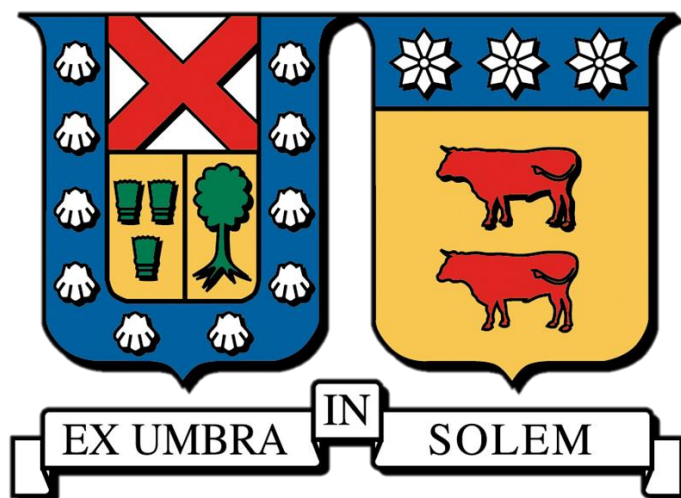


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AMBIENTAL

VALAPRAISO-CHILE



**Diseño y optimización de secado de láminas de
Kiwi mediante tecnología de secado hidro-
conductivo a vacío para maximizar la retención de
vitamina C**

CONSTANZA ESTEFANIA RETAMAL GALAZ

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERA CIVIL QUÍMICA

Profesor Guía: Dr. Cristian Ramírez Bustos

Profesor Correferente: Ing. Marlene Pinto Fernández

Marzo

2024

Agradecimientos

Luego de estos 6 años de estudio, en donde el amor, esfuerzo y perseverancia fueron las bases para poder finalizar exitosamente esta etapa de mi vida y obtener mi título, deseo expresar mis agradecimientos.

Primero que todo agradezco a mi familia por todo el amor entregado, a mi papá Richard por brindarme la posibilidad de estudiar y entregarme siempre la tranquilidad en aquellos momentos que lo necesitaba, a mi mamá María Angelica por el apoyo y preocupación; a mi hermano Ignacio, por la constante compañía durante este periodo universitario en donde vivimos juntos; a mi prima Valentina, por ser mi amiga, confidente y pilar en los momentos buenos y malos y por ultimo a mi tata y abuelita Beni, por su apoyo incondicional, sé que todos están orgullosos de mí.

Gracias a todas aquellas personas que me entregaron las herramientas necesarias para convertirme en una profesional integral, ya sean los ayudantes, asistentes de laboratorios, profesores de los diversos departamentos de la universidad, en especial el DIQA, pero principalmente agradezco a Cristian Ramírez mi profesor guía, Jamil Elitin y otros compañeros de laboratorio, quienes, con paciencia y cordialidad, me enseñaron todo lo crucial para poder culminar este trabajo. También destaco y agradezco el esencial financiamiento entregado por el proyecto **FONDECYT1230506** para realizar la presente investigación.

De mis amigos y resto de compañeros de carrea y generación, aprecio la buena disposición y ayuda que me brindaron en tiempos de crisis, además de las risas, compañía y buenos recuerdos que quedaran en mi memoria, les agradezco sinceramente a cada uno de ellos, por haber formado parte esencial de mi vida universitaria.

Por el cariño y cuidado que me han brindado de manera altruista, haciéndome sentir parte de ellos, uno de mis más sinceros agradecimientos va a la familia Castelletto- Olavarría, en especial a Angelo, por el apoyo emocional y, sobre todo, el amor que me ha dado durante estos años.

Sin el apoyo y compañía de todos ustedes este periodo no hubiera sido igual, se los agradeceré toda la vida.

Por ultimo y no menos importante, me agradezco a mí misma, por el esfuerzo, dedicación y buena cara que he puesto con el fin de alcanzar mis metas, pese a las lágrimas, el estrés, los dolores, pocas horas de sueño y combinaciones de altos y bajos; Finalmente todo da frutos.

Resumen

Un factor primordial de la alimentación balanceada es el adecuado consumo de frutas y verduras. Dentro de estas destaca el kiwi, la cual posee un alto contenido de vitamina C y nuestro país es el tercer exportador a nivel mundial. Pese a su importancia, grandes cantidades de frutas se pierden al año, sin embargo, esto se puede evitar a través de la deshidratación de los alimentos a mediante distintos procesos y tecnologías de secado. La tecnología de ventana refractiva ha generado interés en los últimos años debido a su capacidad para mantener nutrientes, además al aplicar optimizaciones, como cambios en el medio de soporte (secado hidro-conductivo) y uso de vacío, se podrían reducir significativamente los tiempos de operación. Por ello, el objetivo de este trabajo es evaluar diversas condiciones de operación aplicadas a la tecnología del secado hidro-conductivo con cobre a vacío y compararla con el secado por liofilización, para el desarrollo de kiwi deshidratado, estableciendo el medio de soporte, condición de temperatura y presión de trabajo, que permitan obtener un producto con el mayor contenido de vitamina C y mejor color posible, mediante un proceso eficiente.

Para lograr el objetivo, se evaluó a 70, 80 y 90 °C, el uso de Mylar como medio de soporte (VR) la aplicación de vacío de 450 mbar (VRV), el cambio del medio de soporte a una lámina de cobre de 1mm (SHC), y la combinación de las ultimas dos condiciones (SHCV). Para ello se prepararon láminas de kiwi de 3 mm de espesor y 40 mm de diámetro y se sometieron a cada método de secado. Luego se midieron parámetros de calidad como humedad, cantidad de vitamina C y diferencia de color, además de realizar las curvas secado para definir tiempos de operación y realizar la modelación matemática del proceso.

Los resultados muestran que el uso de cobre como medio de soporte presenta una reducción de hasta 38,5% del tiempo de operación respecto al uso de Mylar, atribuible al alto coeficiente de conducción de calor que posee el metal. Sin embargo, debido a una reacción de autooxidación, el contenido de vitamina C se ve reducido al contacto entre el kiwi y el metal. En general, cuando se varia la temperatura de 70 a 90°C, se reduce en un 58,3% del tiempo de proceso, sin embargo, esto implica un deterioro en la calidad del producto, provocando una mayor diferencia de color y perjudicando a la retención de vitamina C al interior del alimento. Al comparar los distintos procesos de secado, a través del liofilizado se obtiene el producto de mayor calidad, pero en un prolongado tiempo de operación, en cambio, a 80°C mediante todas las tecnologías evaluadas, se presenta una máxima retención de la vitamina C y mínimos valores de diferencia de color, en tiempo de operación 10 veces menor que el liofilizado. En cuanto a la aplicación de vacío, esta no mejora significativamente ningún parámetro. Por último, la modelación matemática indica que el proceso se ajusta mejor al modelo anómalo con un comportamiento super-difusivo.

Finalmente, según los tiempos de secado, porcentaje de retención de vitamina C y cambio de color del producto obtenido, se determina que el método óptimo para producir láminas de kiwi deshidratadas es el secado hidro-conductivo con cobre a 80 °C, comprobando así la factibilidad y eficiencia del uso de esta tecnología.

Índice de contenido

Agradecimientos.....	2
Resumen	3
Índice de Tablas.....	5
Índice de Figuras	6
1 Introducción	8
1.1 Objetivos	10
1.1.1 Objetivo General	10
1.1.2 Objetivos específicos.....	10
2 Antecedentes teóricos.....	12
2.1 Materia Prima.....	12
2.1.1 El Kiwi y su Composición química.....	12
2.1.2 Vitamina C	13
2.1.3 Mercado del Kiwi y la fruta deshidratada	15
2.2 Tecnologías de secado.....	16
2.2.1 Liofilización	16
2.2.2 Ventana refractiva	17
2.2.3 Uso de vacío en procesos de secado.....	20
2.3 Fenomenología deshidratación de alimentos	21
3 Materiales y Métodos	24
3.1 Obtención y Preparación de la materia prima	24
3.2 Equipos de secado	25
3.2.1 Ventana refractiva convencional (VR).....	26
3.2.2 Ventana Refractiva Acoplada a vacío (VRV)	26
3.2.3 Secado Hidro conductivo (SHC).....	27
3.2.4 Secado hidro conductivo acoplado a vacío (SHCV)	28
3.2.5 Liofilización	29
3.3 Determinación Curvas de Secado	29
3.3.1 Cinética de Secado	30
3.3.2 Curva actividad de agua (a_w).....	31
3.4 Caracterización materia prima y productos.....	31
3.4.1 Humedad	31
3.4.2 Contenido de Vitamina C (Acido Ascórbico)	32

3.4.3	Colorimetría	33
3.5	Análisis Estadístico	35
4	Resultados y discusión	37
4.1	Tiempos de operación, humedad y Actividad de agua (a_w)	37
4.2	Color y contenido de vitamina C.....	42
4.3	Análisis matemático de los coeficientes de difusión ($Deff$)	47
5	Conclusiones	51
6	Recomendaciones.....	52
7	Referencias	54
8	Anexos.....	60
8.1	Anexo 1: Ejemplo de cálculo agua a adicionar en muestra de kiwi seco para medición de vitamina C	60
8.2	Anexo 2: Datos experimentales Actividad de Agua	60
8.3	Anexo 3: Tiempo de Secado	60
8.4	Anexo 4: Datos experimentales medición de Vitamina C	61
8.5	Anexo 5: Resultados Diferencia de Color.....	61

Índice de Tablas

Tabla 1	Caracterización kiwi fresco (Zhou y otros, 2018).....	13
Tabla 2.	Resumen condiciones de operación para el secado de láminas de kiwi mediante varios tipos de secado.....	26
Tabla 3.	Criterio de evaluación sensorial de diferencias de color (Mujumdar, 2014) ..	34
Tabla 4.	Resumen porcentaje de humedad en laminas se kiwi según método de secado	39
Tabla 5.	Parámetros de color Lab para láminas de kiwi sometidas a los diferentes secados realizados.....	43
Tabla 6.	Coeficiente de difusión calculado mediante la segunda ley de Fick y el modelo de difusión Anómalo para cada método de secado	47

Índice de Figuras

Figura 1 Kiwi Hayward o verde (Comite del kiwi de Chile, 2020)	12
Figura 2 Tabla comparativa de nutrientes y energía por cada 100 g de fruta, entre distintas frutas (López-Sobaler et al, 2016).....	12
Figura 3 Síntesis de vitamina C a partir de UPD-Glucosa (Villagran et al, 2019).....	14
Figura 4 Esquema de ventana refractiva configuración continua (Nindo & Tang., 2007)	18
Figura 5 Ventana refractiva configuración batch (Muyonga et al, 2022)	18
Figura 6: Mecanismos de Transferencia de calor en ventana refractiva (Nindo & Tang., 2007).....	19
Figura 7 Diagrama de secado hidro-conductico con cobre a vacío (Elaboración propia)	20
Figura 8. Esquema procedimiento experimental (Elaboración propia).....	24
Figura 9. Rodajas de kiwi para almacenar.....	25
Figura 10 Secado de kiwis en ventana refractiva	26
Figura 11 Ventana refractiva a vacío.....	27
Figura 12 Estructura SHC utilizando lámina de cobre como soporte	28
Figura 13 Estructura para SHCV utilizando lámina de cobre como soporte	28
Figura 14. Liofilizador Christ Alpha 2-4 LCSplus, Alemania.	29
Figura 15 Termohigrometro Rotronic HP23-AW	31
Figura 16 Estufa Memmert UFB-400, Alemania.	32
Figura 17 Colorímetro Konica Minolta CR-410, Japón.....	33
Figura 18 Coordenadas espacio de color CIElab	34
Figura 19 Resumen tiempos de operación requerido para los diferentes procesos de secado de láminas de kiwi.....	37
Figura 20 Curva actividad de agua de láminas de kiwi secadas a 80 °C mediante distintos procesos.....	40
Figura 21 Curva Actividad de Agua de láminas de kiwi secadas a 70 °C mediante distintos procesos.	40
Figura 22. Curva actividad de agua de láminas de kiwi secadas a 90 °C mediante distintos procesos.....	41
Figura 23. Resumen de los a_w obtenidos luego de someter láminas de kiwi a diferentes métodos de secados	42
Figura 24 Comparación visual entre MP, liofilizado y rodajas sometidas a las variaciones de secado hidro-conductivo.....	42
Figura 25 Rodaja de kiwi liofilizada (muestra de referencia para cálculo de diferencia de color)	44
Figura 26. Diferencia de color de las láminas de kiwi secas obtenidas mediante los diferentes métodos de secado, respecto a la muestra liofilizada	44
Figura 27. Contenido de vitamina C en láminas de kiwi obtenidas mediante los distintos procesos de secado	45
Figura 28. Comparación coeficientes de difusión calculados mediante el Modelo Anómalo para láminas de kiwi obtenidas mediante los distintos procesos de secado	48

I. Introducción

1 Introducción

La alimentación saludable es un tópico de gran importancia en la cultura actual y un factor importante de ello es el consumo de frutas. La ingesta diaria aporta vitaminas, sales minerales, antioxidantes y fibra; además son bajas en calorías y favorece la eliminación de toxinas del organismo. Las frutas y verduras aportan especialmente vitaminas, las cuales son sustancias esenciales que el cuerpo humano necesita para crecer y funcionar en forma adecuada. (INS, 2018)

La vitamina C, también conocida como ácido ascórbico, es un nutriente esencial para la formación de vasos sanguíneos, cartílagos, músculos y colágeno en los huesos, desempeñando así un papel vital en el proceso de curación general del cuerpo. También ayuda al cuerpo a absorber y almacenar el hierro. Además de actuar como antioxidante, protegiendo las células contra los dañinos efectos de los radicales libres. Los cuales pueden contribuir al desarrollo de enfermedades cardíacas, cáncer y otras patologías. Debido a su vital importancia para el funcionamiento del organismo, se recomienda una ingesta diaria de vitamina C de 90 mg para hombres adultos y 75 mg para mujeres adultas. (Mayo Clinic, 2021)

El kiwi (*Actinida deliciosa*) es una fruta con gran valor nutricional, caracterizada por su elevado contenido en vitamina C. Además, destaca por ser una de las pocas frutas que contiene alto porcentaje de vitamina K, así como una alta concentración de otros nutrientes esenciales como fibra, ácido fólico y potasio, creando una combinación virtuosa que convierte al kiwi en una “súper fruta”, (Comite del kiwi de Chile, 2020). Una sola porción de kiwi puede aportar el 117% de la vitamina C y un 21% de fibra diaria.

El kiwi es originario del centro-norte y este de China. La primera descripción registrada del kiwi se remonta a la China del siglo XII durante la dinastía Song. En Chile se cultivaron por primera vez en la década de 1980 adaptándose adecuadamente a las condiciones climáticas locales. Hoy, nuestro país es uno de los principales productores mundiales de kiwi, siendo el tercer exportador a nivel mundial, con una época de cosecha de marzo a noviembre. (Fruits From Chile, s.f.)

La organización mundial de la salud recomienda el consumo de al menos 400 g de frutas y hortalizas al día, por lo tanto, se necesitaría que el planeta disponga de 876 MTM/año. La actual producción de frutas y hortalizas frescas es de 1350 MTM/año sin embargo existe un 25-50% de pérdida de la producción postcosecha, provocando que en algunas regiones del mundo ni siquiera se alcance el consumo mínimo recomendado para obtener una alimentación saludable. (Elhadi, 2009)

Por esta razón, existe un área de la ingeniería dedicada a evaluar diversos métodos de procesamiento de alimentos con el objetivo de prevenir el deterioro, prolongar su vida útil y facilitar su transporte, siempre teniendo en cuenta aspectos importantes como sus propiedades organolépticas, calidad nutricional y seguridad frente a patógenos.

Existen diversos procesos para prolongar la vida útil de los alimentos, pero uno de los más relevantes es la deshidratación en donde se reduce la cantidad de agua disponible, a valores de actividad de agua (a_w) menores a 0,4 en la matriz del alimento, inhibiendo la proliferación de microorganismos y enzimas que generan reacciones químicas de deterioro. El secado es aquel proceso en el cual se extrae el agua no enlazante que emerge a la superficie del alimento mediante un gradiente de materia y energía, este suele ser un método efectivo, sin embargo, un punto a considerar durante estos procesos es tendencia a modificar las propiedades organolépticas y nutricionales del alimento.

