentó un contenido de FDT de 43.8 (g/100g) y una distribución de FDI y FDS cercana a 3:1, por lo que es una fuente ideal de fibra.

Finalmente, el sistema VRV desarrollado sí presentó una mejora con respecto a la VR convencional, por otro lado, esta mejora está limitada al intervalo de operación estudiado en esta investigación, ya que la operación con una mayor presión de vacío provoca la inundación de la cámara.

6. RECOMENDACIONES

Para futuras investigaciones que utilicen la VRV se recomienda:

- Lubricar los pernos soldados en la tapa y fondo de la cámara de vacío cada vez que la cámara sea desarmada o se cambie el fondo, para evitar la fractura de los pernos al volver a ensamblar.
- Renovar las gomas de la tapa y fondo de la cámara de vacío periódicamente en caso de encontrarse en mal estado para asegurar la hermeticidad de la cámara de vacío.
- Aumentar la presión de vacío, utilizando un fondo de otro material y observar más ampliamente el efecto del vacío.
- Experimentar con alimentos sólidos que permitan su colocación en la cámara de vacío al instante de comenzar el secado, a modo de dar tiempo a la cámara de precalentarse y así evitar el condensado en la tapa de acrílico.



7. REFERENCIAS

- Ahmed, N., Singh, J., Chauhan, H., Anisa, P., & Kour, H. (2013). Different Drying Methods: Their Applications and Recent Advances. *International Journal of Food Nutrition and Safety*, 4(1): 34-42. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/275650176_Different_Drying_Methods_Their_Applications_and_Recent_Advances
- Almeida-Transviña, F., Medina, S., Ortega, E., Salmerón, I., & Pérez, S. (2014). Vacuum Drying Optimization and Simulation as a Preservation Method of Antioxidants in Apple Pomace. *Journal of Food Process Engineering*, 37(6), 575-587. Obtenido de <https://doi.org/10.1111/jfpe.12112>
- Anggraini, T., Febrianti, F., Aisman, S. I., & Firshty, F. (2015). Black Tea With Averrhoa bilimbi L Extract: A Healthy Beverage. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 9, 241-252. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2016.02.141>
- AOAC. (1996). *Official Method 934.06 Moisture in Dried Fruits*.
- AOAC. (2016). *Official Method of Analysis*. 20th ed.
- Arroyo, Y., Carrasco, M., Bueno, A., Cardeña, R., & Luízar, C. (2008). Obtención y caracterización funcional de las fibras dietéticas del níspero común (*Mespilus germanica*). *Revista Sociedad Química del Perú*, 74(4), 269-281. Obtenido de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=371937611007>
- Asiimwe, A., Kigozi, J., Baidhe, E., & Muyonga, J. (2022). Optimization of refractance window drying conditions for passion fruit puree. *LWT*, 154, 112742. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112742>
- Banat, F. (1994). *Membrane distillation for desalination and removal of volatile organic compounds from water*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/30005439_Membrane_distillation_for_desalination_and_removal_of_volatile_organic_compounds_from_water/citations
- Bazyma, L., & Kutovoy, V. (2005). Vacuum drying and hybrid technologies. *Stewart Postharvest Review*, 1(4), 1-4. Obtenido de <https://doi.org/10.2212/spr.2005.4.7>



- Beckles, D. (2012). Factors affecting the postharvest soluble solids and sugar content of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 63(1), 129-140. Obtenido de <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v32i1.3176>
- Bhushan, S., Kalia, K., Sharma, M., Singh, B., & P.S., A. (2008). Processing of Apple Pomace for Bioactive Molecules. *Critical Reviews in Biotechnology*, 28(4), 285-296.
- Caparino, O., Tang, J., Nindo, C., Sablani, S., Powers, J., & Fellman, J. (2011). Effect of drying methods on the physical properties and microstructures of mango (Philippine 'Carabao' var.) powder. *Journal of Food Engineering*, 111(1), 135-148. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.01.010>
- Carson, K., Collins, J., & Penfield, M. (1994). Unrefined, Dried Apple Pomace as a Potential Food Ingredient. *Journal of food science*, 59(6), 1213-1215. Obtenido de <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1994.tb14679.x>
- Coronado, M., Vega y León, S., Gutiérrez, R., Vázquez, M., & Radilla, C. (2015). Antioxidantes: perspectiva actual para la salud humana. *Revista chilena de nutrición*, 42(2), 206-212. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-75182015000200014>
- Cossignani, L., Ianni, F., Blasi, F., Pollini, L., Di Michele, A., Pagano, C., . . . Perioli, L. (2023). Effect of Different Drying Treatments and Sieving on Royal Gala Apple Pomace, a Thickening Agent with Antioxidant Properties. *Plants*, 12(4), 906. Obtenido de <https://doi.org/10.3390/plants12040906>
- Crank, J. (1975). *The Mathematics of Diffusion*. Great Britain : Oxford University Press.
- Creus, E. (2004). Compuestos fenólicos. Un análisis de sus beneficios para la salud. *Offarm*, 23(6), 80-84. Obtenido de <https://www.elsevier.es/es-revista-offarm-4-articulo-compuestos-fenolicos-un-analisis-sus-13063508>
- Cruz, M. G., Bastos, R., Pinto, M., Ferreira, J., Santos, J., Wessel, D., . . . Coimbra, M. (2018). Waste mitigation: From an effluent of apple juice concentrate industry. *Journal of Cleaner Production*, 193, 652-660. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.109>
- Dadhaneeya, H., Nayak, P., Saikia, D., Kondareddy, R., Ray, S., & Kesavan, R. (2023). The impact of refractance window drying on the physicochemical properties and bioactive compounds of malbhog banana slice and pulp. *Applied Food Research*, 3(1), 100279. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.afres.2023.100279>



- Doymaz, I. (2010). Effect of citric acid and blanching pre-treatments on drying and rehydration of Amasya red apples. *Food and Bioproducts Processing*, 88, 124–132. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2009.09.003>
- Escudero, E., & González, P. (2006). La fibra dietética. *Nutrición Hospitalaria*, 21(2), 61-72. Obtenido de https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0212-16112006000500007
- Feng, S., Yi, J., Li, X., Wu, X., Zhao, Y., Ma, y., & Bi, J. (2021). Systematic Review of Phenolic Compounds in Apple Fruits: Compositions, Distribution, Absorption, Metabolism, and Processing Stability. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 69, 7-27. Obtenido de <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c05481>
- Galaz, P., Valdenegro, M., Ramírez, C., Nuñez, H., Almonacid, S., & Simpson, R. (2017). Effect of drum drying temperature on drying kinetic and polyphenol contents in pomegranate peel. *Journal of Food Engineering*, 208, 19-27. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.04.002>
- Garcia, A., & Guerrero, S. (2014). Relationships Between Texture and Rheological Properties in Blanched Apple Slices (var. Granny Smith) Studied by Partial. *Food and Bioprocess Technology*, 7, 2840-2854. Obtenido de <https://doi.org/10.1007/s11947-014-1259-0>
- Henríquez, C., Speisky, H., Chiffelle, I., Valenzuela, T., Araya, M., Simpson, R., & Almonacid, S. (2010). Development of an Ingredient Containing Apple Peel, as a Source of Polyphenols and Dietary Fiber. *Journal of Food Science*, 75(6), 172-181. Obtenido de <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2010.01700.x>
- Iqonsulting. (2023). *Ecomercioagrario*. Obtenido de <https://ecomercioagrario.com/la-produccion-mundial-de-manzanas-baja-53/>
- Karam, M., Petit, J., Zimmer, D., Baudelaire, E., & Scher, J. (2016). Effects of drying and grinding in production of fruit and vegetable powders: A review. *Journal of Food Engineering*, 188, 32-49. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.05.001>
- Karwacka, M., Ciurzyńska, A., Galus, S., & Janowicz, M. (2022). Freeze-dried snacks obtained from frozen vegetable by-products and apple pomace – Selected properties, energy consumption and carbon footprint. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 77, 102949. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.102949>