Uno de los métodos de secado que ha tomado relevancia en la industria de alimentos en el último tiempo es el secado por liofilización (Freeze-drying technology). En esta técnica, el alimento es congelado y luego expuesto a vacío, dando lugar a la sublimación del agua congelada que está contenida en el alimento. Esta tecnología presenta muchas ventajas por sobre otros métodos de deshidratación, tales como la preservación de las características de color, sabor y fragancia original del alimento fresco, evita también la pérdida de ingredientes nutricionales importantes, especialmente los termosensibles. Sin embargo, la desventaja más importante de este método es su alto costo y tiempo de operación. (Berk, 2013; Ramirez J. , 2006)

La ventana refractiva es una tecnología innovadora desarrollada por MDC Technologies Inc. que permite deshidratar una amplia gama de alimentos sólidos, líquidos y semilíquidos en tiempos de operación considerablemente más cortos. En este método, el alimento se deposita sobre una placa de Mylar (PET) y emplea agua caliente como medio calefactor, así, se extrae el agua presente en el alimento mediante los 3 mecanismos de transferencia de calor (Muyonga et al., 2022) La ventana refractiva se vuelve una opción atractiva de investigación, pues el método obtiene un producto de alta calidad, conservando sus propiedades organolépticas y nutricionales, con un menor tiempo de operación y costo de implementación comparado a otros sistemas de secado. (Subhanki & Dwivedi, 2022) Cuando se cambia el material de la placa a uno distinto del Mylar, como por ejemplo algún metal, este tipo de tecnología puede ser definido como “Secado Hidro-conductivo”, ya que, en este caso, el principal mecanismo de transferencia de calor sería la conducción.

Por otra parte, es muy común combinar distintas tecnologías con el fin de optimizar los procesos, así se han realizado estudios que indican que el uso de vacío durante el secado permite disminuir la temperatura de operación, la cual afecta a productos termosensibles además de evitar la oxidación del alimento, también se ha demostrado que la aplicación de vacío, en un prototipo de ventana refractiva disminuye los tiempos de secado (Elitin, 2022)

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo General

Estudiar las tecnologías de secado hidro-conductivo con cobre acoplado a vacío, secado hidro conductivo con cobre, secado por ventana refractiva, secado por ventana refractiva a vacío y secado por liofilización para el desarrollo de kiwi deshidratado, estableciendo las condiciones de operación que permitan obtener un producto con el mayor contenido de vitamina C y mejor color posible, mediante un proceso eficiente.

1.1.2 Objetivos específicos

- Realizar curvas de secado de cada una de las tecnologías planteadas para determinar tiempos de proceso.
- Evaluar factibilidad de uso de placa de cobre como soporte para el secado hidro-conductivo de kiwis
- Comparar el efecto del secado por liofilización, ventana refractiva convencional, ventana refractiva a vacío, secado hidro conductivo y la tecnología de secado hidro-conductivo acoplado a vacío.
- Determinar las condiciones de operación de secado optimas, que favorezcan la retención de vitamina C, disminuya tiempo de proceso y produzca menor variación de color.

II. Antecedentes teóricos

2 Antecedentes teóricos

2.1 Materia Prima

2.1.1 El Kiwi y su Composición química

El kiwi es una baya comestible de un arbusto leñoso del género Actinida. Hay numerosas especies dentro de este género, pero las más conocidas comercialmente son la Actinidia deliciosa variedad "Hayward", que corresponde al kiwi Green®, de color verde, que se aprecia en la Figura 1 y la Actinidia chinensis, variedad "Hort 16A", que es el kiwi Sungold®, de color amarillo. El kiwi Hayward es un fruto oval, del tamaño de un huevo grande de gallina, con una piel peluda de color marrón brillante, con carne traslúcida y de color verde con semillas en filas negras que son comestibles. El sabor es dulce, fuerte y algo picante. (López et al., 2016)



Figura 1 Kiwi Hayward o verde (Comite del kiwi de Chile, 2020)

Hasta hace poco se disponía de datos muy limitados sobre la composición del kiwi. La Figura 2 se muestra una tabla comparativa de composición de energía y algunos nutrientes del kiwi comparada con otras frutas. (López et al., 2016)

	Kiwi verde	Kiwi amarillo	Naranja	Manzana	Plátano	Fresa	Arándano
Energía (kcal)	61	63	47	52	89	32	57
H. de carbono (g)	14,7	15,8	11,8	13,8	22,8	7,7	14,5
Azúcares totales (g)	9,0	12,3	9,4	10,4	12,2	4,9	10,0
Fibra (g)	3	1,4	2,4	2,4	2,6	2	2,4
Potasio (mg)	312	315	181	107	358	153	77
Cobre (mg)	0,13	0,15	0,05	0,03	0,08	0,05	0,06
Vitamina C (mg)	92,7	161	53,2	4,6	8,7	58,8	9,7
Folatos (µg)	25	31	30	3	20	24	6
Lut.+Zeax. (µg)	122	24	129	29	22	26	80
Vitamina E (mg)	1,46	1,40	0,18	0,18	0,1	0,29	0,57
Vitamina K (µg)	40,3	6,1	0	2,2	0,5	2,2	19,3

Figura 2 Tabla comparativa de nutrientes y energía por cada 100 g de fruta, entre distintas frutas (López-Sobaler et al, 2016)

Como se puede apreciar los kiwis son excepcionalmente ricos en vitamina C, ya que los kiwis verdes duplican la cantidad que tienen las fresas o naranjas, y el kiwi de color amarillo incluso la triplica. Además, los kiwis tienen un elevado contenido en vitaminas E, K, folatos, carotenoides, potasio, fibra y otros fitoquímicos, que proporcionan no solo beneficios nutricionales, sino también sanitarios. El consumo regular de kiwi en el contexto de una dieta equilibrada tiene efectos beneficiosos sobre la función inmune y defensa antioxidante; en la

función gastrointestinal, mejora la digestión proteica y el estreñimiento; y en el tracto respiratorio superior, ayudan en la prevención de infecciones y mejora su sintomatología. Por todo ello, el consumo habitual de kiwi se ha asociado a mejoras del estado de ánimo. La mayoría de estos beneficios pueden deberse al elevado contenido de vitamina C del kiwi, pero también a los otros nutrientes y fitoquímicos que actúan de forma sinérgica en la matriz alimentaria. Los resultados de los estudios realizados hasta ahora sugieren que el consumo diario de kiwi puede ser una estrategia efectiva para la promoción de la salud y prevención de numerosas enfermedades. (López et al., 2016)

Zhou et al. (2018) quienes estudiaban las propiedades del kiwi luego de ser procesado, caracterizaron la fruta fresca de acuerdo con la Tabla 1 a continuación:

Tabla 1 Caracterización kiwi fresco (Zhou y otros, 2018)

Propiedad Fisicoquímica	Valor
Humedad (% en base seca)	84,51± 0,15
Sólidos solubles (°brix)	13,40 ±0,20
Acidez (% ácido Cítrico)	1,62 ±0,1
Ácido Ascórbico (mg/100g)	107,43± 5,05
pH	3,51 ±0,21

2.1.2 Vitamina C

La vitamina C o ácido L-ascórbico (AA), actúa como cofactor en diversas reacciones enzimáticas que tienen lugar en el organismo. Es sintetizada internamente por casi todos los organismos de los animales y plantas, excepto el hombre, quien carece de la enzima L-gulonolactona oxidasa debido a un defecto genético. Esta enzima cataliza la etapa terminal de la síntesis de ácido ascórbico que convierte la glucosa en ácido ascórbico, por lo tanto, es un nutriente esencial que se debe adquirir a través de la alimentación. (Maldonado & Valverde, 2022)

Existen dos importantes formas biológicas de vitamina C, la forma reducida o ácido ascórbico (AA) y la forma oxidada, ácido dehidroascórbico (ADA) siendo ambas funcionales biológicamente y manteniéndose en equilibrio fisiológico (Castillo-Velarde, 2019) Sin embargo, el dehidroascorbato es mucho menos estable que el ascorbato, por lo que se hidroliza con gran facilidad para producir ácido dicetogulónico, que posteriormente puede degradarse por descarboxilación tal como se observa en la Figura 3. Ni el ácido dicetogulónico ni sus productos de degradación poseen actividad biológica equivalente a la vitamina C. (Fang, 2017)

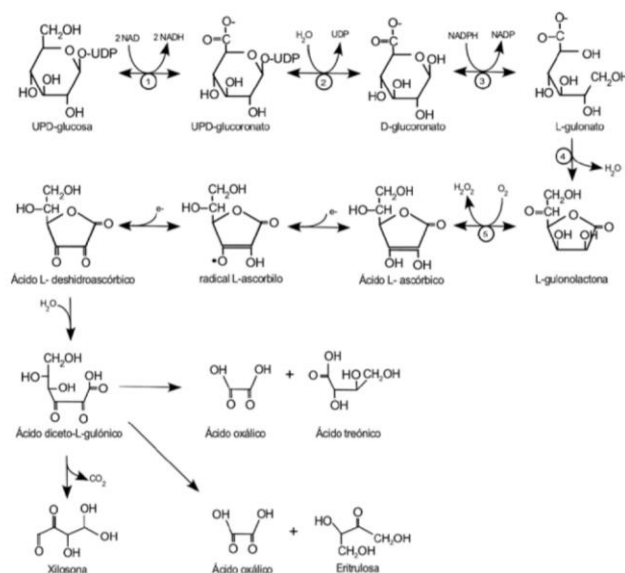


Figura 3 Síntesis de vitamina C a partir de UPD-Glucosa (Villagran et al, 2019)

La vitamina C es un antioxidante biológico que protege al organismo del estrés oxidativo provocado por las especies reactivas del oxígeno, es esencial para la síntesis del colágeno, en concreto actúa como coenzima en la síntesis del procolágeno favoreciendo la hidroxilación de los residuos de prolina y lisina; es importante para el mantenimiento del tejido conjuntivo normal, para la curación de heridas y para la formación del hueso, ya que el tejido óseo contiene una matriz orgánica con colágeno. También interviene en la síntesis de lípidos, proteínas, norepinefrina, serotonina, en el metabolismo de tirosina y fenilalanina, es ampliamente utilizado en el tratamiento de ciertas enfermedades, como el escorbuto, el resfriado común, la anemia, los trastornos hemorrágicos, trastornos de la cicatrización de heridas e infertilidad. Además, previene las cataratas y glaucoma. (Villagran et al, 2019)

Dada la rápida oxidación la vitamina C es un compuesto muy utilizado en la tecnología de alimentos como índice de calidad nutricional de productos alimenticios. La Vitamina C es uno de los compuestos más sensible que se encuentran en los alimentos y su estabilidad varía en función de las condiciones ambientales tales como el pH, la concentración de trazas de iones metálicos y oxígeno, la temperatura, el tipo de proceso de deshidratación precisando que la mayor retención se da a bajas temperaturas y cortos tiempos. Debido a ello se determina que, si esta vitamina resiste los tratamientos térmicos de los alimentos, todos los demás nutrientes se encuentran en buen estado. (Castañeda et al., 2010)

Castañeda et al (2010) evaluaron la retención de vitamina C en chalarina mediante 4 métodos de secado distintos y en el obtuvo como resultado que los procesos de deshidratación estudiados reducen el contenido de vitamina C de la fruta, siendo el secado convectivo el método que causa mayor pérdida de este nutriente (76.26%); mientras que la liofilización es el método que causa menos pérdida (21.47%). A partir de su investigación concluyen que la degradación de la vitamina C es mayor en la medida que se incrementa el tiempo de exposición a factores oxidantes, como el oxígeno, y su efecto es aún mayor a temperaturas elevadas.

2.1.3 Mercado del Kiwi y la fruta deshidratada

La demanda de kiwi está ganando terreno entre los consumidores de todo el mundo, fortalecida por la creciente preocupación de los consumidores por la salud y el bienestar. Por lo tanto, esta fruta está experimentando una inmensa demanda por parte de los consumidores globales, especialmente en los Estados Unidos y la región europea.

Como consecuencia del aumento de la demanda la producción de kiwi ha aumentado un 9,3 % entre 2017 y 2020. Además, la superficie cosechada con kiwi aumentó un 6,8 %, lo que representa 270 000 hectáreas en 2020. En términos de producción y consumo, China domina el mercado. Según un especialista en kiwis de Shenzhen, China es el mayor consumidor mundial de kiwis, con 2,2 millones de toneladas y el 57 % del consumo mundial total. (Mordor Intelligence., 2022)

Según cifras del 2022 Chile es el tercer exportador de kiwi a nivel mundial, con una temporada que se extiende desde marzo a octubre, por lo tanto, el kiwi chileno está disponible en contra estación respecto del producido en el hemisferio norte. Se producen las variedades Hayward, Jintao, Dori, Soreli y Summer Kiwi, principalmente abarcando una superficie de 7.862 hectáreas a partir de la cual se producen 168.271 toneladas y de ella se exportan cerca de 146.323 toneladas. Llegando principalmente a Europa, Latinoamérica, Norteamérica y Asia (Lejano y Cercano Oriente) (Comite del kiwi de Chile, 2020)

Por otro lado, el objetivo del procesamiento de alimentos es proporcionar un valor agregado al producto gracias a la extensión de la vida útil, por ello, un mercado importante a evaluar es el mercado de la fruta deshidratada

Las exportaciones mundiales de frutas deshidratadas han crecido un 26% entre 2006 y 2016 (350 mil toneladas), de acuerdo con los registros de aduanas internacionales publicados en Trademap. Por lo tanto, el sector deshidratado se encuentra en expansión a nivel global y Chile integra parte de este movimiento, aportando con frutas, hortalizas y hongos deshidratados al comercio mundial. Dentro del rubro deshidratados, las frutas aportan con 1,6 millones de toneladas exportadas en 2016.

Chile es un actor relevante en este rubro, posicionándose en el cuarto lugar mundial como abastecedor de frutas deshidratadas con cerca de 131 mil toneladas exportadas, siendo las ciruelas, pasas y manzanas las más relevantes y las que sustentan el volumen para dicho posicionamiento, aportando entre las tres con 130 mil toneladas. Otra especie de relevancia para el país, pero de bajo impacto a nivel global es la rosa mosqueta. Los arándanos, cerezas y maqui deshidratados son de baja participación actual, pero de alto potencial para el país, por el crecimiento de su industria en fresco y/o por la alta demanda que se observa en los mercados globales. (FIA-Ministerio de Agricultura., 2019)

Dados los 2 grandes mercados mencionados anteriormente, en donde nuestro país es un actor clave, es que surge la atractiva idea de producir kiwi deshidratado. Sin embargo un factor relevante a considerar es la calidad del producto final. En el estudio realizado por Pérez (2013) en donde analiza la calidad física fisicoquímica y sensorial de productos de Kiwi obtenido mediante métodos combinados de secado concluye que, a la hora de formular productos

rehidratados a base de kiwi en polvo, es fundamental el control de la preservación del color verde, puesto que esta característica física está directamente relacionada con la preferencia de los catadores. Además, los estudios de correlación de Pearson indicaron que los catadores parecen asociar la intensidad del color verde y el sabor a kiwi con una mayor acidez y con un menor contenido en azúcares de las muestras, siendo éstas las características que, junto con una menor consistencia, definen la preferencia de este producto

2.2 Tecnologías de secado

Desde el secado por energía solar como técnica usada desde la antigüedad, los tratamientos de secado han evolucionado llegando a ser clasificadas por generaciones (Sabarez, 2021):

- Primera generación: el proceso consta principalmente de aire caliente que fluye sobre el producto para remover su humedad desde la superficie. Este tipo de secadores son adecuados para sólidos como granos, frutas y vegetales en rodajas. En general poseen un alimentador, un calefactor y un recolector del producto seco. Ejemplos de estas tecnologías son el secado en horno y bandejas
- Segunda Generación: Secadores apropiados para procesar pastas o purés. La materia prima es atomizada, formándose pequeñas gotas en un medio de aire caliente de secado, removiendo así su humedad. Las principales diferencias entre los tipos de secadores de segunda generación son las características de la alimentación, el tiempo de residencia y el tamaño de partícula. Ejemplos de esto son el secador spray y secado mediante lecho fluidizado
- Tercera Generación: Este tipo de secadores fueron desarrollados en respuesta a los daños estructurales, degradación de color y sabor que se experimentaba en los alimentos en otras tecnologías de secado. Secado por liofilización y deshidratación osmótica son parte de la tercera generación.
- Cuarta Generación: Tecnologías que implican el uso de vacío, fluidizado, uso de microondas, radiofrecuencias y de ventana refractiva son parte de los últimos avances en el secado de alimentos, teniendo aplicaciones específicas, pero siempre basadas en mejorar la calidad del producto como sus propiedades fisicoquímicas

2.2.1 Liofilización

Es un método de secado que surge a principio de los 50 y fue aplicado inicialmente en la industria farmacéutica, luego con los avances tecnológicos fue posible utilizarlo para la industria alimentaria. Dada la alta calidad obtenida de los productos sometidos a este método, diversos estudios han determinado que mediante de este sistema se obtiene el producto con más alta calidad comparado con el resto de las tecnologías disponibles en la actualidad ya que maximiza la retención de nutrientes, manteniendo estructura color y sabor del producto. (Ramirez J. , 2006); (Mujumdar, 2014)

Fenomenológicamente, el proceso provoca una transición directa desde agua en estado sólido a un estado gaseoso. Para ello las condiciones de temperatura y presión de vapor deben estar por debajo del punto triple del agua pura.

En sí, el proceso funciona en base a tres etapas (Berk, 2013)

1.- Congelamiento: El elemento por secar es enfriado a temperaturas bajo la temperatura de solidificación, la cual depende de la naturaleza del material. Al final de este paso ya existe una separación parcial entre el agua congelada y el soluto. El agua que alcanza el punto de congelación está entre un 65 y un 90% del contenido de humedad total.

2.- Secado primario: El material ya congelado es colocado en una cámara de secado, reduciendo drásticamente la presión dentro de ella para que permita la sublimación de agua congelada presente en el elemento que se desea tratar. Cuando las moléculas de agua entran en fase de vapor, guardan en ellas un calor latente de sublimación, haciendo que la temperatura del producto congelado disminuya. Si no hay un suministro de calor al sistema, la presión de vapor del agua a la temperatura del material alcanza el valor de la presión parcial del vapor de agua en el cámara de secado, estableciéndose un equilibrio y deteniéndose el proceso. Para que exista una sublimación continua, el sistema de secado debe contemplar una fuente de suministro de calor, Para ello se utilizan placas calefactoras que transfieren el calor mediante conducción. Tomando en consideración diversas limitaciones, pero en esencial la temperatura, ya que el producto podría experimentar cambios de color, deterioro químico, deformación estructural y reacciones enzimáticas indeseadas.

3.- Secado Secundario: Consiste en la remoción del agua que no alcanzó el punto de congelamiento. Esta etapa inicia cuando queda solo la humedad ligada, la que corresponde a un 10 a 35% de la cantidad agua total del material. Esta humedad es removida también por la aplicación de calor en un cámara de vacío. Usualmente, se usan temperaturas de 10 a 35°C para elementos termosensibles y 50°C o más para materiales menos sensible al calor. Por otro lado, el proceso de liofilización requiere bajas temperaturas de operación, por lo que tiende a mantener el color del producto, además en conjunto con la ausencia de agua líquida, son inhibidas la mayor parte de las reacciones microbiológicas que causan el deterioro en el alimento. El agua en estado sólido protege la estructura del producto durante el proceso, manteniendo su forma. Teniendo en cuenta todas las ventajas que presenta este tratamiento además de la posibilidad de aplicación de la tecnología a toda clase de alimento obteniendo un producto de alta calidad, su principal desventaja es ser la tecnología más cara para la obtención de productos deshidratados.

2.2.2 Ventana refractiva

El método de secado por ventana refractiva o Refractance Window Drying (RWD) es una tecnología introducida por MDC Technologies Inc. Usado para alimentos termosensibles, el diseño de este método se enfoca en el uso de agua caliente a temperaturas por debajo del punto de ebullición, como medio de transferencia de calor. Para la distribución del producto Se requiere una lámina delgada, construida de un plástico especial (MylarR) conocido también como tereftalato de polietileno (PET) de un espesor de 0.2 a 1 mm. Esta lámina sirve como soporte del producto y también como medio transparente a la radiación infrarroja, debido a sus propiedades conductivas de calor el PET es uno de los elementos que se adapta mejor a los sistemas de ventana refractiva. (Nindo & Tang., 2007); (Subhanki & Dwivedi, 2022).

En la Figura 4 se aprecia el esquema de funcionamiento de la ventana refractiva en configuración continua, usando una cinta transportadora donde el producto es secado por agua caliente recirculada y la humedad es extraída por una campana de acero inoxidable. El producto seco es removido mediante cuchillas al final del proceso.

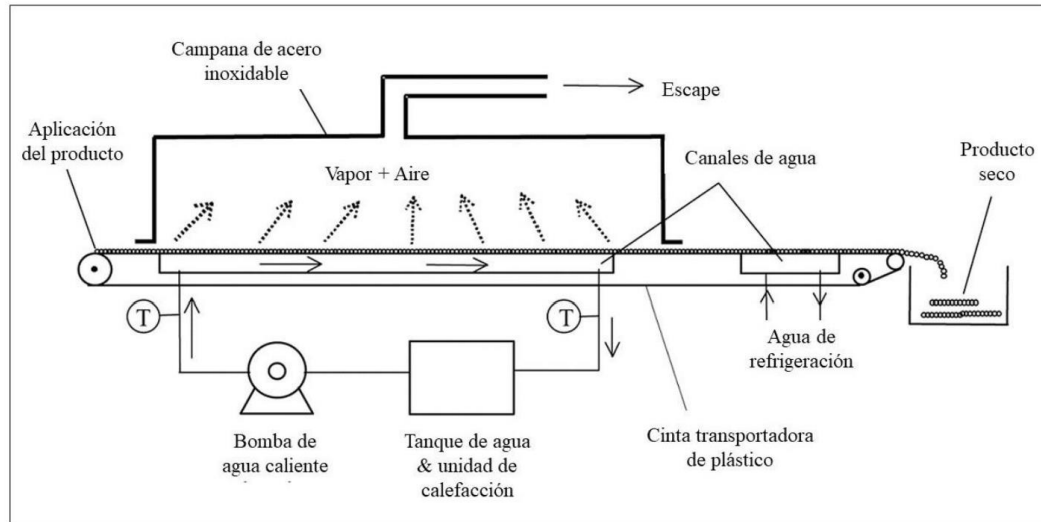


Figura 4 Esquema de ventana refractiva configuración continua (Nindo & Tang., 2007)

Por otro lado, este proceso también puede desarrollarse en una configuración tipo batch, tal como se muestra en la Figura 5. En esta versión, solo se cuenta con un baño termorregulado, donde se dispone del Mylar encima del medio de secado (agua). Así, el alimento puede ser secado controlando la temperatura de operación y al finalizar el secado, el alimento se remueve manualmente. (Muyonga et al, 2022)

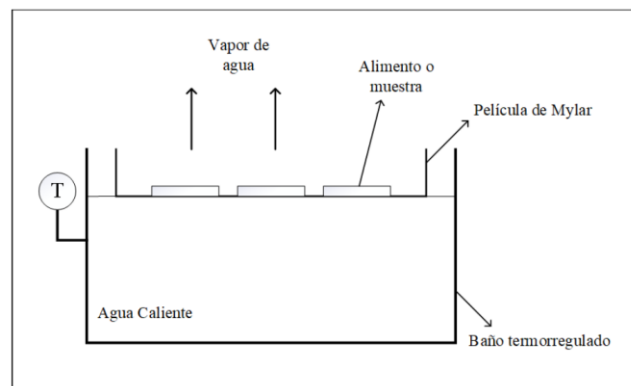


Figura 5 Ventana refractiva configuración batch (Muyonga et al, 2022)

Ya que el alimento no está en contacto directo con el medio calefactor se reduce la contaminación cruzada. La energía transferida durante el secado usa tres tipos de transferencia de calor: conducción, convección y radiación, Tal como se aprecia en la Figura 6, mediante la combinación de estos 3 mecanismos se obtiene un proceso altamente eficiente. Durante las etapas iniciales de secado, es principalmente el flujo de energía conductiva el que contribuye al

rápido aumento de la temperatura del producto. El flujo de energía por radiación tan solo contribuye un 1% del flujo conductivo (Ortiz et al, 2015)

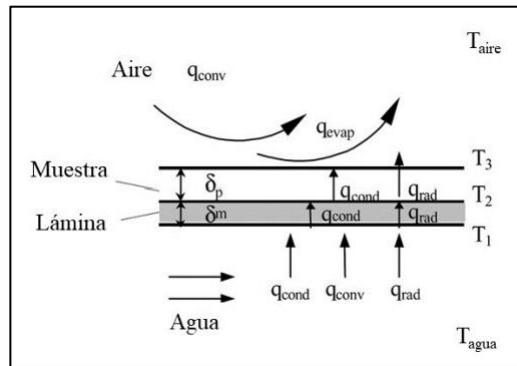


Figura 6: Mecanismos de Transferencia de calor en ventana refractiva (Nindo & Tang., 2007)

Cuando no hay ningún producto sobre la lámina de Mylar, hay una especie de desajuste del índice de refracción entre el agua y el aire, haciendo que la energía radiante incidente en la interfaz plástico-alimento se devuelva, transmitiendo solo un poco de esta energía a través de la lámina hacia el aire (ventana cerrada). Cuando el alimento de alta humedad es colocado sobre el plástico, el desajuste del índice de refracción se reduce y permite una extensión entre el agua y el alimento (sistema agua-plástico-alimento). Por tanto, los índices de refracción se acercan, reduciéndose la reflexión de la energía radiante y aumentando la transmisión de ésta al alimento (ventana abierta). A medida que el secado continúa, el contenido de humedad del producto disminuye, se da a lugar nuevamente al desajuste del índice de refracción, haciendo que una mayor proporción de la energía se refleje en el agua, deteniendo el secado. El grosor del plástico influye de gran manera en la cantidad de energía radiante o la que es transferida por conducción. Del mismo modo, el espesor y el contenido de humedad del alimento influye en la capacidad de absorción de la energía. (Mahanti et al, 2021)

Este tipo de secado categorizado como cuarta generación, posee una gran versatilidad, ya que puede ser usado en alimentos sólidos o líquidos ya sea frutas y verduras de todo tipo, obteniendo el producto en forma de polvo o concentrado de alto valor, además de obtener productos de buena calidad de manera eficiente. En el estudio realizado por Franco et al, (2019) en donde se evaluaba el efecto de difusión, cambio de color y textura de pescado, carne y manzana, tras el secado en ventana refractiva, se determina que el tiempo de secado de una manzana se puede ver reducido en un 50%, además reduce el cambio de color y textura de los alimentos al compararlo con otros métodos tradicionales. Estos resultados coinciden con diversos estudios realizados, en donde al utilizar las condiciones adecuadas de temperatura, se optimiza el tiempo de residencia, retención de nutrientes y características organolépticas (Subhanki & Dwivedi, 2022; Asiimwe et al, 2022; Elitin, 2022 ;Uribe et al, 2022)

2.2.3 Uso de vacío en procesos de secado

Aumentar la temperatura de operación en el proceso de secado facilita la evaporación del agua presente en el alimento. Sin embargo, si el producto es termosensible, se puede ver afectada la calidad final, esto se puede evitar, mediante la aplicación de vacío, ya que, al bajar la presión, también disminuye la temperatura de evaporación, de esta manera se evita someter el producto a altas temperaturas. Comparado con un secado a presión atmosférica, el secado a vacío tiene algunas características distintivas como una alta razón de secado, menores temperaturas de trabajo y condiciones anaerobias. Estas características pueden ayudar a mejorar la retención de las propiedades que se suelen perder en el procesamiento de alimentos. (Wu et al, 2008; Mujumdar, 2014)

Este no es un tipo de sistema de secado por sí solo, sino que por las condiciones que genera se tiende a acoplar a otros métodos de secado ya sea en secado de bandeja, junto a radiación infrarroja, entre muchas otras combinaciones innovadoras que han surgido con el tiempo.

En ese sentido, la implementación de ventana refractiva como sistema acoplado a un secado a vacío es un avance en nuevas tecnologías de tratamientos híbridos de deshidratación de alimentos termosensibles. En la Figura 7 se observa un esquema de secado hidro-conductivo con cobre a vacío, en el cual se aprecia la trampa de vapor que atrapa la humedad extraída desde el producto con su respectiva bomba de vacío.

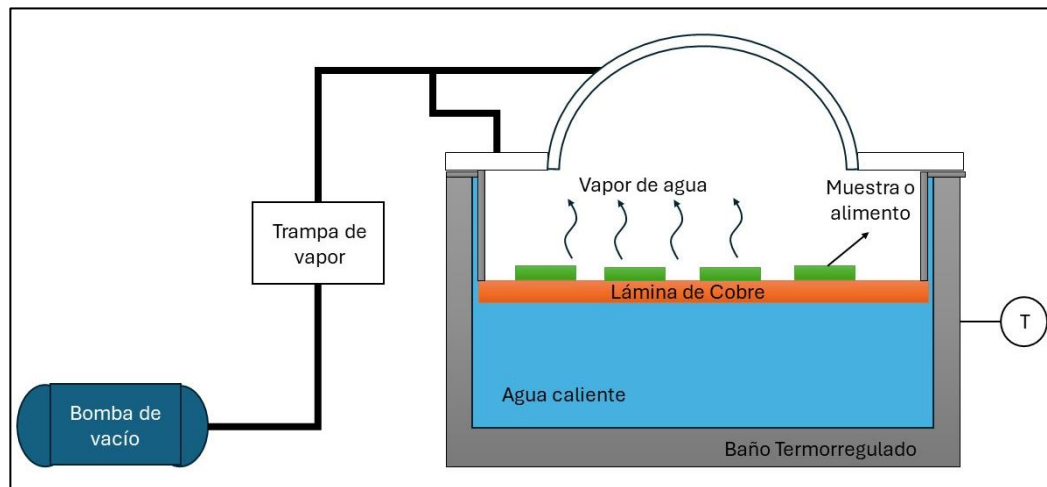


Figura 7 Diagrama de secado hidro-conductivo con cobre a vacío (Elaboración propia)

Elitin (2022) mediante la combinación de la tecnología de ventana refractiva con Mylar acoplada a vacío, determinó que la aplicación de este último permite disminuir hasta en 11% en ciertas temperaturas el tiempo de secado con respecto a la operación de la ventana refractiva convencional, sin embargo, en pruebas de calidad como contenido de polifenoles y la actividad antioxidante no presentaron diferencias significativas entre ambos métodos.

2.3 Fenomenología deshidratación de alimentos

El proceso principal en la deshidratación de alimentos se basa en la difusión del agua, representada por la segunda ley de Fick, a través de la Ecuación (1) :

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

Donde:

- C : contenido de humedad (kg agua/kg producto).
- t : tiempo (s).
- x : distancia en la dirección de la transferencia de masa (m).
- D_{eff} : coeficiente de difusión efectiva (m²/s).

Para resolver analíticamente esta ecuación diferencial, es necesario tener en cuenta varios supuestos, entre ellos, que el coeficiente de difusión sea constante y no dependa del contenido de agua en el alimento, que la temperatura ambiente permanezca constante y que las capas del alimento se comporten como placas planas de longitud finita, entre otros. Para esta investigación, se consideró que la laminas del producto se comporta como una placa finita.

El modelo resultante de la segunda ley de Fick se expresa mediante la Ecuación (2):

$$MR_t = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} e^{-D_{eff} \left(\frac{(2n-1)\pi}{2l} \right)^2 t} \quad (2)$$

Donde:

- MR : Tasa de Humedad Adimensional
- n : Numero de Particiones
- L : Espesor de la muestra (m)

La tasa de humedad adimensional se determina utilizando la Ecuación (3) (Erbay & Icier, 2010)

$$MR = \frac{C(t) - C_{eq}}{C_0 - C_{eq}} \quad (3)$$

Donde:

- $C(t)$: Concentración en cualquier tiempo
- C_0 : Concentración inicial
- C_{eq} : Concentración en equilibrio

Generalmente, se utilizan los principios de la segunda ley de Fick para modelar los procesos de secado, ya que esta ley suele describir de manera acertada la difusión del agua en algunos productos alimenticios. No obstante, hay casos en los que las dinámicas de secado presentan desviaciones con respecto a lo predicho por esta ley. Esto se debe a que varias de las suposiciones hechas para aplicar esta ley no se adaptan de adecuadamente a la estructura

heterogénea de los tejidos vegetales, además de la contracción y los cambios de volumen propios de los procesos de deshidratación por la pérdida de humedad, todo ello, provoca que las predicciones basadas en la segunda ley de Fick no sean completamente exactas. (Simpson et al., 2015).

A raíz de lo anterior, se propone emplear el método del cálculo fraccional para representar el proceso de difusión durante el secado de las láminas de kiwi. Esta es una herramienta que permite modelar situaciones que difieren de lo predicho por la segunda ley de Fick donde se pueden presentar velocidades de difusión superiores o inferiores. El modelo de difusión anómala, basado en el enfoque de cálculo fraccional y simplificado para periodos extensos de secado, se expresa mediante la Ecuación (4) (Simpson et al, 2015):

$$MR_t = \frac{8}{\pi^2} e^{-Deff\left(\frac{\pi}{2L}\right)^2 t^\alpha} \quad (4)$$

Donde MR_t se define como una humedad adimensional, L el espesor de la rodaja en metros, $Deff$ es el coeficiente de difusión con dimensiones de m^2/s^α y t es el tiempo en segundos. El parámetro α depende del material y refleja la influencia predominante del mecanismo de transporte en la transferencia de masa. Valores entre 0 y 1 indican un mecanismo de difusión sub-difusiva, mientras que $\alpha > 1$ implica un comportamiento super-difusivo. Si α tiende hacia la unidad, el modelo de difusión anómala se aproxima a la segunda ley de Fick.