- Konica Minolta. (2022). *Entendiendo el espacio de Color CIE L*A*B**. Obtenido de <https://sensing.konicaminolta.us/mx/blog/entendiendo-el-espacio-de-color-cie-lab/>
- Ktenioudaki, A., O'Shea, N., & Gallagher, E. (2013). Rheological properties of wheat dough supplemented with functional by-products of food processing: Brewer's spent grain and apple pomace. *Journal of Food Engineering*, 116(2), 362-368. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.12.005>
- Kumar, N., Kumar, S., Sudhakar, A., Kumar, D., Shankar, S., Thakur, M., . . . Prakash, P. (2021). Refractance WindowTM-Drying vs. other drying methods and effect of different process parameters on quality of foods: A comprehensive review of trends and technological developments. *Future Foods*, 3, 100024. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2021.100024>
- Lin, S., & Brewer, M. (2005). Effect of blanching method on the quality characteristics of frozen peas. *Journal of Food Quality*, 28(4), 313-405. Obtenido de <https://doi.org/10.1111/j.1745-4557.2005.00038.x>
- Liu, Y., Wang, L., Liu, F., & Pan, S. (2016). Effect of Grinding Methods on Structural, Physicochemical, and Functional Properties of Insoluble Dietary Fiber from Orange Peel. *Internacional Journal of Polymer Science*, 1-7. Obtenido de <https://doi.org/10.1155/2016/6269302>
- Mauro, M., Monnerat, S., & Rodrigues, A. (2004). Vacuum Drying of Osmotic Dehydrated Apple Slices. *International Drying Symposium*, 14, 2084-2090. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/237483657_VACUUM_DRYING_OF_OSMOTIC_DEHYDRATED_APPLE_SLICES
- Moreno, J., Simpson, R., Estrada, D., Lorenzen, S., Moraga, D., & Almonacid, S. (2011). Effect of pulsed-vacuum and ohmic heating on the osmodehydration kinetics, physical properties and microstructure of apples (cv. Granny Smith). *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 12, 562-568. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2011.06.011>
- Motevali, A., Minaei, S., & Khoshtagaza, M. (2011). Evaluation of energy consumption in different drying methods. *Energy Conversion and Management*, 52(2), 1192-1199. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.09.014>
- Mujumdar, A. S., & Chen, X. D. (2008). *Drying Technologies in Food Processing*. Blackwell.



- Navarro, C., & Martínez, C. (2020). *Determinación de los sólidos solubles de un alimento con un alto y un bajo contenido en agua*. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia.
- Nindo, C., & Tang, J. (2007). Refractance Window Dehydration Technology: A Novel Contact Drying Method. *Drying Technology: An International Journal*, 25(1), 37-48. Obtenido de <https://doi.org/10.1080/07373930601152673>
- Ortiz-Jerez, M., & Ochoa-Martínez, C. (2015). Heat Transfer Mechanisms in Conductive Hydro-Drying of Pumpkin (*Cucurbita maxima*) Pieces. *Drying Technology*, 33(8), 965-972. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.1080/07373937.2015.1009538>
- Ortiz-Jerez, M., Gulati, T., Datta, A., & Ochoa-Martínez, C. (2015). Quantitative Understanding of Refractance Window™ Drying, Food and Bioproducts Processing. *Food and Bioproducts Processing*, 95, 237-253. Obtenido de <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.fbp.2015.05.010>
- Parikh, D. (2015). Vacuum Drying: Basics and Application. *Chemical Engineering - New York- Mcgraw Hill Incorporated then Chemical Week Publishing Llc*, 122(4), 48-54. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/283088611_Vacuum_Drying_Basics_and_Application
- Puente, L., Vega-Gálvez, A., Ah-Hen, K. S., Rodríguez, A., Pasten, A., Poblete, J., . . . Muñoz, M. (2020). Refractance Window drying of goldenberry (*Physalis peruviana* L.) pulp: A comparison of quality characteristics with respect to other drying techniques. *LWT*, 131, 109772. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109772>
- Quizama, S., & Ciccioli, J. (2021). *Secado de frutas y verduras a escala familiar Agencia de Extensión Rural Villa Regina*. Obtenido de https://www.academia.edu/57841819/Secado_de_frutas_y_verduras_a_escalafamiliar_Agencia_de_Extensi%C3%B3n_Rural_Villa_Regina
- Rajkumar, P., Kulanthaisami, S., Raghavan, G., Gariepy, Y., & Orsat, V. (2007). Drying Kinetics of Tomato Slices in Vacuum Assisted Solar. *Drying Technology*, 25 (7-8), 1349–1357. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.1080/07373930701438931>
- Ramírez, M., Ramos, A., Dávila, A., Barnard, J., Abbud, R., Muñoz, J., & Muñoz, E. (2012). Effect of Blanching and Drying Temperature on Polyphenolic Compound Stability and Antioxidant Capacity of Apple Pomace. *Food and Bioprocess Technology*, 5, 2201–2210. Obtenido de <https://doi.org/10.1007/s11947-011-0583-x>



- Sánchez, B. (2005). Caracterización Fisicoquímica y Funcional de la Fibra Dietética del Fruto del Níspero (*Eriobotrya japonica*) y de la Cáscara de Mango Obo (*Mangifera indica* L). *Tesis. Universidad Tecnológica de la Mixteca. México*.
- Sant'Anna, V., Deyse, P., Ferreira, L., & Tessaro, I. C. (2013). Tracking bioactive compounds with colour changes in foods - A review. *Dyes and Pigments*, 98, 601-608. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2013.04.011>
- Sato, M., Vieira, R., Zardo, D., Falcão, L., Nogueira, A., & Wosiacki, G. (2009). Apple pomace from eleven cultivars: an approach to identify sources of bioactive compounds. *Acta Scientiarum Agronomy*, 32(1), 29-35. Obtenido de <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v32i1.3176>
- Shalini, R., & Gupta, D. (2009). Utilization of pomace from apple processing industries: a review. *Journal of Food Science and Technology*, 47(4):365-371. Obtenido de <https://doi.org/10.1007/s13197-010-0061-x>
- Shweta Singh a, S. K. (2022). Analysis of mango drying methods and effect of blanching process based on energy consumption, drying time using multi-criteria decision-making. *Cleaner Engineering and Technology*, 8, 100500. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100500>
- Simpson, R., Ramírez, C., Birchmeier, V., S., A., Moreno, J., Nuñez, H., & Jaques, A. (2015). Diffusion mechanisms during the osmotic dehydration of Granny Smith apples subjected to a moderate electric field. *Journal of Food Engineering*, 166, 204-211. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.05.027>
- Weijie Lan a, C. M. (2021). Mid-infrared technique to forecast cooked puree properties from raw apples: A potential strategy towards sustainability and precision processing. *Food Chemistry*, 355, 129636. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129636>
- Yan, H., & Kerr, W. (2013). Total phenolics content, anthocyanins, and dietary fiber content of apple pomace powders produced by vacuum-belt drying. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 93(6), 1499-1504. Obtenido de <https://doi.org/10.1002/jsfa.5925>
- Yan, T., Liu, R., Shi, L., Wang, Y., Meng, X., & Shen, Y. (2023). Superfine grinding improves the physicochemical, sensory and functional characteristics of Hanfu apple pomace. *Food Science & technology*, 58 (4), 2077-2084. Obtenido de <https://doi.org/10.1111/ijfs.15934>



- Zarein, M., Samadi, S., & Ghobadian, B. (2015). Investigation of microwave dryer effect on energy efficiency during drying of apple slices. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 14(1), 41-47. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2013.06.002>
- Zhu, Y., Pan, Z., McHugh, T., & Barrett, D. (2010). Processing and quality characteristics of apple slices processed under. *Journal of Food Engineering*, 97, 8-16. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.07.021>
- Zotarelli, M., Mattar, B., & Borges, J. (2015). Effect of process variables on the drying rate of mango pulp by Refractance Window. *Food Research International*, 69, 410-417. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.01.013>

8. ANEXOS

8.1. Anexo 1: Perfiles de temperatura

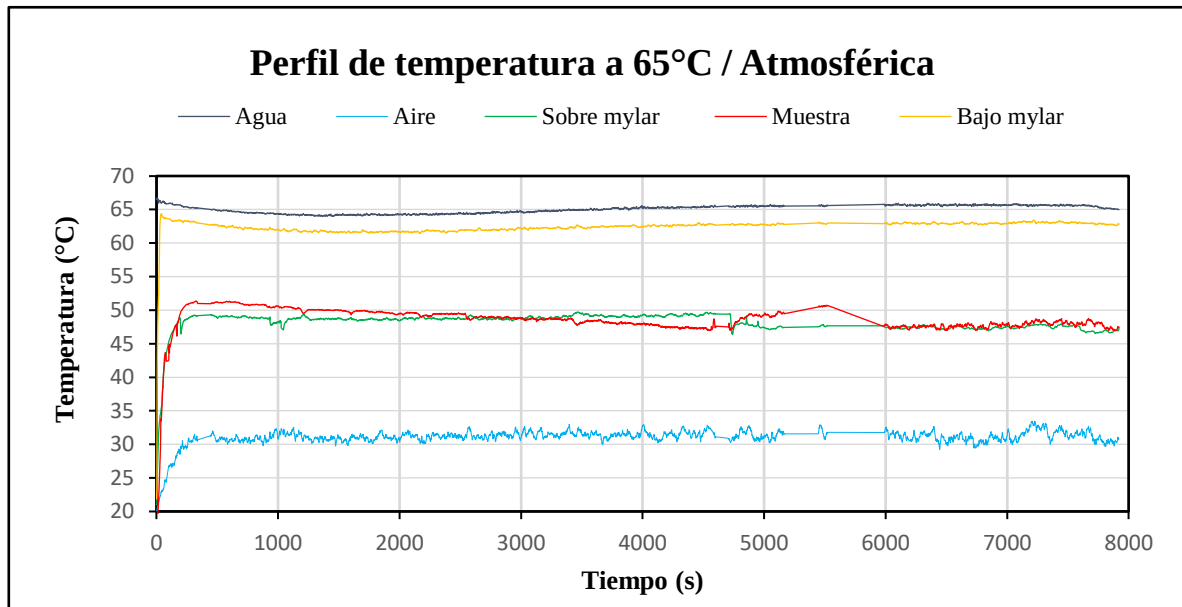


Figura 34: Perfil de temperatura a 65°C y presión atmosférica

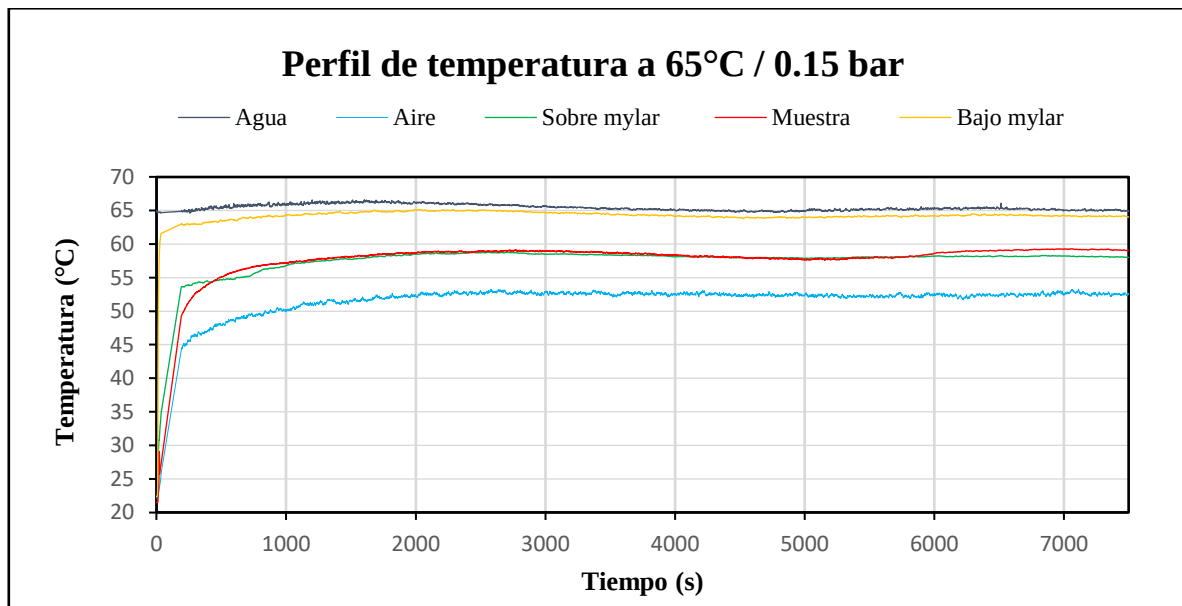


Figura 35: Perfil de temperatura a 65°C y 0.15 bar de presión de vacío

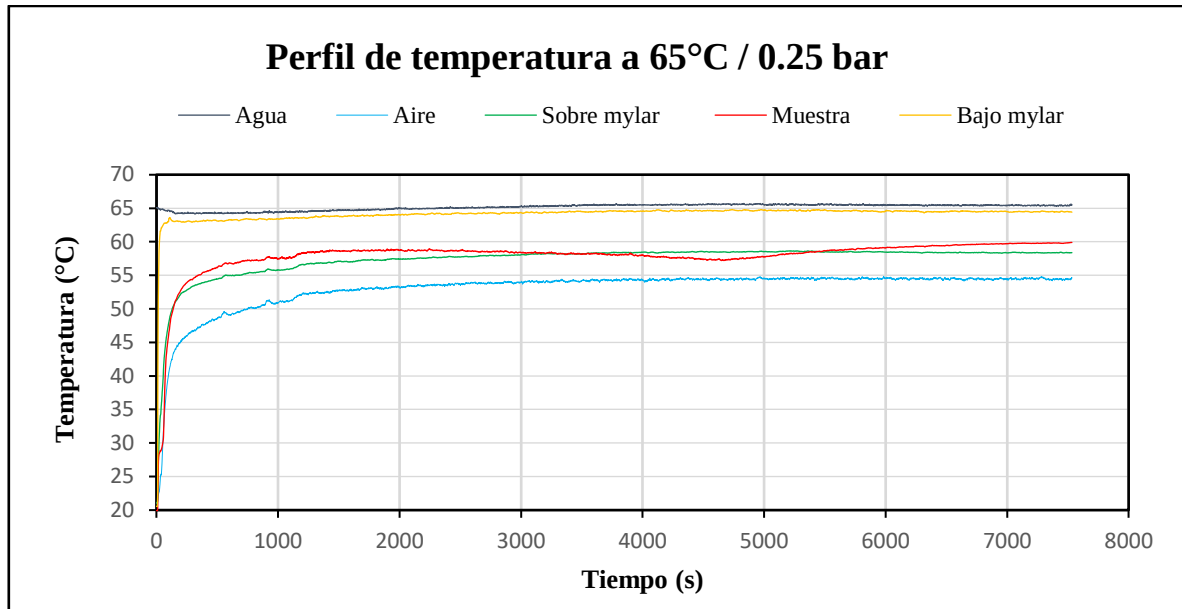


Figura 36: Perfil de temperatura a 65°C y 0.25 bar de presión de vacío

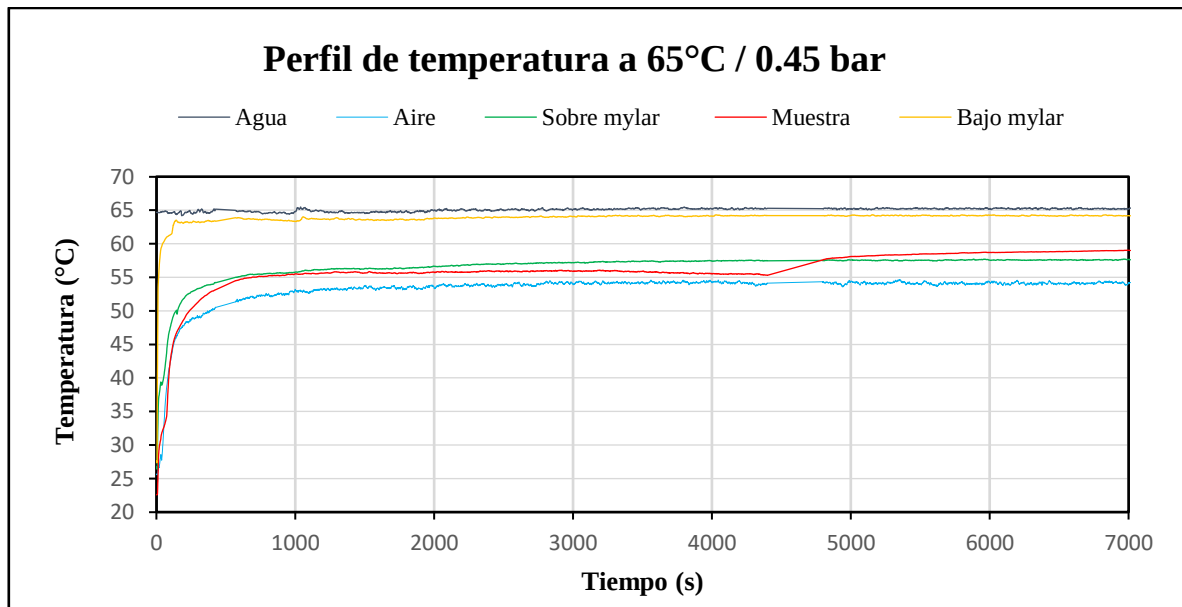


Figura 37: Perfil de temperatura a 65°C y 0.45 bar de presión de vacío

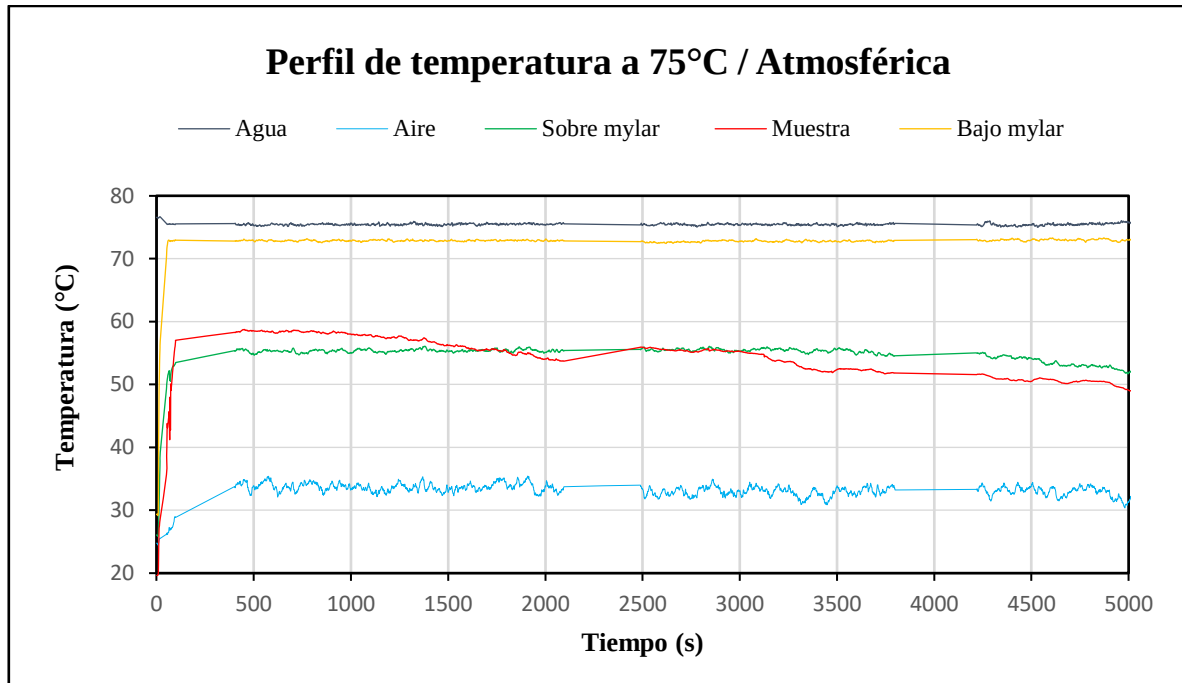


Figura 38: Perfil de temperatura a 75°C y de presión atmosférica