III. Materiales y métodos

3 Materiales y Métodos

Para el desarrollo este trabajo de memoria, se establece el procedimiento experimental señalado en la Figura 8. Cada tópico expuesto en este esquema es profundizado en diferentes puntos de esta sección.

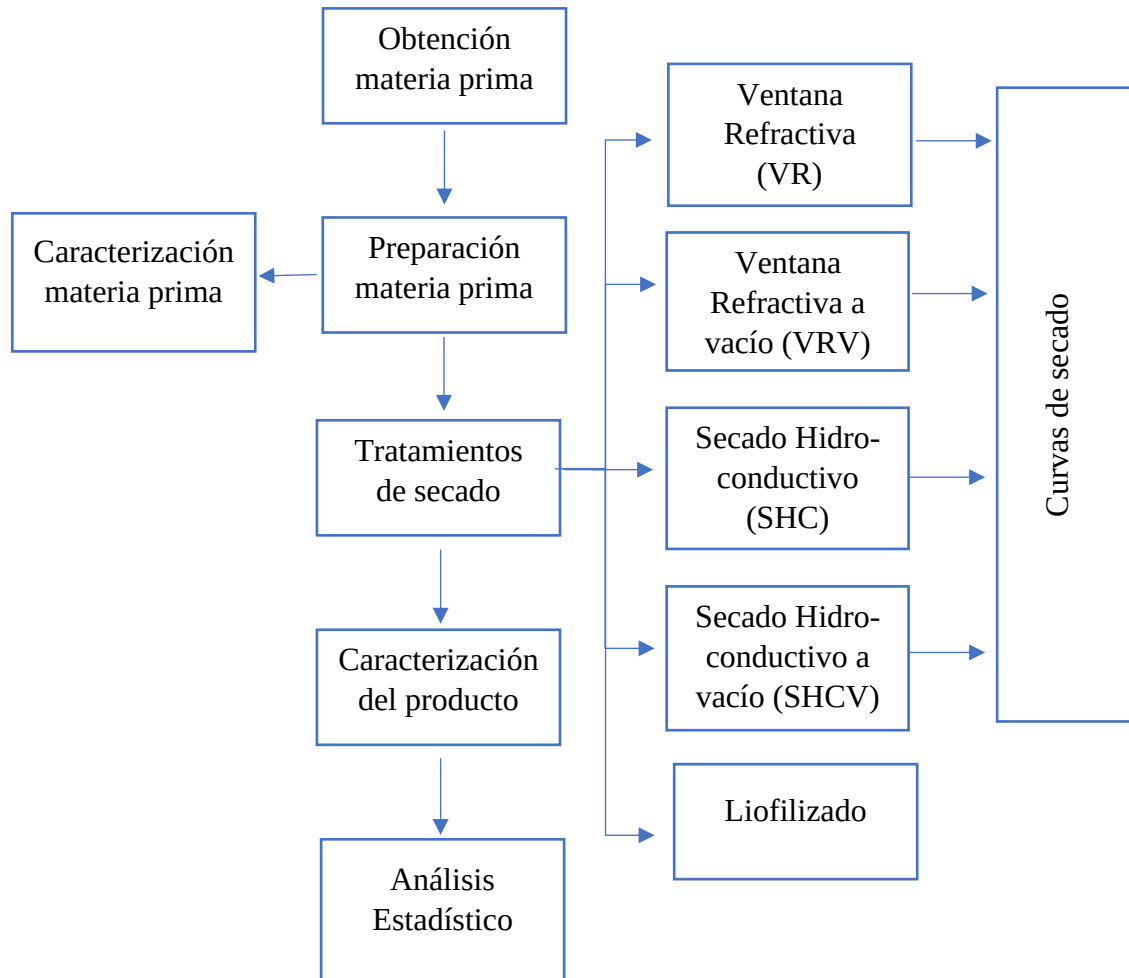


Figura 8. Esquema procedimiento experimental (Elaboración propia)

3.1 Obtención y Preparación de la materia prima

Para este procedimiento experimental se utilizará como materia prima la fruta kiwi variedad Hayward, el cual fue adquirido en supermercados de Viña del mar, Chile. Ya en el laboratorio de alimentos de la universidad se procede a retirar la piel o cascara con un cuchillo, para después, mediante una mandolina, cortar el kiwi en láminas de 3 mm de espesor, luego con un sacabocado, se les da a las láminas una forma circular de 40 mm de diámetro, esto con el objetivo de trabajar con una razón espesor área cercana a 1:11, así se puede considerar modelo de transferencia de materia en placa plana. (Cengel Y. , 2007)

Después de cortar los kiwis, las rodajas se depositan ordenadamente al interior de bolsas herméticas, tal como se aprecien en la Figura 9, para posteriormente ser almacenadas en una congeladora (Bosch GSN36VLFP, Alemania) a -80°C hasta que sean requeridas, de esta manera se desea evitar el deterioro de las propiedades de la fruta fresca.



Figura 9. Rodajas de kiwi para almacenar

Al momento de realizar cualquier prueba, se deben retirar la cantidad de bolsas necesarias del congelador y dejar a temperatura ambiente por lo menos 30 min siempre manteniendo las rodajas al interior de la bolsa hermética.

En caso de determinar curvas de actividad de agua o curva de humedad, es necesario pesar cada una de las láminas a utilizar, ordenarlas de mayor a menor y luego posicionarlas en el equipo, en cambio para pruebas de color, vitamina C, y humedad final del producto, las rodajas se depositan directamente en la superficie del equipo de manera aleatoria.

3.2 Equipos de secado

Uno de los objetivos de esta investigación es analizar y comparar los productos obtenidos mediante diferentes tecnologías. Para lograr esto, se realizan modificaciones en las condiciones de operación de la ventana refractiva convencional, cambiando el material de soporte de las muestras y ajustando la presión de trabajo con el fin de lograr un proceso más eficiente. Cada una de estas modificaciones en las condiciones operacionales afecta significativamente los procesos por sí sola. Por lo tanto, también se considera la posibilidad de realizar secados modificando únicamente la presión de trabajo (Ventana refractiva a vacío) y solo el material de soporte (Secado hidro conductivo). De esta manera, se puede evaluar el efecto de cada una de las condiciones de operación por separado y luego analizar las consecuencias de someter el proceso a ambas perturbaciones (Secado hidro conductivo a vacío).

Cada una de estas condiciones de operación que se modifican se ven resumida en la Tabla 2.

Tabla 2. Resumen condiciones de operación para el secado de láminas de kiwi mediante varios tipos de secado

Tecnología de Secado	Temperatura °C	Presión mbar	Espesor muestra mm	Medio de soporte
VR	70-80-90	atmosférica	3	Mylar
VRV	70-80-90	450	3	Mylar
SHC	70-80-90	atmosférica	3	Cobre
SHCV	70-80-90	450	3	Cobre
Liofilizado	30	0,14	3	-

VR: Ventana refractiva; VRV: Ventana refractiva a vacío; SHC: Secado hidro-conductivo; SHCV: Secado hidro-conductivo a vacío

3.2.1 Ventana refractiva convencional (VR)

Para el secado se utilizó una versión batch del equipo disponible en el laboratorio, este consta de un baño de agua termorregulada (Memmert WNB-45, Alemania) y una lámina de Mylar con espesor 0,1 mm el cual se posa sobre la superficie del agua caliente, dando soporte a las muestras tal como se aprecia en la Figura 10 y permitiendo la transferencia de energía entre el agua y el producto. En base a la sensibilidad de la vitamina C a los tratamientos térmicos y los rangos de operación de la tecnología de secado indicados (Uribe et al, 2022; Muyonga et al, 2022; Franco et al, 2019) se determina que el agua al interior del baño termorregulado será calentada hasta tres condiciones de temperatura distintas: 70°C, 80°C y 90°C.



Figura 10 Secado de kiwis en ventana refractiva

3.2.2 Ventana Refractiva Acoplada a vacío (VRV)

Con esta tecnología, se espera divisar el efecto que tiene sobre la ventana refractiva convencional, la modificación del parámetro de presión de trabajo y variación de temperatura en el secado de las láminas de kiwi, según se indica anteriormente en la Tabla 2.

Para secar a través de este método, se necesita de una estructura especial o baño calefactor que se aprecia en la Figura 11. Esta estructura es de acero inoxidable, sin embargo,

tiene unos tornillos que permiten modificar la lámina base que soporta el alimento. En la parte superior posee con un acrílico perforado el cual cuenta con un manómetro y se pone una tapa de desecador, gracias al sistema de mangueras que se acopla al dispositivo y la succión de la bomba (Dosivac DVR-II, Argentina) es posible generar vacío al interior de la estructura.

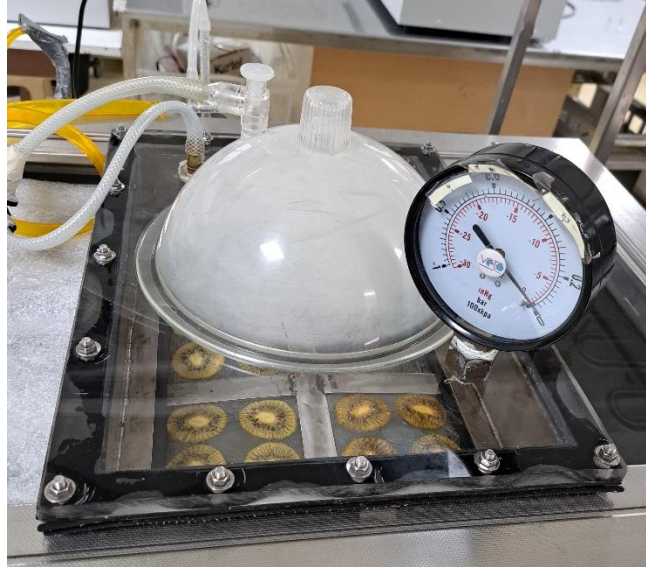


Figura 11 Ventana refractiva a vacío

Cabe destacar, que, al dejar la estructura metálica sobre el baño termorregulado, se forman burbujas con el aire atrapado entre el medio de soporte y el agua. Esto impide la correcta transferencia de calor mediante conducción, pues el coeficiente de transferencia de calor del agua puede ser hasta 100 veces mayor que el del aire o vapor dependiendo de las condiciones (Cengel Y. , 2007) por lo tanto es esencial que antes de comenzar y durante el proceso de secado, se retire este aire, ya que por evaporación del agua también se forman burbujas de vapor.

3.2.3 Secado Hidro conductivo (SHC)

Este método tiene como fin evaluar el efecto que tiene modificar el medio de soporte de la muestra, cambiando el Mylar a una lámina de cobre, además de variar la temperatura de trabajo según lo indicado anteriormente. Para ello se utiliza la misma estructura mencionada en el punto 3.2.2, sin embargo, se instala una placa de cobre de 1 mm espesor en la base y se deja abierta la superficie para trabajar a presión atmosférica tal como se muestra en la Figura 12

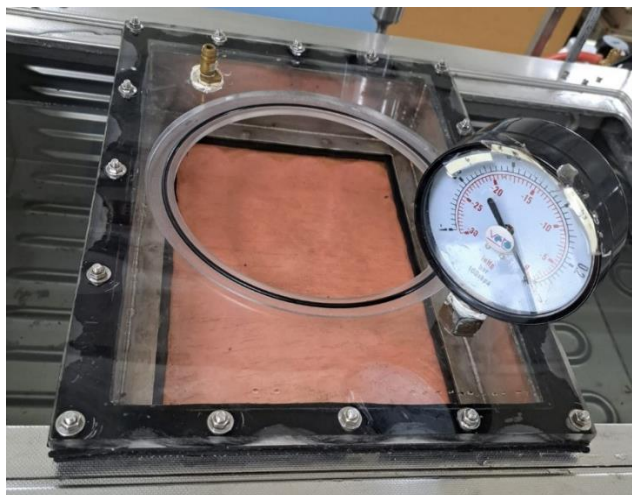


Figura 12 Estructura SHC utilizando lámina de cobre como soporte

Ya que el cobre posee una conductividad térmica de 401 W/mK (Cengel Y. , 2007) más elevada que el Mylar de 0,14 W/mK (Balderrabano-Ayala et al, 2022), se espera que mejore la transferencia de calor desde el medio calefactor hacia el producto optimizando así el proceso de secado.

3.2.4 Secado hidro conductivo acoplado a vacío (SHCV)

Este método de secado es innovador y busca ser una evolución con respecto a la ventana refractiva convencional.

En el proceso se usaron las mismas variaciones de temperatura mencionadas con anterioridad (70,80 y 90 °C), sin embargo, se modifica el medio de soporte de las muestras, de Mylar a una bandeja de cobre con espesor de 1 mm, (Figura 13), además de añadir vacío de 450 mbar al proceso. De esta manera es posible evaluar el efecto que provoca modificar temperatura, presión y medio de trabajo al mismo tiempo y determinar se es que se obtiene un proceso más eficiente.



Figura 13 Estructura para SHCV utilizando lámina de cobre como soporte

3.2.5 Liofilización

Para el tratamiento de secado por liofilización, se utiliza la muestra congelada a -24°C . El secado por liofilización consta esencialmente de remover la humedad de la muestra por sublimación, haciendo que el agua sólida migre desde el producto en condiciones de presión de vacío y temperatura media. Para ello, el equipo cuenta con el secado primario la cual es responsable de la remoción de humedad que logró solidificarse en el tratamiento de recongelación de la muestra, siendo solo este secado el utilizado en este proceso de liofilización.

Se dispone entonces la muestra congelada se posicionan en platos dentro de la cámara de vacío del liofilizador (Christ Alpha 2-4 LCSplus, Alemania) que se observa en la Figura 14 y se da inicio al proceso.



Figura 14. Liofilizador Christ Alpha 2-4 LCSplus, Alemania.

El equipo tiene un software asociado el cual permite programar las condiciones de operación del proceso de secado, en donde, a partir de los procedimientos aplicados por Ergün et al,(2016) se define una presión de 14 Pa (0,14 mbar), temperatura de plato de 30°C y 24 h de tiempo de tratamiento. Una vez cumplido el tiempo de secado primario en el proceso, se puede retirar el producto del equipo.

3.3 Determinación Curvas de Secado

Como criterio general, para afirmar que un alimento se encuentra adecuadamente deshidratado, el producto debe tener una humedad menor al 10% y una actividad de agua (a_w) menor 0,4, de esta manera se inhibe la actividad de enzimas y microorganismos que deterioran el alimento. Cuando ambas condiciones mencionadas anteriormente se cumplen, se puede definir el tiempo de operación. Este último es uno de los parámetros de eficiencia más importantes de los procesos de secado.

3.3.1 Cinética de Secado

Los coeficientes de difusión se determinan a partir de la modelación matemática de las curvas de secado correspondientes a cada muestra. Este proceso se lleva a cabo mediante la medición del cambio de masa de cada muestra durante el secado utilizando una balanza digital (Modelo JD400-3, Zhejiang, China), con una precisión de ± 0.001 gr.

Para obtener la cinética de secado, se utilizan 15 muestras. Se registra su peso inicial ($t=0$) y se realiza la medición del peso durante el proceso de secado en intervalos de 10 min. A partir de los cambios de peso de las rodajas en función del tiempo obtenidos en cada experiencia, se calculó el contenido de agua en diferentes momentos del secado. Se construyó la curva de secado y a partir de ella se determinó el punto crítico, por el método de los gradientes en puntos específicos, para encontrar la humedad y el tiempo crítico. Para todos los métodos de secado, se calculó el cambio de humedad en función del tiempo experimental (MR_t), utilizando la humedad en el tiempo (W_t), la humedad de equilibrio (W_e) y la humedad inicial (W_0), según la Ecuación (5):

$$MR_t = \frac{W_t - W_e}{W_0 - W_e} \quad (5)$$

Se emplearon dos modelos basados en la Ley de Difusión de Fick para describir la pérdida de agua durante los procesos de secado. Dado que el diámetro de las rodajas de kiwi es significativamente mayor que su grosor, se asume que la transferencia de masa ocurre únicamente en dirección axial. En el primer modelo, se utilizó la solución de la ley de Fick (Ver Ecuación (2)) para el transporte unidimensional, bajo la suposición de que la humedad se desplaza exclusivamente por difusión (mecanismo de transferencia de masa), que se produce una contracción despreciable, que el contenido de agua de las rodajas es uniforme a través de estas y que tanto los coeficientes de difusión como la temperatura permanecen constantes. El segundo modelo, el modelo de difusión anómalo (Ver Ecuación (4)), considera que las propiedades físicas de los materiales cambian con las variaciones en la microestructura del producto durante el proceso de secado (Ramirez et al, 2011)

El coeficiente de difusión se obtuvo mediante el ajuste de las cinéticas de secado correspondientes a las distintas muestras. Este ajuste se realizó desarrollando un código en MATLAB Versión R2022a, (The MathWorks Inc, EE. UU), donde la función objetivo fue minimizar la suma de los cuadrados de la diferencia entre los datos experimentales y el modelo propuesto. Las variables consideradas son el coeficiente difusivo para el caso de la difusión según la segunda Ley de Fick, mientras que para la modelación basada en la difusión anómala se tendrán como variables el coeficiente difusivo y el parámetro α . Además, en el ajuste se consideró el espesor promedio de las muestras. Se utilizó el coeficiente de correlación (R^2) como el principal criterio para evaluar la proximidad entre los datos experimentales y el modelo ajustado. Un valor de R^2 cercano a 1 indica un buen ajuste.