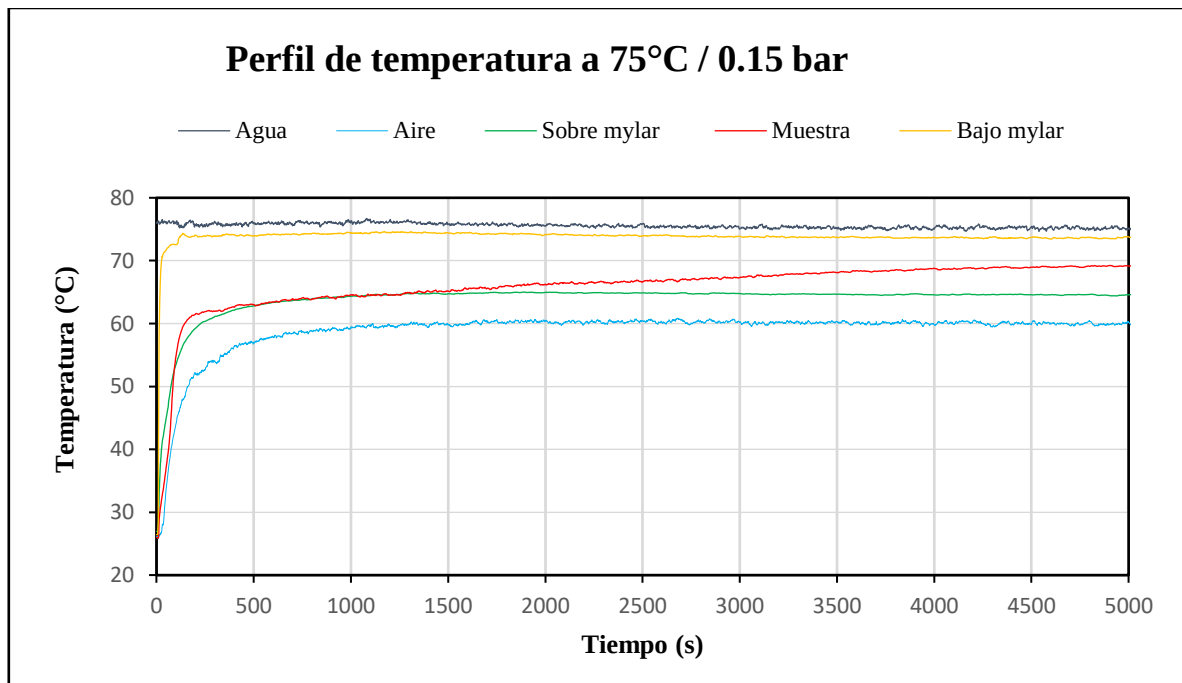


Figura 39: Perfil de temperatura a 75°C y 0.15 bar de presión de vacío

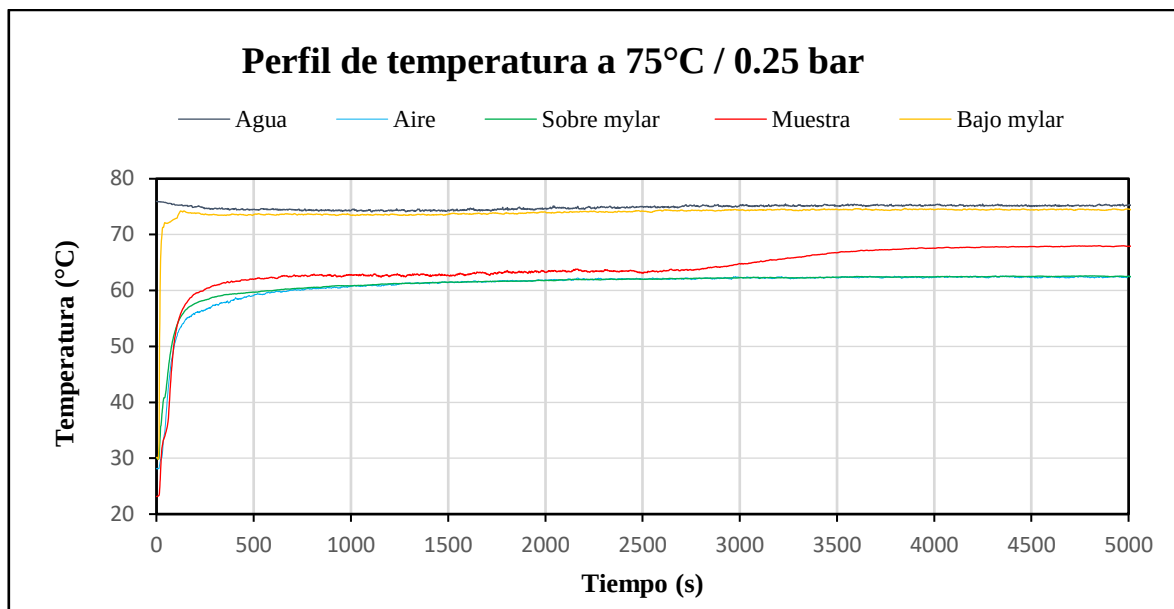


Figura 40: Perfil de temperatura a 75°C y 0.25 bar de presión de vacío

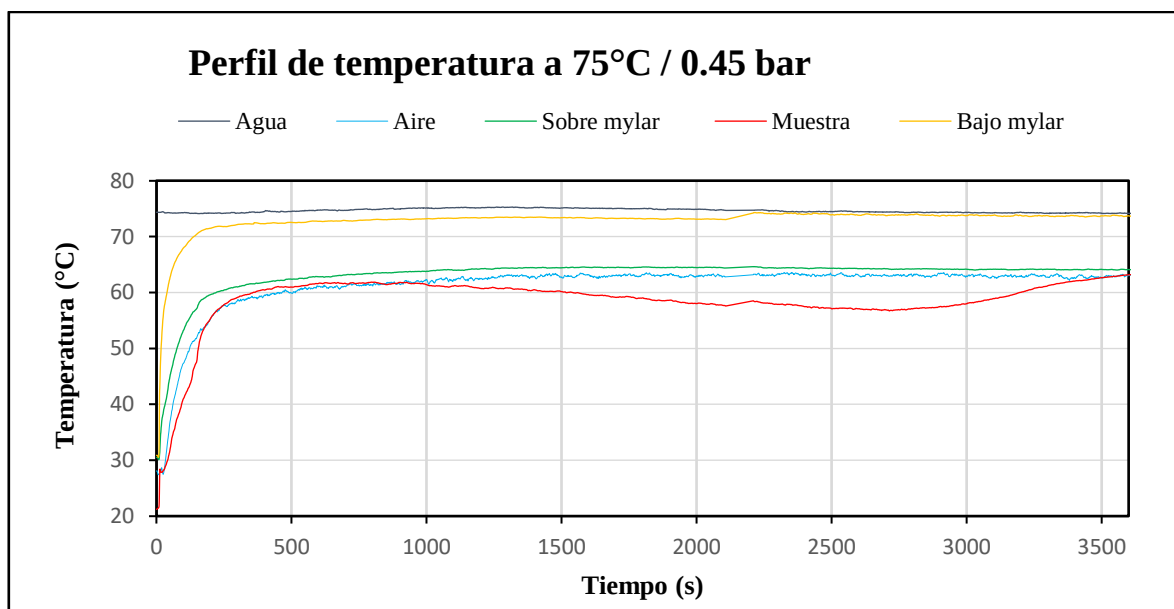


Figura 41: Perfil de temperatura a 75°C y 0.45 bar de presión de vacío

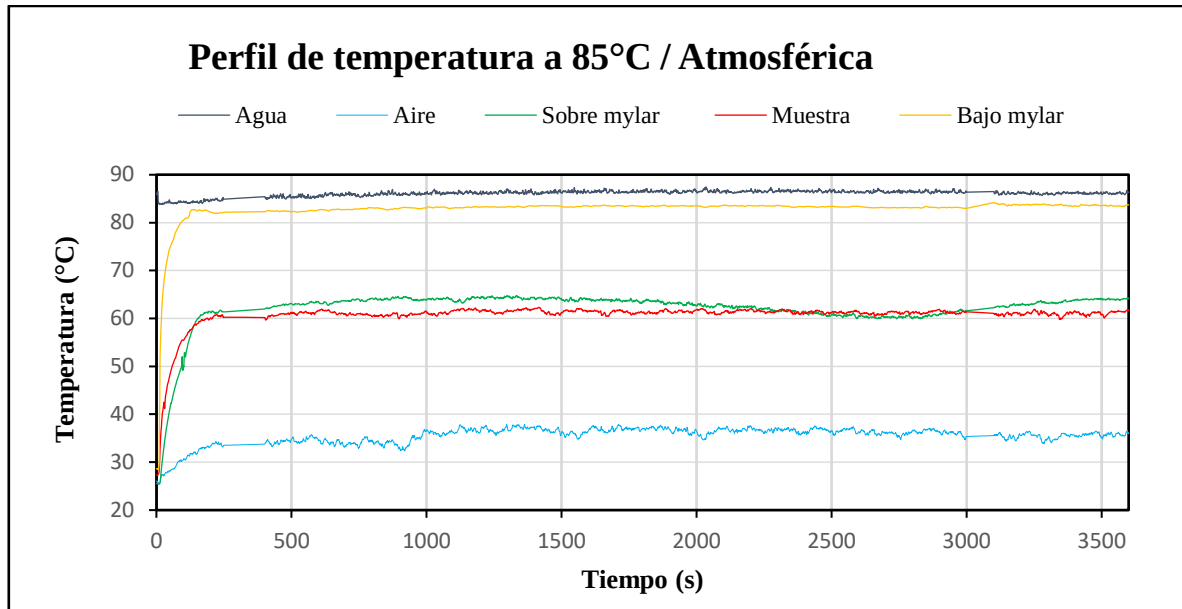


Figura 42: Perfil de temperatura a 85°C y de presión atmosférica

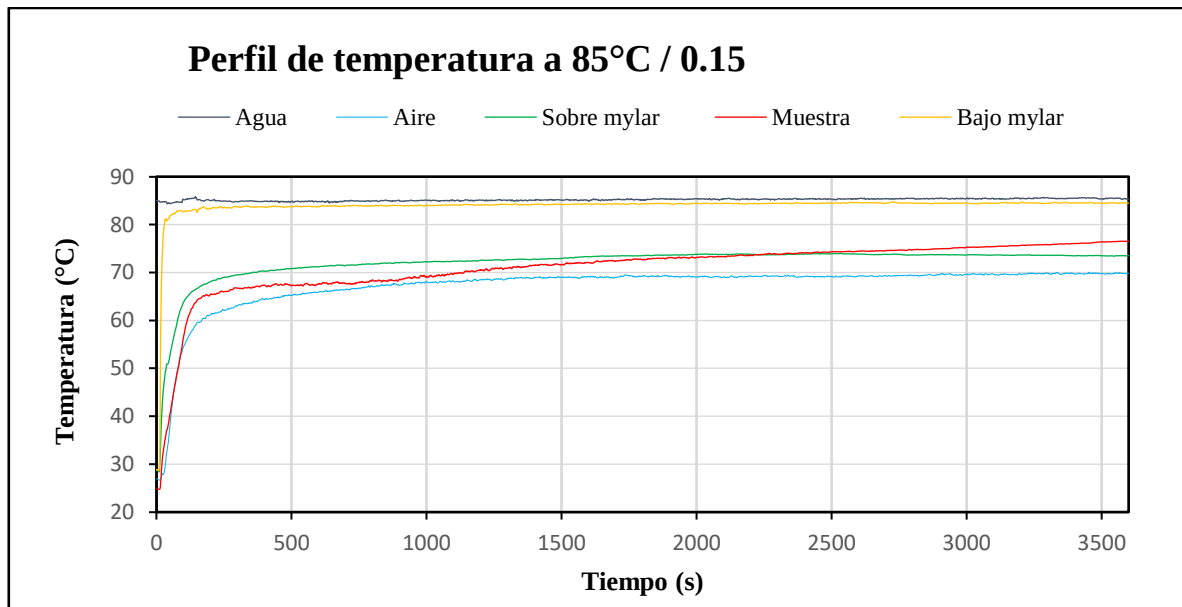


Figura 43: Perfil de temperatura a 85°C y 0.15 bar de presión de vacío

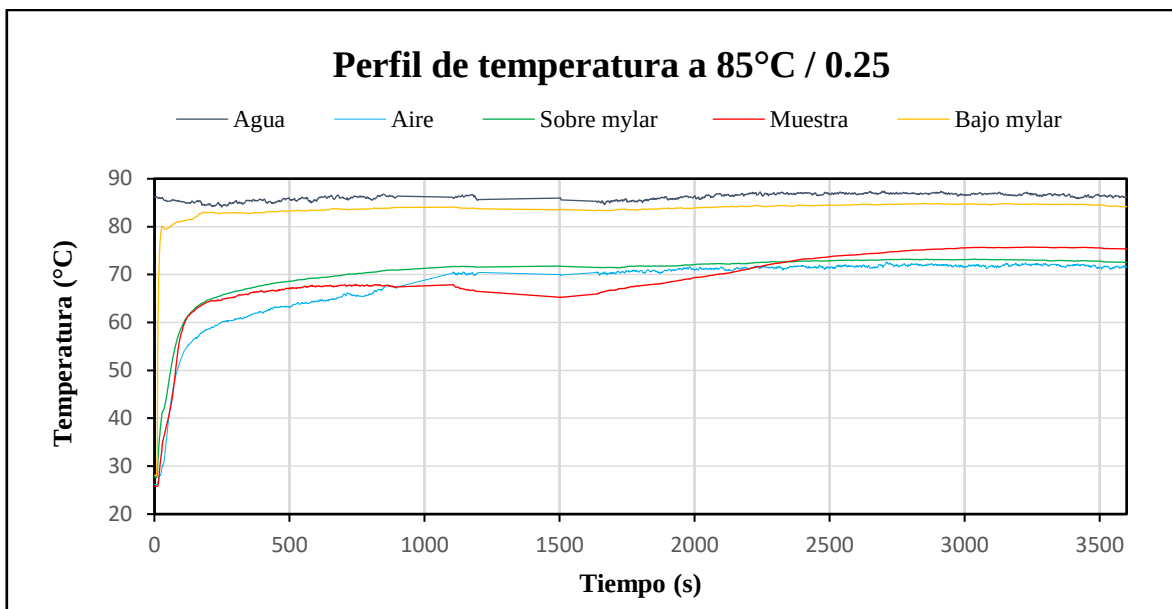


Figura 44: Perfil de temperatura a 85°C y 0.25 bar de presión de vacío

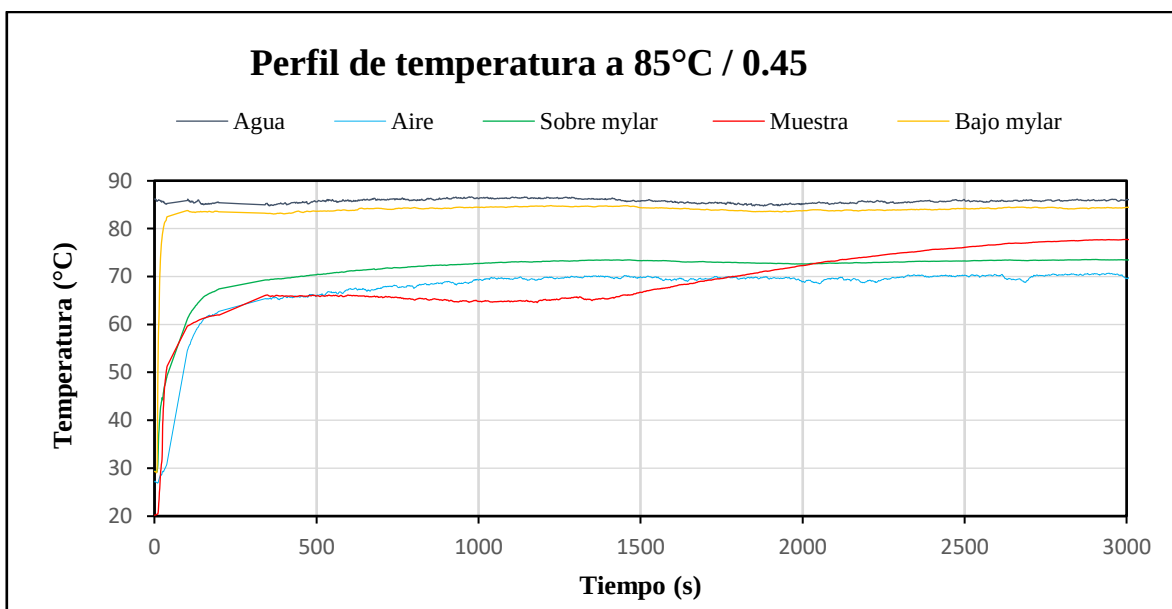


Figura 45: Perfil de temperatura a 85°C y 0.45 bar de presión de vacío

8.2. Anexo 2: Curvas de actividad de agua

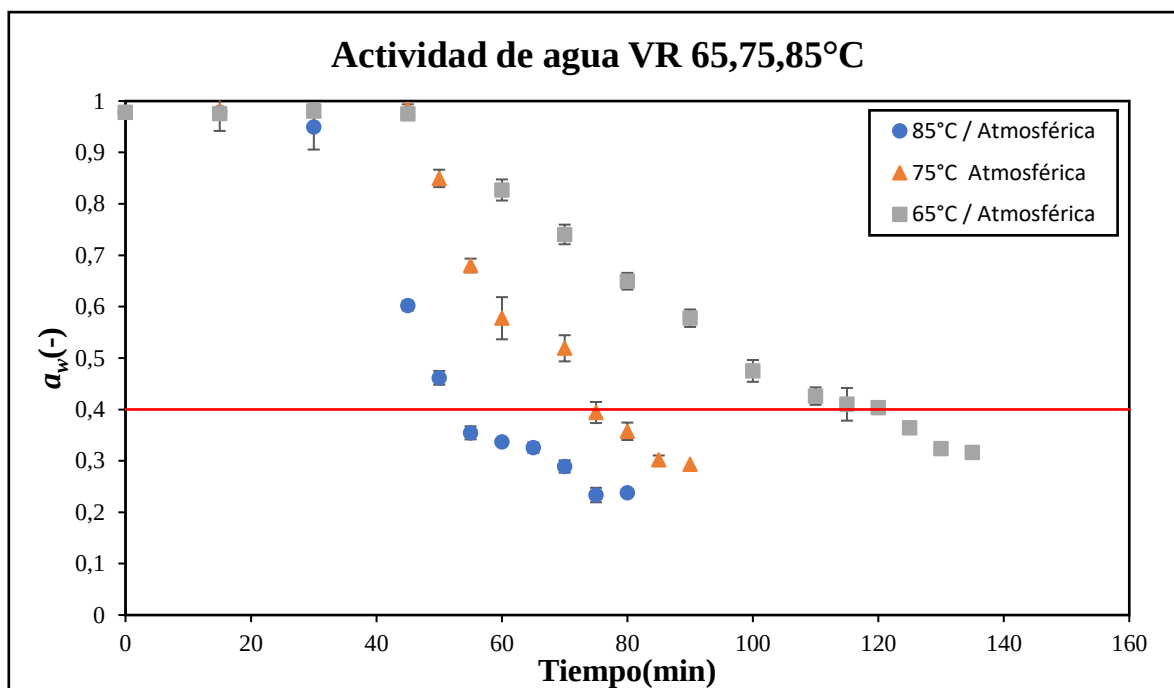


Figura 46: Curva de actividad de agua en VR a 65, 75 y 85°C

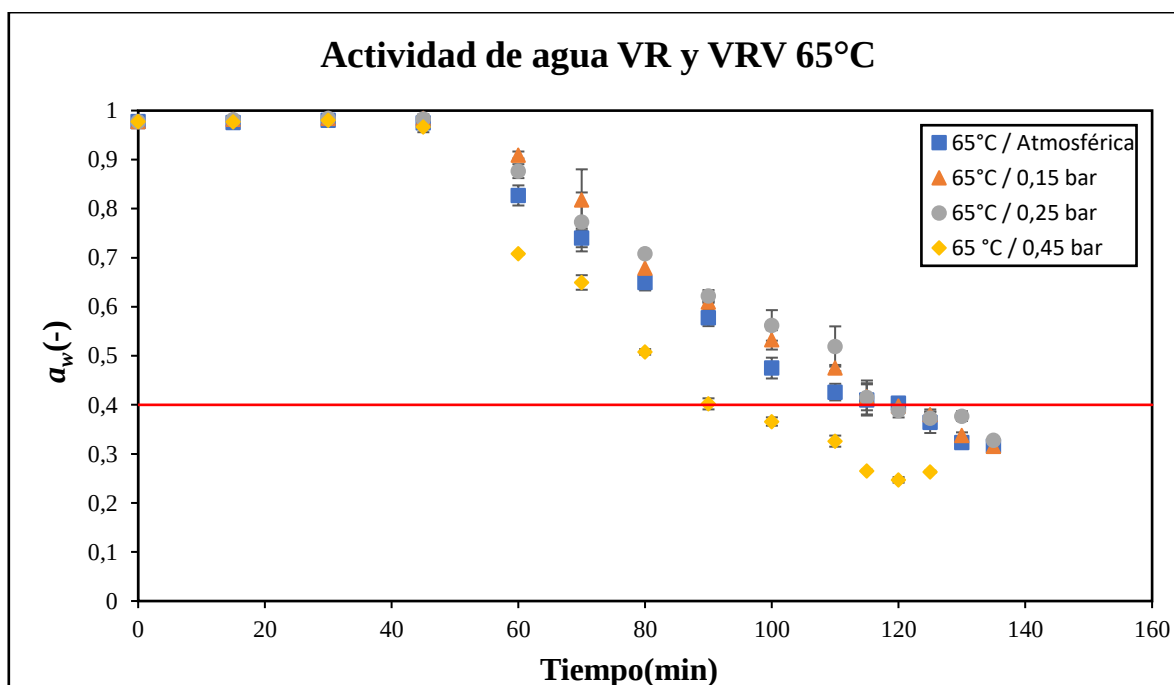


Figura 47: Curva de actividad de agua en VR y VRV a 65°C

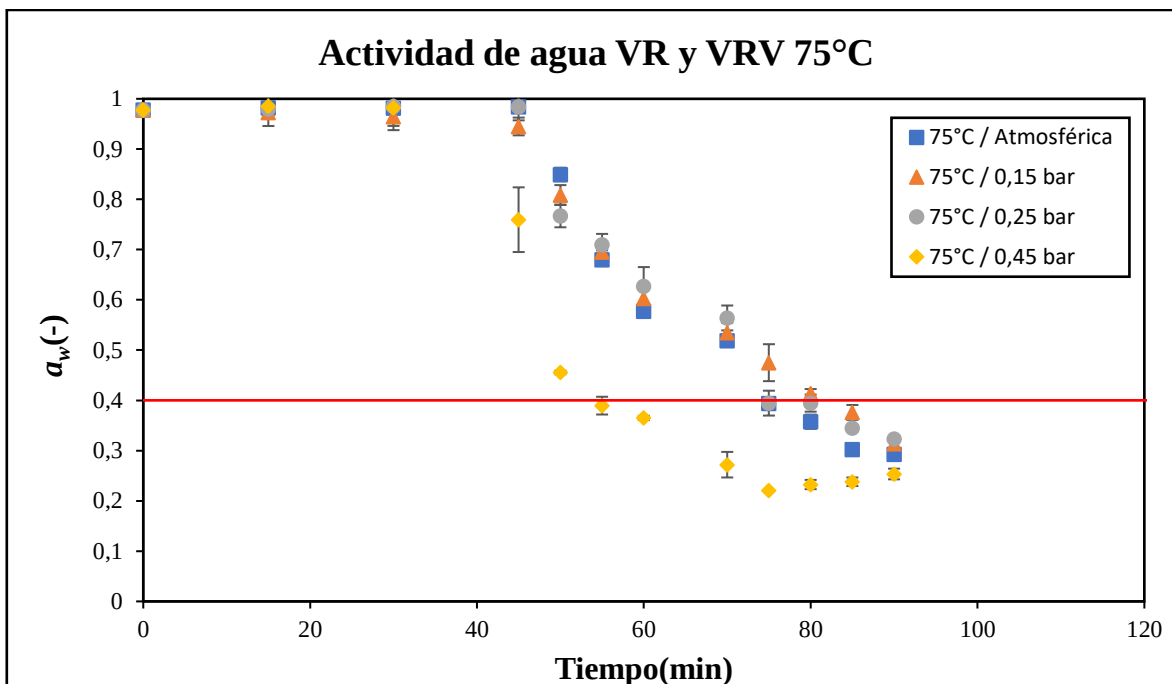


Figura 48: Curva de actividad de agua en VR y VRV a 75°C

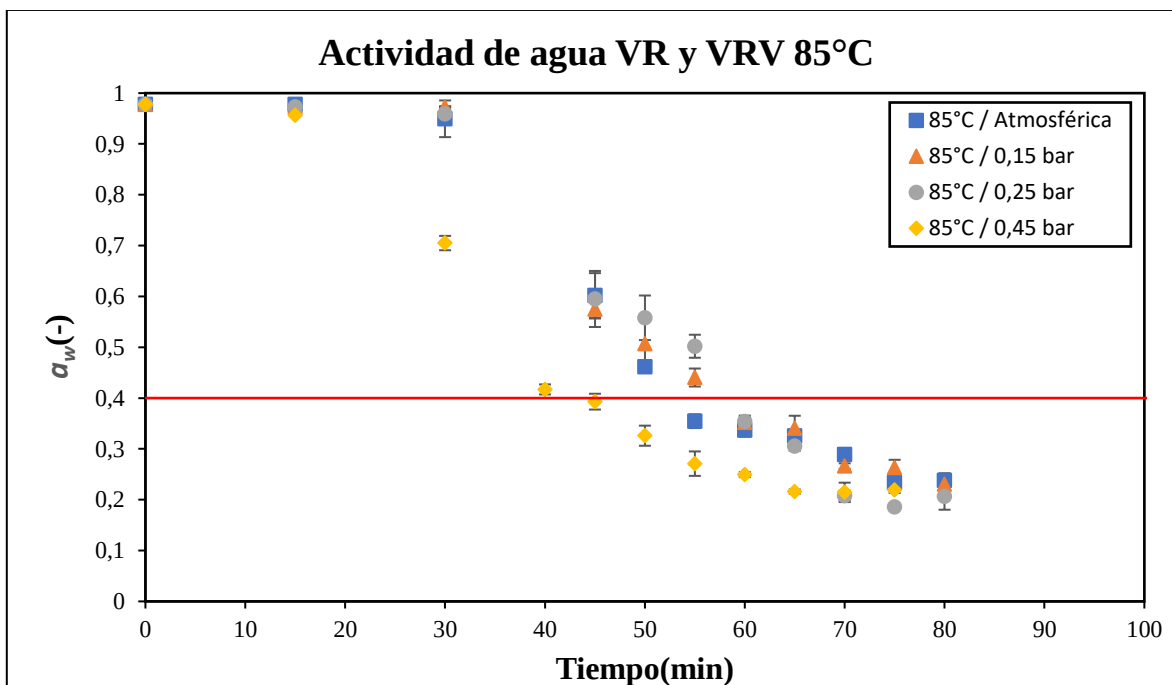