3.3.2 Curva actividad de agua (a_w)

La actividad de agua (a_w) es un factor determinante para establecer los tiempos de secado de alimentos, además de ser un parámetro de inocuidad del producto seco. La curva se elabora a partir de la medición cada 10 min de la a_w , hasta alcanzar un valor objetivo, el cual sería de 0,4 para este procedimiento experimental. Este parámetro se mide mediante el higrómetro digital (Rotronic HP23-AW; EE. UU) que se observa en la Figura 15.



Figura 15 Termohigrometro Rotronic HP23-AW

3.4 Caracterización materia prima y productos

La pérdida de calidad es uno de los problemas más significativos durante el procesamiento de alimentos. Por esta razón, a continuación, se detallan los procedimientos para identificar los parámetros de calidad a evaluar. Estos procedimientos se aplican para caracterizar el kiwi en rodajas luego de descongelar, la cual sería la materia prima de esta investigación y también se caracterizan los productos obtenidos después de ser procesados según las condiciones de operación de la Tabla 2, en los tiempos definidos a partir de bibliografía o las curvas de secado mencionadas con anterioridad, según corresponda.

3.4.1 Humedad

Se realizará este ensayo en base a la norma AOAC (Association of Official Analytical Chemists), obteniéndose la humedad de acuerdo con el siguiente procedimiento

- En una placa Petri se adicionan de 5 a 10 g de muestra pesados en una balanza analítica
- Luego, las placas Petri se depositan con muestra en un desecador cerrado y se aplica condición de vacío ($P < 100$ mmHg).
- Una vez sellado, el desecador se mantiene en estufa (Mettler UFB-400, Alemania) 60°C por al menos 24 h o hasta obtener un peso constante de muestra.
- Finalmente, se retiran las placas Petri, enfrían y registran la masa en la balanza analítica. La humedad resultante se obtiene mediante la Ecuación (6) presentada a continuación

$$H = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \cdot 100 \quad (6)$$

Siendo H la humedad de la muestra en %, m_1 su masa inicial y m_2 la masa final de la muestra posterior a su secado en la estufa (Figura 16), medida en gramos. (AOAC, 2000)



Figura 16 Estufa Memmert UFB-400, Alemania.

3.4.2 Contenido de Vitamina C (Acido Ascórbico)

Este es uno de los factores que aporta mayor valor al kiwi; sin embargo, al ser un compuesto soluble en agua, puede perderse fácilmente del alimento debido a la hidrolización, oxidación, lixiviación directa y/o la desnaturalización causada por la temperatura durante el procesamiento. Por ello, la retención de vitamina C es el principal parámetro a analizar para evaluar la eficiencia de los procesos y la calidad nutricional del producto final.

Para determinar el contenido de vitamina C o Acido Ascorbico (AA) presente en el kiwi, primero se debe preparar la muestra a utilizar. En el caso del producto seco, si se desea realizar las pruebas en triplicado, se requiere de por lo menos 15 gr de kiwi, al cual se le adiciona la cantidad de agua suficiente para alcanzar el mismo contenido de agua de la muestra fresca (Ver Anexo 1) y se deja reposar durante 2 horas. Después del tiempo indicado, se trituran las laminas mediante una Minipimer (Thomas Multimixer TH8735, Alemania) obteniendo pulpa. Luego utilizando muselina como medio filtrante, se separan los sólidos para extraer solamente la parte líquida de la muestra. En el caso de la materia prima, se necesitan por lo menos 45 gr de kiwi, los cuales se trituran y filtra, omitiendo la adición de agua.

Con el líquido extraído se procede a utilizar el “Kit Para Acido Ascorbico (HI 3850)” de Hanna Instruments, en donde se indica el siguiente procedimiento experimental:

1. Agregar 10 ml de muestra en el tubo de ensayo graduado y luego traspasar al vaso precipitado, aforar con agua destilada hasta los 50 ml para diluir la muestra
2. Preparar en el otro vaso precipitado una muestra mas como blanco para tener referencia del color inicial
3. Utilizando un gotero plastico, agregar a una sola muestra 1 ml del reactivo HI 3850A, agitar vigorosamente para mezclar
4. Añadir a la misma muestra 4 gotas del Indicador de color, agitar para mezclar
5. Mientras se agita, añadir con el gotero plastico de 3 ml y contar gotas del reactivo HI 3850C-0, hasta que la muestra cambie a color azul persistente. Para corroborar el cambio de color, compare con el blanco preparado en el paso 2.
6. Cuente las gotas añadidas para obtener el cambio de color. Para calcular la concentracion de Acido Ascorbico multiplique por 10 la cantidad de gotas del reactivo HI 3850C-0 de acuerdo a la Ecuacion (6)

$$\text{numero de gotas} * 10 = \left(\frac{mg}{L} \right) \text{ de } C_6H_8O_6 (AA) \quad (6)$$

3.4.3 Colorimetría

Para la determinación del color de la materia prima y de las muestras procesadas se utiliza el colorímetro (Konica Minolta CR-410, Japón) que se aprecia en la Figura 17. Su uso consta de la medición directa del lector del instrumento, que ocupa un haz de luz sobre la muestra que se desea medir. Previamente a su uso, el colorímetro debe ser calibrado.



Figura 17 Colorímetro Konica Minolta CR-410, Japón.

Con esta herramienta se obtienen los parámetros de color según la metodología de espacio de color CIElab. El parámetro L* indica la luminosidad que presenta la muestra, a* muestra el espectro de color rojo a verde y, por último, el parámetro b* indica valores del espectro amarillo a azul, como se muestra en la Figura 18

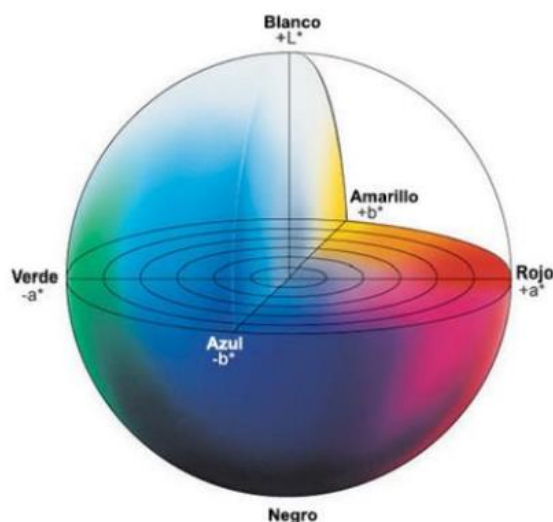


Figura 18 Coordenadas espacio de color CIElab

Obteniendo estos parámetros se cuantifica el cambio de color de la muestra que es medida. Para ello es necesario el uso de la Ecuación (7)

$$\Delta E^* = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2} \quad (7)$$

En donde ΔE^* es la diferencia total de color medida por el equipo. Se definen también las coordenadas L_o^* , a_o^* , b_o^* donde el subíndice hace alusión a que la muestra medida es la inicial o de referencia. De la misma forma, se obtienen las coordenadas L_i^* , a_i^* , b_i^* donde el subíndice “i” es referido a la muestra que se desea comparar con la muestra de referencia. Para evaluar la diferencia apreciable de color, (Mujumdar, 2014) indican que a partir de un $\Delta E > 3$ es posible observar una diferencia apreciable a simple vista entre el color de la muestra de referencia y la muestra medida.

Tabla 3. Criterio de evaluación sensorial de diferencias de color (Mujumdar, 2014)

Diferencia de Color	ΔE^*
Imperceptible	0-0,5
Ligero	0,5-1,5
Perceptible	1,5-3,0
Apreciable	3,0-6,0
Grande	6,0-12,0
Muy Obvio	>12,0

Para esta matriz alimenticia, uno de los principales parámetros de calidad es la intensidad del color verde (Perez, 2013), por la tanto, al momento de la medición, se procede a retirar el centro y las pepas de las láminas, con el fin de tomar en consideración solamente los trozos de pulpa del kiwi.

3.5 Análisis Estadístico

Los resultados serán expresados como promedio $\pm$ desviación estándar luego de analizar estadísticamente cada parámetro en triplicado mediante un análisis de varianza (ANOVA) y pruebas de rango múltiple de Duncan con 95% de significancia, a través del software STATGRAPHIC Centurion XVI. (Statgraphics Technologies, Inc, EE.UU)

IV. Resultados y discusión

4 Resultados y discusión

4.1 Tiempos de operación, humedad y Actividad de agua (a_w)

Para los secados mediante Ventana Refractiva (VR), Ventana Refractiva a Vacío (VRV), Secado Hidro-Conductivo (SHC) y Secado Hidro-Conductivo a Vacío (SHCV), se reporta en la Figura 19 el tiempo de secado considerando tener una humedad final menor al 10% y actividad de agua menor a 0,4.

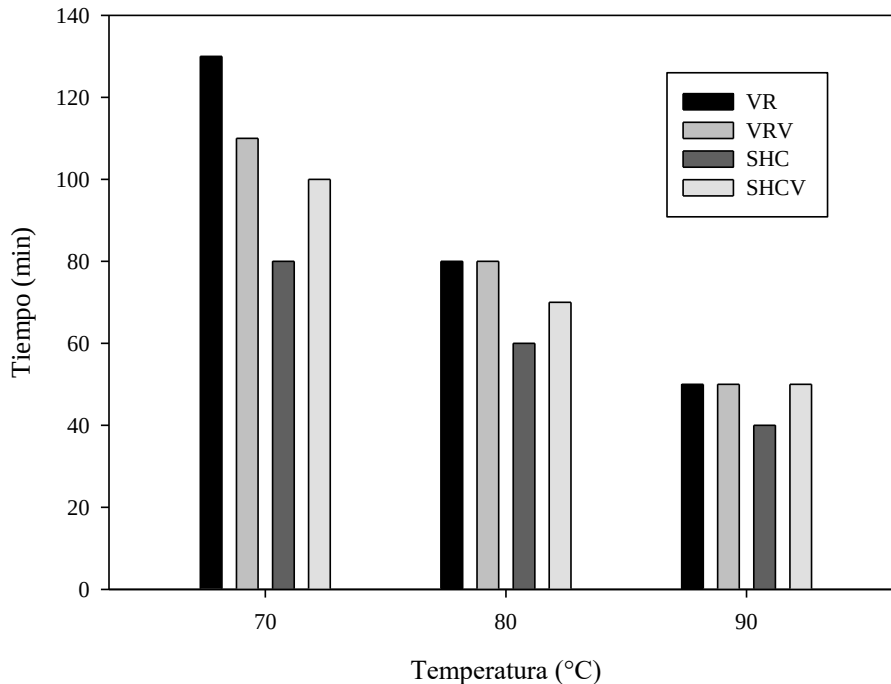


Figura 19 Resumen tiempos de operación requerido para los diferentes procesos de secado de láminas de kiwi

A través de la gráfica se puede observar que el tiempo de proceso es menor a medida que se aumenta la temperatura, presentando una disminución de hasta un 61,5% entre el secado de VR a 70°C y VR a 90°C. Estos resultados son similares a los reportados por Izli et al.(2017) quien secó laminas de kiwi mediante aire caliente a 60, 70 y 80 °C, obteniendo una reducción del tiempo de operación del 45,83% debido al incremento de la temperatura. Por otro lado, Nakagawa et al., (2021) deshidrató mediante aire caliente a 70 °C, láminas de kiwi de 5 mm de espesor, obteniendo su producto en 420 min con una humedad final del 19,6%.

También, se observa una clara disminución en el tiempo de proceso al comparar el medio de soporte utilizado para secar el alimento, esto se atribuye al mayor coeficiente de conductividad térmica que posee el cobre, ello se traduce en una disminución de hasta 38,5% en el tiempo de secado al utilizar la lámina de cobre como soporte. Esta modificación es más significativa a menores temperaturas y se atribuye a la resistencia y conductividad térmica que posee el Mylar (aislante), pues ambas son propiedades que varían con la temperatura.

A medida que la temperatura aumenta, la conductividad térmica de los polímeros, como el Mylar, puede incrementar debido a la mayor agitación molecular y la facilitación del movimiento de los electrones. También experimentan cambios en sus propiedades mecánicas, volviéndose más blando y menos rígido, lo que podría comprometer su integridad estructural, disminuyendo su resistencia térmica. (Mano, 2003) En materiales aislantes, la resistencia térmica es elevada a bajas temperaturas, no obstante, al trabajar con una lámina delgada de material e incrementa la temperatura, la conductividad podría adquirir mayor relevancia. Esto permitiría una transferencia de calor similar a la de un metal, tal como se observa en la presente investigación.

Otra condición de operación a considerar es el uso de vacío, la cual, teóricamente, debería disminuir los tiempos de operación. Sin embargo, al comparar con entre los métodos de secado, el uso de vacío no influye o incluso perjudica el proceso aumentando los tiempos de operación. Esto se puede explicar ya que, fenomenológicamente la ventana refractiva es capaz de deshidratar alimentos gracias a la transferencia de calor mediante conducción y convección. Sin embargo, para aplicar vacío se requiere cerrar el sistema, lo que impediría la convección con el ambiente, disminuyendo la eficiencia del proceso.

Finalmente, al considerar todas las modificaciones planteadas comparando VR a 70 °C con SHC a 90 °C, se obtiene una disminución del tiempo de operación de 130 a 40 min respectivamente, siendo equivalente a un 69,2%. Cabe destacar que en la Figura 19 no se incluye el tiempo de secado del liofilizado, ya que este es de 1440 min, más de 10 veces los valores obtenidos mediante los otros secados.

En la Tabla 4 se reporta la humedad en base humedad obtenida para la materia prima (MP) y el producto final por cada método de secado y el liofilizado. Cada medición se realizó en triplicado.

Tabla 4. Resumen porcentaje de humedad en laminas se kiwi según método de secado

Método de secado	Temperatura (°C)	Humedad %		
MP	-	82,26	±	0,68 ^e
VR	70	6,63	±	0,41 ^c
	80	4,50	±	0,09 ^a
	90	5,22	±	0,18 ^{ab}
VRV	70	8,18	±	0,08 ^d
	80	4,62	±	0,23 ^{ab}
	90	4,26	±	0,33 ^a
SHC	70	8,74	±	0,58 ^d
	80	5,66	±	0,36 ^{abc}
	90	4,19	±	0,46 ^a
SHCV	70	6,40	±	0,31 ^{bc}
	80	5,18	±	0,46 ^{ab}
	90	5,29	±	1,25 ^{ab}
Liofilizado	30	4,66	±	1 ^{ab}

VR: Ventana refractiva; VRV: Ventana refractiva a vacío; SHC: Secado hidro-conductivo; SHCV: Secado hidro-conductivo a vacío

*Letras en superíndices distintas en la misma columna indican diferencias significativas ($P < 0.05$)

La humedad de la materia prima fue de un $82,26 \pm 0,68$ %, siendo un valor cercano a lo reportado por Caliskan et al, (2015), de $81,19 \pm 0,02$ %, por Zhou et al,(2018) de $84,4 \pm 2,1$ % y por Izli et al (2017) de 81,58%.

La medición de humedad del producto final muestra un valor mínimo de $4,19 \pm 0,46$ % correspondiente a Secado Hidro conductivo a 90 °C y el valor máximo es de $8,74 \pm 0,58$ % mediante tecnología de secado hidro conductivo a 70 °C. Si bien se observan diferencias significativas en los resultados ($P < 0.05$), de cada uno de los tratamientos aplicados se obtiene un producto con humedad menor al 10%, coincidiendo con las humedades finales los secados mediate, Ventana Refractiva, reportadas por Vásquez (2024) quien deshidrata manzanas, Elitin, (2022) quien deshidrata jugo de granada, Zuñiga et al (2022) secando Cascara de Agrad y Franco et al (2019) quienes deshidratan salmón, carne y mazanas.

En cuanto a la actividad de agua En la Figura 20,21 y 22 se aprecian las curvas de actividad de agua a 70, 80 y 90 °C respectivamente.