Figura 49: Curva de actividad de agua en VR y VRV a 85°C

8.3. Anexo 3: Curva de calibración ácido gálico equivalente

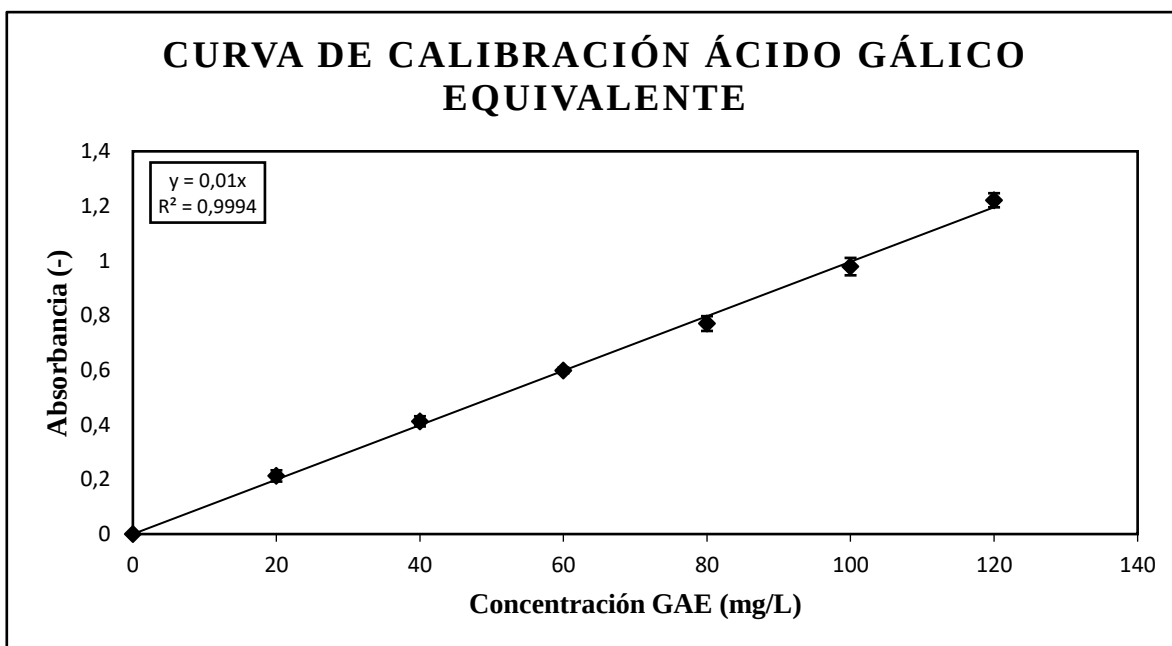


Figura 50: Curva de calibración ácido gálico equivalente

8.4. Anexo 4: Curva de calibración trolox equivalente

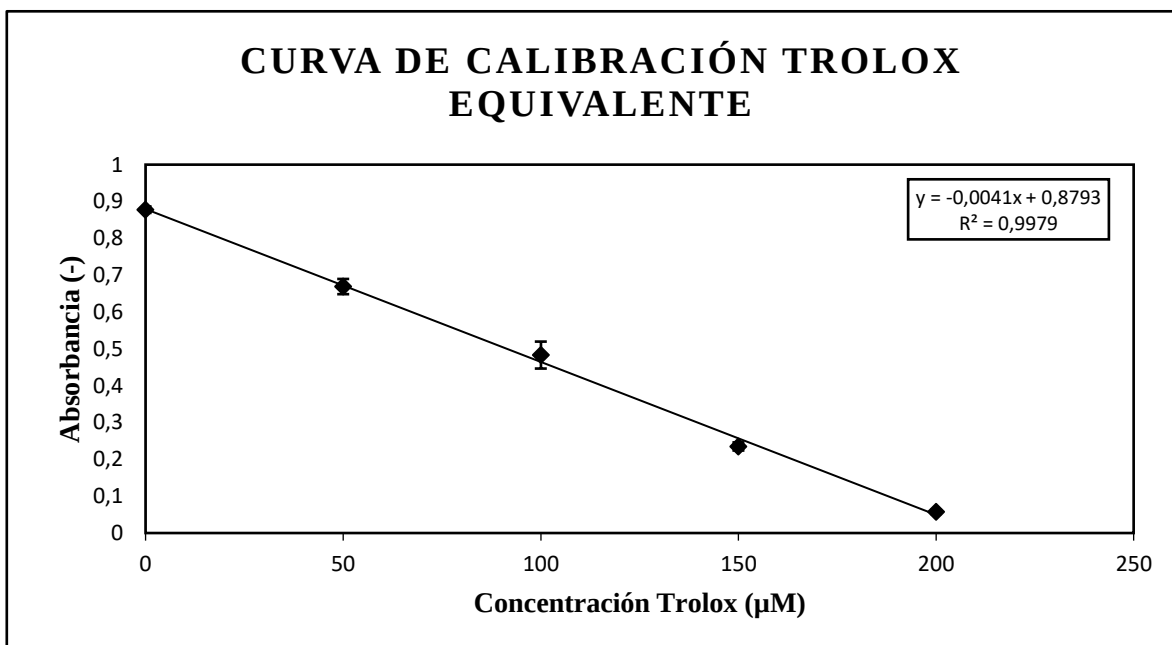


Figura 51: Curva de calibración trolox equivalente



8.5. Anexo 5: Promedio de datos experimentales

Tabla 16: Promedio de datos experimentales

Método de secado	Temperatura (°C) / Presión (bar)	a_w (-)	Humedad (g agua/g muestra)	SST (g XSST/gbs)	PFT (mg GAE/gbs)	AA (μ m Trolox/gbs)	ΔE (-)	FDS (g/100g)	FDI (g/100g)
Pomasa fresca	-	0,978±0,001	0.788	0.497±0.030	6.77±0.10	93.79±8.34	n.d	n.d	n.d
Liofilizado	25/6.3E-4	0.082±0,004	0.011	0.534±0.015	6.19±0.12	53.98±4.82	ref	n.d	n.d
Ventana refractiva	65/Atmosférica	0.365±0,005	0.054	0.470±0.007	4.38±0.06	45.31±1.64	7.05±0.25	n.d	n.d
	75/Atmosférica	0.358±0,020	0.054	0.462±0.007	4.23±0.08	36.18±0.18	6.14±0.41	n.d	n.d
	85/Atmosférica	0.355±0,013	0.070	0.439±0.000	4.71±0.08	49.97±3.23	10.67±0.43	n.d	n.d
Ventana refractiva acoplada a vacío	65 / 0.15	0.380±0.007	0.060	0.469±0.000	4.46±0.15	42.50±2.02	8.69±0.43	n.d	n.d
	65 / 0.25	0.373±0.014	0.078	0.428±0.007	4.90±0.23	46.62±0.37	7.83±0.16	n.d	n.d
	65 / 0.45	0.366±0.008	0.073	0.461±0.007	5.84±0.30	49.95±1.30	7.86±0.50	11.4	32.4
	75 / 0.15	0.376±0.008	0.062	0.462±0.007	4.21±0.09	36.87±7.89	7.54±0.09	n.d	n.d
	75 / 0.25	0.345±0.017	0.061	0.466±0.007	4.37±0.02	39,73±5.61	4.02±0.25	n.d	n.d
	75 / 0.45	0.365±0.004	0.079	0.472±0.007	4.66±0.25	48.44±1.10	7.91±0.41	n.d	n.d
	85 / 0.15	0.352±0.011	0.063	0.494±0.000	4.71±0.14	40.54±0.94	8.42±0.58	n.d	n.d
	85 / 0.25	0.354±0.012	0.060	0.465±0.007	4.55±0.11	47.86±0.19	11.43±0.11	n.d	n.d
	85 / 0.45	0.326±0.020	0.049	0.482±0.007	4.78±0.28	47.18±6.69	3.09±0.08	n.d	n.d