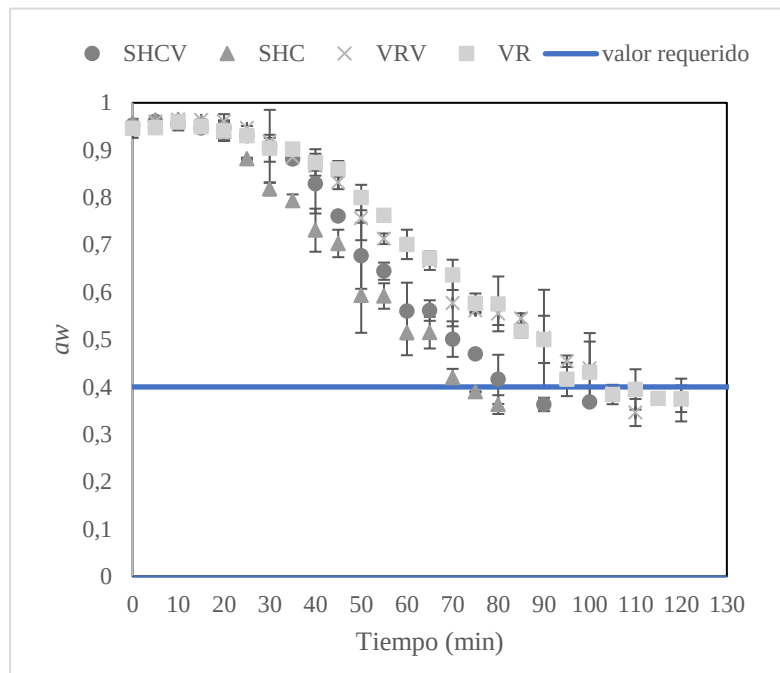


Figura 21 Curva Actividad de Agua de láminas de kiwi secadas a 70 °C mediante distintos procesos.

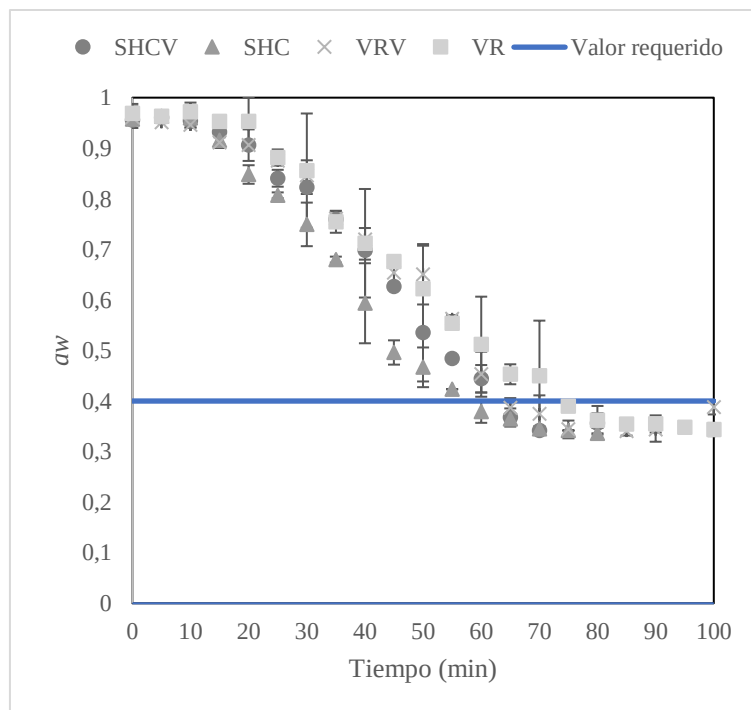


Figura 20 Curva actividad de agua de láminas de kiwi secadas a 80 °C mediante distintos procesos.

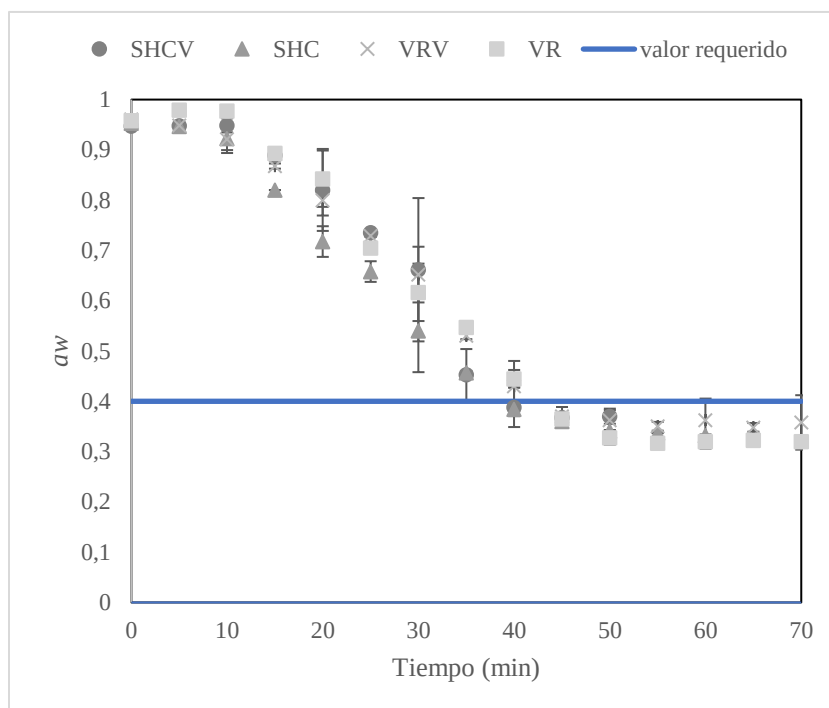


Figura 22. Curva actividad de agua de láminas de kiwi secadas a 90 °C mediante distintos procesos.

A través de estas curvas se puede observar que, a medida que aumenta la temperatura, se alcanzan valores estables bajo 0,4 en menor tiempo. Además, se puede observar, que aquellos secados que utilizan cobre como medio de soporte (SHC y SHCV), presentan una curva más pronunciada respecto a lo secados con Mylar. Esto sugiere una reducción más acelerada del agua disponible en la matriz, resultando en un proceso de secado más rápido. Aquella diferencia es mayor a menores temperaturas de operación.

También se obtiene la actividad de agua en las rodajas de kiwi utilizadas como materia prima y se comparan con el valor de los productos. Los resultados son reportados en la Figura 23 con su promedio y desviación estándar respectivo. En este ensayo se realizaron 10 repeticiones para las muestras liofilizadas, triplicado para el producto final en cada secado y para la materia prima se utilizó el valor de AW en tiempo 0 para cada uno de los secados, ósea 36 repeticiones.

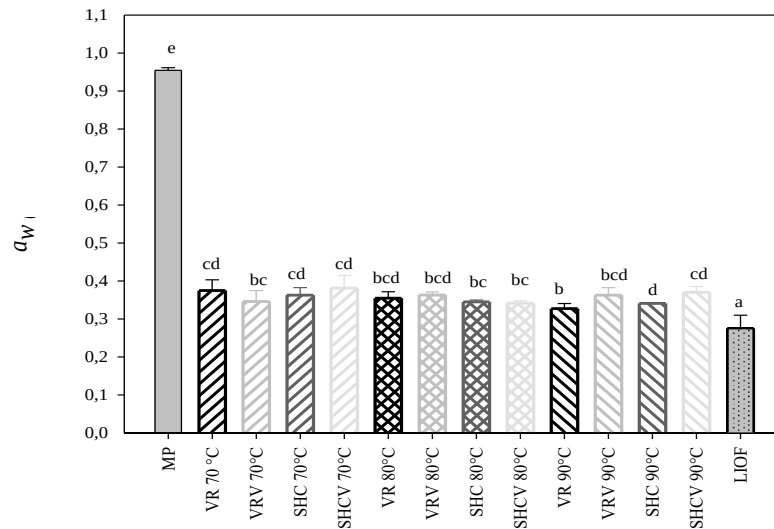


Figura 23. Resumen de los a_w obtenidos luego de someter láminas de kiwi a diferentes métodos de secados

*Letras en superíndices distintas en la misma columna indican diferencias significativas ($P < 0.05$)

Se obtuvo una a_w de $0,95 \pm 0,03$ para la materia prima y a partir de la gráfica, se puede observar que, para cada uno de los tratamientos de secado, se obtuvo una actividad de agua final menor a 0,4, lo cual se ajusta adecuadamente al criterio de actividad de agua para alimentos deshidratados, además no existen diferencias significativas ($P < 0.05$) entre las distintas condiciones de operación aplicadas a los procesos de secado mediante Ventana Refractiva. En cuanto al producto liofilizado, se obtuvo una actividad de agua de $0,276 \pm 0,034$, siendo la menor entre todos los tratamientos aplicados ($P < 0.05$). Estos resultados concuerdan con (Caliskan et al, 2015) quienes informan una actividad de agua de $0,98 \pm 0,01$ para pulpa fresca de kiwi y $0,28 \pm 0,03$ para pulpa liofilizada.

4.2 Color y contenido de vitamina C

En la Figura 24 se aprecia la comparación visual entre la materia prima utilizada, el producto liofilizado y el producto obtenido de los otros procesos, en donde se puede apreciar el evidente cambio de color y estructura entre cada una de las muestras.



Figura 24 Comparación visual entre MP, liofilizado y rodajas sometidas a las variaciones de secado hidro-conductivo

En la Tabla 5 se presentan los promedios y desviación estándar de los parámetros de color obtenidos tras 10 repeticiones a cada una de las muestras. En la materia prima se obtiene un valor L^* de $61,63 \pm 5,15$, un a^* de $-14,55 \pm 1,38$ y un b^* de $43,43 \pm 5,33$, siendo estos resultados similares a los reportados por Zhou et al. (2018) con L^* de $57,18 \pm 2,55$, a^* de $-17,25 \pm 0,80$ y b^* de $37,5 \pm 1,52$, en laminas de kiwi de 10 mm.

Según indica la Figura 18, menores valores de a^* presentan un color verde más intenso, un L^* alto significa mayor luminosidad y un b^* positivo mayor tendencia al amarillo. Con esto en consideración, se puede observar que en general los productos obtenidos mediante las variaciones de VR presentan un color amarillo (b^* positivo), cercano al de la materia prima, sin embargo, según el estudio realizado por Perez (2013), se concluye que la intensidad del color verde (a^* negativo) de un kiwi es el parámetro más relevante para el consumidor. De acuerdo con ello, estos tipos de secado obtienen un valor de a^* cercano a 0, indicando un color más cercano al marrón, además se aprecian mayores valores de a^* , a medida que aumenta la temperatura en cada tipo de secado, disminuyendo cada vez la intensidad del verde, en cambio, el liofilizado obtendría el color verde más cercano a la materia prima.

Tabla 5. Parámetros de color Lab para láminas de kiwi sometidas a los diferentes secados realizados

Método de secado	Temperatura (°C)	L^*	a^*	b^*
MP	-	61,63 $\pm$ 5,15 ^{fg}	-14,55 $\pm$ 1,38 ^a	43,43 $\pm$ 5,33 ^d
	70	56,27 $\pm$ 1,94 ^{bcd}	-0,20 $\pm$ 0,90 ^f	35,16 $\pm$ 1,31 ^{bc}
VR	80	62,45 $\pm$ 1,92 ^g	-0,22 $\pm$ 0,92 ^f	37,15 $\pm$ 2,13 ^c
	90	55,68 $\pm$ 3,28 ^{abc}	-0,66 $\pm$ 0,24 ^{ef}	35,09 $\pm$ 1,13 ^{bc}
VRV	70	50,06 $\pm$ 22,11 ^{bcde}	-5,68 $\pm$ 7,44 ^{de}	34,57 $\pm$ 15,04 ^c
	80	58,30 $\pm$ 1,00 ^{cdef}	-0,15 $\pm$ 0,07 ^f	34,83 $\pm$ 0,40 ^{bc}
	90	52,70 $\pm$ 0,63 ^a	0,54 $\pm$ 0,12 ^f	34,03 $\pm$ 1,94 ^{bc}
SHC	70	58,27 $\pm$ 0,36 ^{cdef}	-3,45 $\pm$ 0,31 ^c	34,81 $\pm$ 0,99 ^{bc}
	80	59,37 $\pm$ 0,92 ^{defg}	-2,80 $\pm$ 0,39 ^{cd}	36,16 $\pm$ 1,09 ^{bc}
	90	52,17 $\pm$ 0,79 ^a	-2,31 $\pm$ 0,18 ^{cd}	33,92 $\pm$ 1,26 ^{bc}
SHCV	70	54,39 $\pm$ 0,15 ^{ab}	-2,11 $\pm$ 0,94 ^d	34,98 $\pm$ 1,89 ^{bc}
	80	60,01 $\pm$ 0,89 ^{efg}	-2,01 $\pm$ 1,17 ^d	36,38 $\pm$ 0,85 ^{bc}
	90	36,38 $\pm$ 0,85 ^{ab}	-1,62 $\pm$ 0,86 ^{de}	32,97 $\pm$ 0,30 ^b
Liofilizado	30	74,96 $\pm$ 1,48 ^h	-11,71 $\pm$ 0,52 ^b	29,72 $\pm$ 1,30 ^a

VR: Ventana refractiva; VRV: Ventana refractiva a vacío; SHC: Secado hidro-conductivo; SHCV: Secado hidro-conductivo a vacío

*Letras en superíndices distintas en la misma columna indican diferencias significativas ($P < 0.05$)

La prueba de colorimetría tiene como objetivo demostrar las diferencias de color entre una muestra de referencia y la medida. Para efectos de esta experimentación, de acuerdo con los objetivos planteados, se escoge como muestra de referencia, para el cálculo del ΔE mediante la Ecuación (7), al producto liofilizado que se observa en la Figura 25, pues es el método de

secado que logra mejores resultados de color según Mujumdar (1995), lo cual concuerda con lo obtenido en este trabajo.



Figura 25 Rodaja de kiwi liofilizada (muestra de referencia para cálculo de diferencia de color)

De acuerdo con la Tabla 3, se menciona que a partir de un $\Delta E > 3$ es posible observar una diferencia apreciable a simple vista entre el color de la muestra de referencia y la muestra medida. Estos valores se presentan en la gráfica de la Figura 26

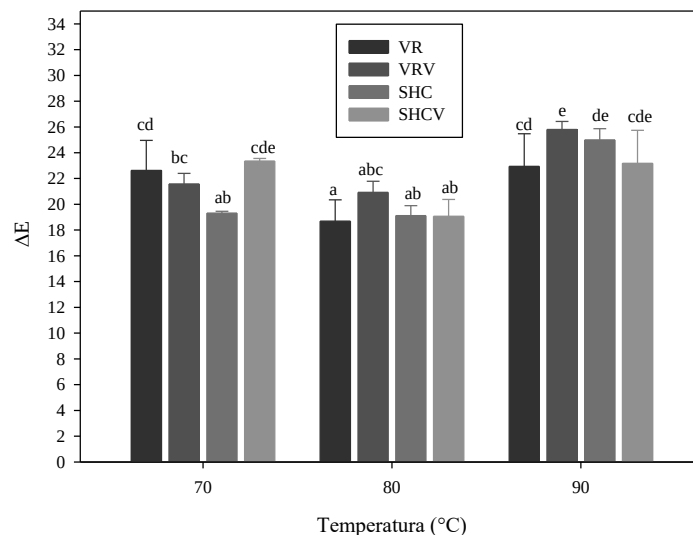


Figura 26. Diferencia de color de las láminas de kiwi secas obtenidas mediante los diferentes métodos de secado, respecto a la muestra liofilizada

*Letras en superíndices distintas en la misma columna indican diferencias significativas ($P < 0.05$)

Todos los ΔE obtenidos, superan el criterio de diferencia de color apreciable mencionado con anterioridad. En general no se observan tendencias claras de variación de color a causa de la aplicación de vacío o modificación del medio de soporte, sin embargo, si existen diferencias ($P < 0.05$) entre los resultados obtenidos mediante los secados a distintas temperaturas.

Todas las variaciones de secado a 80°C presentan un menor valor de ΔE , con diferencias significativas ($P < 0.05$) respecto al resto de los métodos a 70 y 90°C, siendo la menor la VR con $18,70 \pm 1,65$ sin presentar diferencias significativas entre los otros tipos de secado a la misma temperatura. Izli et al.(2017) realiza secado de laminas de kiwi mediante aire caliente a 80°C, obteniendo un ΔE de $18,58 \pm 1,66$, similar a los resultados obtenidos en este trabajo al utilizar el agua a temperatura de 80°C.

Las mayores diferencias de color apreciables se observan en los secados a 90°C, esto es atribuible a un pardeamiento no enzimático, entre ellas reacciones de Maillard, debido a las altas temperaturas, lo cual produce pigmentos oscuros y/o coloración marrón en ciertos alimentos, además de la oxidación del ácido ascórbico. Los productos resultantes de la oxidación, además de la pérdida de la vitamina, también causan una coloración marrón. (Cardona Serrate, 2020). Ello concuerda con los parámetros de color obtenidos, ya que a mayores temperaturas se presentan valores de a^* más cercanos a 0, valores de b^* más bajos y disminución de la luminosidad (L^* menor). Izli et al (2017), tambien reporta observaciones similares.

Como se menciona anteriormente, la retención de vitamina C es uno de los parámetros más relevantes para analizar la eficiencia de los procesos y evaluar si estos se ajustan a los objetivos establecidos, además de determinar la calidad nutricional de cada uno de los productos obtenidos mediante los diversos tipos de secado. Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 27.

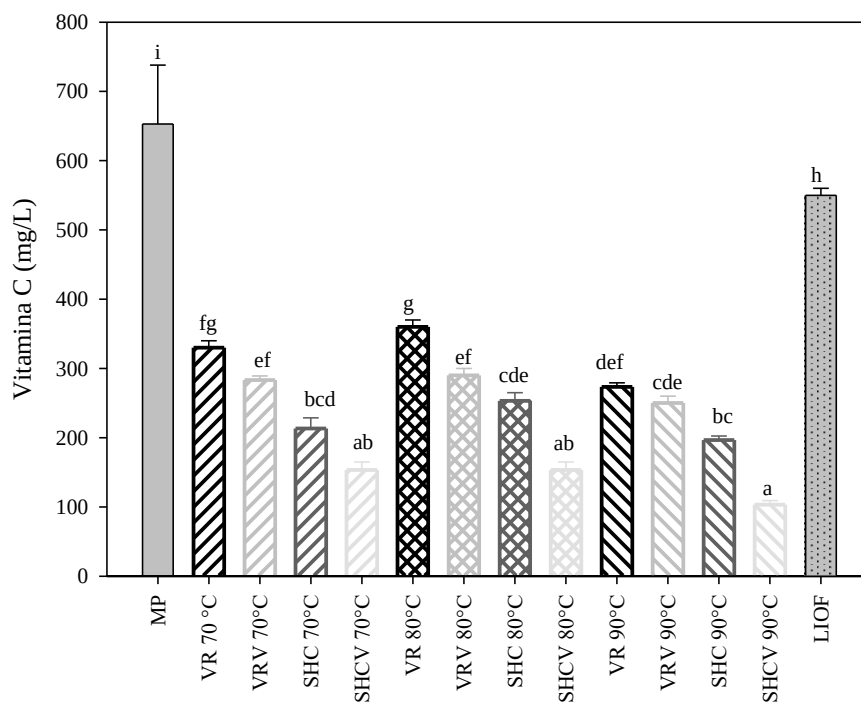


Figura 27. Contenido de vitamina C en láminas de kiwi obtenidas mediante los distintos procesos de secado

*Letras en superíndices distintas en la misma columna indican diferencias significativas ($P < 0.05$)

Garcia (2014) obtiene valores de Vitamina C para trozos de kiwi en un amplio rango reportando entre 637 y 1541 mg/L, Caliskan et al (2015) por otra parte, reporta un valor de $66,3 \pm 0,28$ mg de Vitamina C por 100 g de pulpa, equivalente a $663 \pm 2,8$ mg/L para pulpa fresca de kiwi. Mediante este procedimiento experimental se obtiene una cantidad de vitamina C para la materia prima de 653 ± 85 mg/L lo cual se acerca los valores mencionados.

Si bien todos los tratamientos de secado presentan una reducción significativa ($P < 0.05$) en el contenido de Vitamina C respecto a la materia prima, la deshidratación mediante liofilización presentó mayor eficiencia, obteniendo 550 ± 10 mg/L luego del proceso, correspondiente a un 84% de retención de Vitamina C. Estos resultados concuerdan con lo obtenido por Caliskan et al, (2015), quien reporta una pérdida del 17% tras deshidratar pulpa de kiwi mediante liofilización.

En los secados con vacío, no se aprecian diferencias significativas ($P < 0.05$) entre 70 y 80 °C, pero a 90 °C si disminuye la vitamina C, en cambio para los secados a presión atmosférica, 80°C se presentaría como la temperatura optima de trabajo. lo cual no concuerda con la mayoría de las investigaciones (Castañeda et al, 2010); (Canacuan et al, 2016); (Izli et al, 2017); (Muyonga et al, 2022) las cuales indican una disminución de la vitamina C en proporción directa al aumento de temperatura. No obstante, Galaz et al (2017), quienes secan cascara de granada mediante tambor rotatorio, demuestran que, al exponer alimentos a altas temperaturas durante cortos periodos de tiempo, se puede obtener condiciones de operación optimas que no afecten significativamente, e incluso mejoren, parámetros de calidad como la retención de polifenoles. La combinación de estas dos condiciones de operación (mayor temperatura y menor tiempo) podría explicar adecuadamente los resultados obtenidos en esta ocasión.

Al comparar cada uno de los métodos a la misma temperatura, la VR es la que entrega mejores resultados ($P < 0.05$), siendo capaz de retener hasta un 55% de la vitamina C a temperatura de trabajo de 80°C. Estos resultados concuerdan por los obtenidos por Nakagawa et al., (2021), quienes deshidrataron mediante aire caliente a 70°C, láminas de kiwi de 5mm de espesor y reportan una retención cercana al 60% de vitamina C luego del proceso de secado.

Tomando la VR como referencia, todas las modificaciones aplicadas reducen significativamente ($P < 0.05$) la cantidad de vitamina C presente en el producto. Solamente la aplicación de vacío (VRV) produce una reducción de 14 ± 5 % en la retención de la Vitamina C; el cambio del medio de soporte a cobre en vez de Mylar (SHC) disminuye la retención en un 31 ± 4 % y la combinación de ambas condiciones de operación (SHCV) disminuye la retención en un 58 ± 4 %.

La aplicación de vacío permite crear un medio anaeróbico; sin embargo, se requiere un espacio cerrado donde, al reducir la presión, también disminuye la temperatura de evaporación. Esto facilita que el agua dentro del alimento se difunda hacia la superficie con mayor rapidez, lo que provoca un ambiente saturando con vapor de agua. por ello, aunque el vacío evita la oxidación de la vitamina C por oxígeno, el entorno saturado favorecería la hidrólisis del compuesto, lo cual explicaría la significativa disminución de este.

También se observa una severa disminución del ácido ascórbico debido al uso de cobre como material de soporte, lo cual se atribuye a una auto oxidación del ascorbato, producto de una reacción catalizada por iones de metales de transición, en este caso Cu_2^+ , esto le otorga propiedades prooxidantes a la vitamina C, lo cual puede ser perjudicial para la salud. (Troncoso & Guija, 1998), Sin embargo, Troncoso & Guija, (1998) indican que esta reacción se puede inhibir en gran medida mediante la adición de histidina, la cual, es uno de los 20 aminoácido esenciales que forman las proteínas que necesitamos adquirir a través de los alimentos.

4.3 Análisis matemático de los coeficientes de difusión ($Deff$)

Según lo planteado en la sección Cinética de Secado, se calculó para cada una de las tecnologías el coeficiente de difusión $Deff$ mediante el modelo de difusión Anómalo y mediante ley de Fick. Los resultados se presentan en la Tabla 6 a continuación

Tabla 6. Coeficiente de difusión calculado mediante la segunda ley de Fick y el modelo de difusión Anómalo para cada método de secado

Método de secado	Temperatura (°C)	Modelo de Difusión Anómalo			Modelo de Fick	
		$Deff \cdot 10^{-9} \left(\frac{m^2}{s^\alpha} \right)$	α	R^2	$Deff \cdot 10^{-9} \left(\frac{m^2}{s^\alpha} \right)$	R^2
VR	70	$0,812 \pm 0,378^a$	$1,11 \pm 0,047^{cd}$	0,981	$1,90 \pm 0,165^a$	0,965
	80	$1,80 \pm 0,295^{ab}$	$1,04 \pm 0,009^{ab}$	0,984	$2,55 \pm 0,302^{ab}$	0,982
	90	$2,99 \pm 1,00^b$	$1,06 \pm 0,035^{bc}$	0,994	$4,55 \pm 0,224^{bc}$	0,991
VRV	70	$0,73 \pm 0,219^a$	$1,11 \pm 0,027^{cd}$	0,984	$1,33 \pm 1,01^a$	0,971
	80	$1,67 \pm 0,173^a$	$1,06 \pm 0,009^{bc}$	0,991	$2,65 \pm 0,088^{ab}$	0,988
	90	$5,89 \pm 1,66^d$	$0,99 \pm 0,030^a$	0,996	$5,29 \pm 0,221^c$	0,996
SHC	70	$1,57 \pm 0,627^a$	$1,08 \pm 0,047^{bcd}$	0,988	$2,86 \pm 0,069^{ab}$	0,981
	80	$1,92 \pm 0,145^{ab}$	$1,09 \pm 0,025^{bcd}$	0,983	$5,82 \pm 3,53^c$	0,976
	90	$4,52 \pm 0,797^c$	$1,04 \pm 0,037^{ab}$	0,992	$6,09 \pm 0,567^c$	0,995
SHCV	70	$0,912 \pm 0,362^a$	$1,13 \pm 0,049^d$	0,995	$2,42 \pm 0,155^a$	0,979
	80	$0,947 \pm 0,217^a$	$1,14 \pm 0,035^d$	0,985	$2,89 \pm 0,095^{ab}$	0,965
	90	$1,88 \pm 0,048^{ab}$	$1,12 \pm 0,005^{cd}$	0,980	$4,52 \pm 0,022^{bc}$	0,969

VR: Ventana refractiva; VRV: Ventana refractiva a vacío; SHC: Secado hidro-conductivo; SHCV: Secado hidro-conductivo a vacío

*Letras en superíndices distintas en la misma columna indican diferencias significativas ($P < 0.05$)

El exponente α en la difusión anómala (Ver Ecuación (4)) se relaciona con el tipo de fenómeno de difusión ($\alpha > 1$ para fenómeno de super-difusión, en el caso de $0 < \alpha < 1$ para fenómeno de sub-difusión y $\alpha = 1$ para difusión normal.). Por lo tanto, el exponente α está vinculado a la microestructura del material alimentario. En este contexto, la mayoría de los secados presentan valores significativamente diferentes de 1 ($P < 0.05$), obteniendo en su mayoría un valor de $\alpha > 1$, por ende, el proceso presentaría un comportamiento super-difusión, En cambio la VRV a 90°C, VR a 80°C, VRV80°C y SCH a 90°C no poseen diferencias significativas de 1 , por lo tanto, sería más cercano a una difusión Fickeana.

A partir de los R^2 , se observa un ajuste más preciso de la cinética de secado mediante el modelo de difusión anómala, pues los valores son más cercanos a 1. Este fenómeno podría deberse a que el modelo de Fick asume ciertos supuestos que no necesariamente se aplican al alimento estudiado, lo que resulta en una discrepancia entre de los resultados previstos por el modelo y los obtenidos experimentalmente. Ramírez et al. (2011) estudiaron el efecto de la microestructura en la velocidad cinética de secado, concluyendo que el modelo de Fick no es adecuado para describir todos los procesos de secado, pues el parámetro del modelo no considera los efectos de la microestructura del alimento durante el proceso de secado.

Dado el ajuste obtenido, a continuación, en la Figura 28 se presenta la comparación directa entre los $Deff$ obtenidos mediante el modelo anómalo.

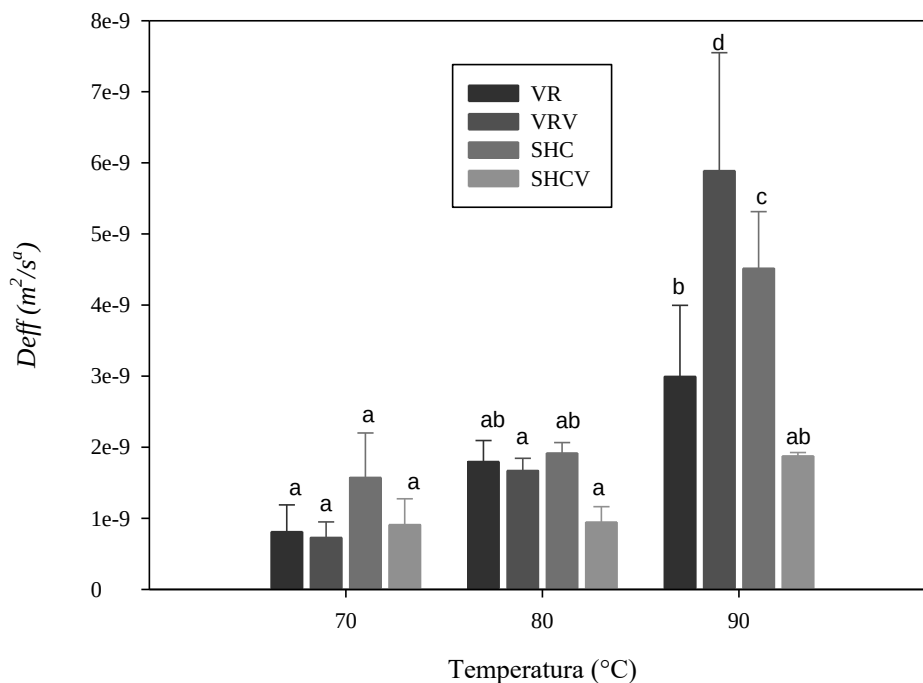


Figura 28. Comparación coeficientes de difusión calculados mediante el Modelo Anómalo para láminas de kiwi obtenidas mediante los distintos procesos de secado

*Letras en superíndices distintas en la misma columna indican diferencias significativas ($P < 0.05$)

A partir de la gráfica se obtiene que a 70°C y 80 °C no se aprecian diferencias significativas ($P < 0.05$) entre los secados. Sin embargo, a 80°C se observan los coeficientes de difusión ligeramente más altos a presión atmosférica. Esto se puede atribuir a los mecanismos de transferencia de calor que utiliza esta tecnología de secado (ver Figura 6), pues al aplicar vacío, se cierra el sistema, impidiendo la adecuada transferencia de calor por convección con el aire, lo cual se traduciría en un secado menos eficiente, por lo tanto un coeficiente de difusión menor.

A 90°C existe un significativo ($P < 0.05$) aumento en los valores de $Deff$ en los 4 métodos de secados, comparado con los resultados a 80 y 70 °C, siendo el mayor de estos el

obtenido mediante VRV a 90°C con un valor de $5,89 \pm 1,01 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}^a$. Zuñiga et al., (2022), quien tuvo resultados similares tras secar cascara de agraz mediante VR a las mismas condiciones de temperatura de este trabajo, concluye: “El incremento del *Deff* por aumento de la temperatura puede estar asociado a que las muestras, al secarse a mayor temperatura, se incrementa la energía de calentamiento y la actividad de las moléculas de agua permitiendo mayor difusión de la humedad”.

Finalmente, todos los valores obtenidos están dentro del rango general de $10^{-11} - 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}^a$ para el secado de alimentos, además, calculado mediante el modelo de Fick, Ergün et al, (2016) reportan un *Deff* de $7.302 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ tras someter láminas de kiwi a liofilización. Lo cual es esta dentro de lo mencionado anteriormente y es similar a lo obtenido en el presente trabajo.

V. Conclusiones y Recomendaciones

5 Conclusiones

En esta investigación, se concluye que, es factible el uso de placa de cobre como medio de soporte para el secado hidro-conductivo de kiwis, pues debido al alto coeficiente de conducción que posee el metal, los tiempos de proceso disminuyen significativamente respecto a las tecnologías que utilizan Mylar. Sin embargo, la retención de vitamina C y color se ve afectado por la modificación del medio de soporte.

La variación de temperatura influye directamente en la calidad del producto y eficiencia del proceso. A 90 °C se aprecia una mayor diferencia de color, menor retención de vitamina C y disminución de tiempos de secado comparado con los resultados a 70°C, sin embargo, a 80°C se presenta un menor cambio de color y se maximiza la retención de vitamina, por lo que se puede concluir que esta última es la temperatura óptima para deshidratar láminas de kiwi mediante cualquiera de los procesos evaluados.

El uso de vacío no implica una optimización a los procesos planteados, perjudicando especialmente la retención de vitamina C, atribuible al cambio de concentración de agua en el ambiente alrededor de la muestra, lo que favorece la hidrólisis de esta vitamina.

Comparando los procesos de secado, el liofilizado presenta un producto de mejor calidad, sin embargo, implica un mayor tiempo de operación, en cambio, el secado hidro-conductivo es más eficiente, ya que, si se deseara producir el alimento a nivel industrial, se obtiene un producto dentro de las especificaciones de deshidratado en un tiempo mucho menor.

Finalmente, de acuerdo con los tiempos de proceso, coeficientes de difusión, porcentaje de retención de vitamina C y cambio de color del producto, se concluye que las condiciones óptimas de operación para producir láminas de kiwi deshidratadas, es mediante la tecnología de Secado-hidro conductivo con cobre a 80 °C.

6 Recomendaciones

Dado el trabajo experimental y los resultados obtenidos en el presente trabajo, en caso de querer dar continuidad a esta investigación se recomienda:

Utilizar algún otro medio de soporte metálico, con coeficiente de conducción térmica similar al cobre, como el acero, pero verificar que no se produzcan reacciones indeseadas como pardeamiento o autooxidación de vitaminas a causa del contacto entre el metal y la fruta, ya que los parámetros de calidad relevantes disminuyen significativamente debido a lo mencionado.

En caso de continuar la investigación y mantener el cobre como medio de soporte, se recomienda impregnar el alimento con histidina, de esta manera se evita la autooxidación de la Vitamina C y se le agrega valor nutricional al producto.

La combinación de todas las modificaciones produce una reducción de los tiempos de secado, lo cual es mucho más significativa a bajas temperaturas, por ello se recomienda evaluar nuevamente los métodos de secado hidro-conductivo con y sin vacío, pero a 60, 70 y 80 °C

Con el fin de obtener un parámetro más a considerar para determinar el método de secado óptimo, también se sugiere comparar el gasto energético de los métodos de secado que utilizan el baño termostático, con el gasto energético que implica operar el liofilizador.

Pese a que en esta investigación no se obtuvieron los resultados esperados, la literatura existente indica que la vitamina C, se oxida en presencia de oxígeno, por lo tanto la condición de vacío debería mejorar la retención de esta vitamina, por ende se recomienda continuar con la investigación, disminuyendo aún más las presiones de operación de los tratamientos de secado, de manera que la succión también sea capaz de extraer la humedad presente en el interior del equipo, evitando la hidrólisis del Ácido Ascórbico.

VI. Referencias

7 Referencias

- Asiimwe, A., Kigozi, J., Baidhe, E., & Muyonga, J. (2022). Optimization of refractance window drying conditions for passion fruit. *LWT*, 154. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112742>
- Balderrabano-Ayala, L., Castillo, A., & Huelsz, G. (2022). PET de desechos en sistemas constructivos para muros. *SusBCity*, 4(1). <https://revistas.up.ac.pa/index.php/SusBCity/article/view/2735/2459>
- Berk, Z. (2013). Freeze Drying (Lyophilization) and Freeze Concentration. *Food Process Engineering And Technology*, 567-581.
- Caliskan, G., Ergun, K., & Dirim, S. N. (2015). Freeze Drying oh Kiwi (ACTINIDIA DELICIOSA) Puree and the Power Properties. *Italian Journal of Food Science*, 27(3). <https://doi.org/https://doi.org/10.14674/1120-1770/ijfs.v282>
- Calvo, M. (s.f.). *Acido Ascorbico*. <https://doi.org/http://milksci.unizar.es/bioquimica/temas/vitamins/ascorbico.html#:~:text=El%20ácido%20ascórbico%20es%20particularmente,que%20la%20forma%20no%20ionizada.>
- Canacuan, H. G., Murillo, B. L., & Santos, L. E. (2016). Efectos de los tratamientos térmicos en la concentración de vitamina C y color superficial en tres frutas tropicales. *Lasallista de Investigacion*, 13(1), 85-93.
- Cardona Serrate, F. (30 de 06 de 2020). Alteraciones enzimáticas en alimentos: el pardeamiento, el enranciamiento y la reacción de Maillard. *Articulo Docente con objeto de aprendizaje*. España: Universitat Politècnica de València. <http://hdl.handle.net/10251/147166>
- Castañeda, J., Arteaga, H., Siche, R., & Rodriguez, G. (2010). Estudio comparativo de la pérdida de vitamina C en chalarina. *Scientia Agropecuaria*, 1(1), 75 - 80. <https://www.redalyc.org/pdf/3576/357633694007.pdf>
- Castillo-Velarde, E. (2019). Vitamina C en la salud y en la enfermedad. *Revista de la Facultad de Medicina Humana*, 18(4). <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.25176/RFMH.v19i4.2351>
- Cengel, Y. (2007). Conducción. En Y. Cengel, *Transferencia de calor y masa. Un enfoque práctico* (pág. 20). McGraw-Hill interamericana.
- Cengel, Y. (2007). Introduccion y Conceptos Basicos: Conduccion. En Y. Cengel, *Transferencia de calor y masa. Un enfoque práctico* (págs. 17-25). The McGraw-Hill Companies, Inc.
- Comite del kiwi de Chile. (2020). *Salud y Bienestar*. Comite del kiwi de Chile: <https://www.comitedelkiwi.cl/kiwisdechile/>
- Elhadi, M. (2009). ¿Es necesario producir mas frutas y verduras en el mundo? *Horticultura Internacional*, 3.

- Elitin, J. (2022). Evaluación de tecnologías de secado para la maximización de los compuestos antioxidantes en jugo de granada en polvo. *Trabajo de Titulo*. Valparaiso: Universidad Tecnica Federico Santa Maria.
- Erbay, & Icier. (2010). A Review of Thin Layer Drying of Foods: Theory, Modeling, and. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 50(5), 441-464. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/10408390802437063>
- Ergün, K., Çalışkan, G., & Nur Dirim, S. (2016). Determination of the drying and rehydration kinetics of freeze dried kiwi (*Actinidia deliciosa*) slices. *Heat Mass Transfer*, 52, 2697–2705. <https://doi.org/10.1007/s00231-016-1773-x>
- Fang, Z. (TRABAJO FIN DE GRADO de 2017). Trabajo fin de grado. *Métodos analíticos para la determinación de vitamina C en alimentos*. Facultad de farmacia Universidad Complutense. <http://147.96.70.122/Web/TFG/TFG/Memoria/ZHONGWEI%20FANG.pdf>
- FIA-Ministerio de Agricultura. (2019). *estudio estrategia de desarrollo e innovación para la industria de deshidratados en Chile frutas, hortalizas y hongos*. https://bibliotecadigital.fia.cl/bitstream/handle/20.500.11944/146938/Estudio_Deshidratados.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Franco, S., Jaques, A., Pinto, M., Fardella, M., Valencia, P., Núñez, H., Ramírez, C., & Simpson, R. (2019). Dehydration of salmon (Atlantic salmon), beef, and apple (Granny Smith) using Refractance window™: Effect on diffusion behavior, texture, and color changes. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*(52), 8-16.
- Fruits From Chile. (s.f.). *Kiwifruit*. Fruits From Chile: <https://fruitsfromchile.com/fruit/kiwifruit/>
- Galaz, P., Valdenegro, M., Ramirez, C., Nuñez, C., Almonacid, S., & Simposon, R. (2017). Effect of drum drying temperature on drying kinetic and polyphenol contents in pomegranate peel. *Journal of Food Engineering*, 208, 19-27. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.04.002>
- Garcia, M. (2014). *Influencia del tiempo de almacenamiento y del sistema de cultivo sobre las características físico-químicas y sensoriales del kiwi en fresco y en almíbar*.
- INS. (Abril de 2018). Semana de las Frutas y Verduras: ¿Por qué es importante consumir estos alimentos? <https://web.ins.gob.pe/es/prensa/noticia/semana-de-las-frutas-y-verduras-por-que-es-importante-consumir-estos-alimentos#:~:text=Su%20ingesta%20al%20día%20aporta,prevención%20de%20enfermedades%20indicaron.>
- Izli, N., Izli, G., & Taskin, O. (2017). Drying kinetics, colour, total phenolic content and antioxidant capacity properties of kiwi dried by different methods. *Food Measurement and Characterization*, 11, 64–74. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11694-016-9372-6>

- López-Sobaler, A. M., Vizuete, A. A., & Anta, y. R. (2016). Beneficios nutricionales y sanitarios asociados al consumo de kiwi. *Nutrición Hospitalaria*, 33(4). <https://doi.org/https://dx.doi.org/10.20960/nh.340>
- Mahanti, N. K., Chakraborty, S. K., Sudhakar, A., Verma, D. K., Shankar, S., & Thakur, M. (2021). Refractance Window™-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. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fufo.2021.100024>
- Maldonado, Y., & Valverde, A. (2022). *Cinética de degradación de vitamina C en pulpa de guanábana (Annona muricata), en diferentes tipos de empaques, en refrigeración y congelación.*
- Mano, J. (2003). Propiedades Termicas de los polimeros en la enseñanza de la ciencia de materiales e ingeniería- Estudio DSC sobre poly (Tereftalato de etileno). *Journal of materials education*, 25(4-6), 155-170.
- Mayo Clinic. (Julio de 2021). *Vitamina C*. Mayo clinic.org: <https://www.mayoclinic.org/es-es/drugs-supplements-vitamin-c/art-20363932>
- Mordor Intelligence. (2022). *Mercado del kiwi: Crecimiento, Tendencias y pronósticos*. Mordor Intelligence.: <https://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/kiwi-fruit-market#:~:text=Nueva%20Zelanda%20es%20el%20principal,de%20kiwi%20de%20Nueva%20Zelanda>.
- Mujumdar, A. (2014). Making of the Handbook of Industrial Drying. *Drying Technology*, 4, 627-628. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/07373937.2013.822648>
- Muyonga, J., Baidhe, E., Kigozi, J., & Asimwe, A. (2022). Optimization of refractance window drying conditions for passion fruit puree. *LWT*, 154(15). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112742>
- Nakagawa, K., Horie, A., Nakabayashi, M., Nishimura, K., & Yasunobu, T. (Diciembre de 2021). Influence of processing conditions of atmospheric freeze-drying/low-temperature drying on the drying kinetics of sliced fruits and their vitamin C retention. *Journal of Agriculture and Food Research*, 6. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jafr.2021.100231>
- Nindo, C., & Tang., & J. (2007). Refractance Window Dehydration Technology: A Novel Contact Drying Method. *Drying Technology*, 37-48.
- Ortiz, M. J., Gulati, T., Datta, A. K., & Martínez, C. I. (2015). Quantitative understanding of Refractance Window™ drying. *Food and Bioproducts Processing*, 237–253. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fbp.2015.05.010>
- Perez, F. (2013). *Estudio de la calidad física, fisicoquímica y sensorial de productos de kiwi obtenidos mediante métodos combinados de secado.*

<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/34611/TFMKIWI.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Ramirez, C., Tromcoso, E., Muñoz, J., & Aguilera, M. (2011). Microstructure analysis on pretreated apple slices and its effect on water release during air drying. *Journal of Food Engineering*, 106(3), 253-261. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.05.027>
- Ramirez, J. (2006). Liofilización de alimentos. *Revista ReCiTeIA*.
- Sabarez, H. (2021). Advanced Drying Technologies of Relevance in the Food Industry. *Innovative Food Processing Technologies*, 64-81. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.23042-4>
- Simpson, R., Ramírez, C., Birchmeier, V., Almonacid, A., Moreno, J., Nuñez, H., & Jaques, A. (2015). Diffusion mechanisms during the osmotic dehydration of Granny Smith apples. *Journal of Food Engineering*, 166, 204-211. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.05.027>
- Subhanki, P., & Dwivedi, M. (2022). Physico-chemical, structural, functional and powder flow properties of unripe green banana flour after the application of Refractance window drying. *Future Foods*(100101).
- Troncoso, L., & Guija, E. (1998). Cinética de Autooxidación del Ascorbato por Iones Cúpricos. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. https://sisbib.unmsm.edu.pe/bvrevistas/anales/v59_n2/ascorbato.htm#1
- Uribe, E., Gómez-Pérez, L., Pasten, A., Pardo, C., Puente, L., & Vega-Galvez, A. (2022). Assessment of refractive window drying of physalis (*Physalis peruviana* L.) puree at different temperatures: drying kinetic prediction and retention of bioactive components. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 16, 2605–2615.
- Valero, J. T., Benlloch-Tinoco, M., García-Martínez, E., & Martínez-Navarrete, N. (2014). optimización de un proceso de secado combinado para obtener kiwi en polvo de alta calidad. En C. i. alimentos, *Libro de actas* (págs. 52-58).
- Villagran, m., Muñoz, M., Diaz, F., Trancoso, C., Carlos, C.-M., & Msrdones, L. (2019). Una mirada actual de la vitamina C en salud y enfermedad. *Revista chilena de nutrición*, 46(6), 0717-7518. <https://doi.org/10.4067/S0717-75182019000600800>
- Wang, B.-B., Sun, P.-Y., Chen, B.-L., Sajjad, U., & Yan, W.-M. (2022). Influence of the process parameters on the energy conservation and quality of the kiwi fruit subjected to vacuum freeze-drying. *Case Studies in Thermal Engineering*, 33. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.101935>
- Wu, L., Orikasa, T., Ogawa, Y., & Tagawa, A. (2008). Vacuum drying characteristics of eggplants. *Journal of Food Engineering*, 83(3), 422–429. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.03.030>

- Zhou, X., Li, R., Lyng, J. G., & Wang, S. (2018). Dielectric properties of kiwifruit associated with a combined radio frequency vacuum and osmotic drying. *Journal of Food Engineering*, 239, 72-82. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.07.006>
- Zuñiga, Y., Angulo, O., Chaux-Gutiérrez, A., & Ayala-Aponte, A. (2022). *Secado de cascara de agraz (Vaccinium meridionale Swartz) por ventana refractiva: Evaluacion de propiedades fisicoquimicas.*

VII. Anexos

8 Anexos

8.1 Anexo 1: Ejemplo de cálculo agua a adicionar en muestra de kiwi seco para medición de vitamina C

Datos	Valor
Masa de fruta seca (Mf)	15 g
Humedad Promedio final de la fruta seca en base húmeda (Hf)	0,05 g de agua/g de producto
Humedad Materia Prima en base seca (H0)	4,5 g de agua/g de solido seco

Para obtener la cantidad de agua a adicionar primero es necesario obtener la masa de solidos secos de la muestra, para ello:

$$\text{solido seco (ss)} = M_f - (M_f * H_f) = 15 - (15 * 0,05) = 14,25 \text{ gr}$$

Ahora para calcular la cantidad de agua a adicionar:

$$\text{Agua a adicionar} = (ss * H_0) - (M_f - ss) = (14,25 * 4,5) - (15 - 14,25) = 63,38 \text{ gr}$$

8.2 Anexo 2: Datos experimentales Actividad de Agua

Temperatura (°C)	Método	AW
Ambiente	MP	0,954 ± 0,007
	VR	0,375 ± 0,028
	VRV	0,346 ± 0,029
	SHC	0,363 ± 0,020
	SHCV	0,363 ± 0,014
70 °C	VR	0,355 ± 0,017
	VRV	0,363 ± 0,008
	SHC	0,345 ± 0,005
	SHCV	0,342 ± 0,007
80 °C	VR	0,327 ± 0,013
	VRV	0,363 ± 0,020
	SHC	0,341 ± 0,001
	SHCV	0,370 ± 0,015
90 °C	Liof	0,276 ± 0,034

8.3 Anexo 3: Tiempo de Secado

Temperatura (°C)	Método de secado	Tiempo (min)
Ambiente	MP	-
70 °C	VR	130
	VRV	110

80 °C	SHC	80
	SHCV	100
	VR	80
	VRV	80
	SHC	60
90 °C	SHCV	70
	VR	50
	VRV	50
	SHC	40
30 °C	SHCV	50
	Liof	1440

8.4 Anexo 4: Datos experimentales medición de Vitamina C

Temperatura (°C)	Método	Cantidad de Gotas de Reactivo			Vitamina C (mg/L)		
Ambiente	MP	65,3	±	8,5	653	±	85
70 °C	VR	33,0	±	1,0	330	±	10
	VRV	28,3	±	0,6	283	±	6
	SHC	21,3	±	1,5	213	±	15
	SHCV	15,3	±	1,2	153	±	12
	VR	36,0	±	1,0	360	±	10
80 °C	VRV	29,0	±	1,0	290	±	10
	SHC	25,3	±	1,2	253	±	12
	SHCV	15,3	±	1,2	153	±	12
	VR	27,3	±	0,6	273	±	6
90 °C	VRV	25,0	±	1,0	250	±	10
	SHC	19,7	±	0,6	197	±	6
	SHCV	10,3	±	0,6	103	±	6
	VR	27,3	±	0,6	273	±	6
30 °C	Liof	55,0	±	1,0	550	±	10

8.5 Anexo 5: Resultados Diferencia de Color

Método de secado	Temperatura (°C)	Delta E		
VR	70	22,62	±	2,33
	80	18,70	±	1,65
	90	22,94	±	2,52
VRV	70	21,58	±	0,82

	80	20,93	±	0,86
	90	25,80	±	0,63
SHC	70	19,32	±	0,14
	80	19,12	±	0,77
	90	25,00	±	0,87
SHCV	70	23,35	±	0,20
	80	19,07	±	1,30
	90	23,18	±	2,55