



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

# **“Desarrollo de un snack de manzana enriquecido con jugo de granada mediante la impregnación a vacío y aplicación de perforación laser”**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE: INGENIERO CIVIL QUÍMICO**  
Maria Jose Urzua Miranda

Profesor Guía: Dr. Ricardo Simpson Rivera  
Profesor Correferente: Dr. Cristian Ramírez Bustos  
Profesor Correferente: MCs. Helena Núñez Andrade

2019

## Resumen

La deshidratación es una manera fácil y segura de preservar los alimentos en el mundo de la alimentación. Un snack saludable de fruta deshidratada muchas veces pierde propiedades durante el proceso, que se puede mejorar mediante soluciones de impregnación que posean un alto contenido de antioxidantes, que aporten de manera positiva a la salud. Por otra parte, la micro perforación láser de CO<sub>2</sub> se estudia, para acelerar el proceso de transferencia de masa durante la deshidratación de distintos tipos de frutas y vegetales, además de otras aplicaciones. El objetivo de esta investigación es desarrollar un snack de manzana con impregnación de jugo de granda a vacío y aplicación de perforación laser. Para el desarrollo, se aplicó la técnica de vacío por 5 minutos y 0,5 bar, con impregnación de jugo de granada AFE 100% natural, en rodajas de manzana de tipo Granny Smith (4 mm de espesor y 40 mm de diámetro). Las rodajas fueron deshidratadas a través de 3 métodos: Estufa (ES), ventana refractiva (VR) y liofilizador (LI), la cual se presenta en tres condiciones diferentes; fruta sin tratamiento (FF), impregnada (FI), y perforada e impregnada (FPI). Estufa y ventana refractiva ocupan una temperatura de 75 °C hasta obtener una actividad de agua (aw) inferior a 0,4. En ambos casos, los modelos matemáticos utilizados para la cinética de secado son descritos por la 2° Ley de Fick y modelo de difusión anómala. En cuanto al liofilizador de alimentos, el equipo mantiene su proceso por 8 horas a una temperatura de plato de 25°C y 0,3 mbar de vacío. Por otra parte, para la micro perforación laser de CO<sub>2</sub> se caracteriza un tamaño de poro de  $148 \pm 16,5 \mu\text{m}$  de radio.

Como resultado, el modelo de difusión anómala es el mejor ajuste a los datos experimentales, en tanto al coeficiente de difusión, para las muestras con tratamiento previo (FI y FPI) no presenta diferencias significativas y obtienen un orden de magnitud de  $10^{-12}$ . La calidad del producto deshidratado en las 3 tecnologías de secado, conservan de igual forma las propiedades bioactivas del alimento y no existen diferencias significativas entre tratamiento con y sin perforación. Respecto a la liofilización de alimentos, el equipo logra conservar el aspecto, color y forma, con los valores más bajos de aw ( $0,197 \pm 0,05$ ) y humedad ( $2,53 \pm 0,30\%$ ). Sin embargo, el costo de energía y tiempo asociado son una desventaja. En cuanto a la estufa se obtiene una humedad de  $11,19 \pm 2,48\%$  y para VR  $7,09 \pm 0,59\%$  en 110 minutos de secado, ambos con aw inferior a 0,4. El análisis final indica que el método más efectivo para deshidratar es VR, para un tiempo de proceso de 110 minutos. La muestra impregnada (FI) es la mejor condición para aumentar la calidad del snack desarrollado en VR, con un aumento de polifenoles totales de 31% y capacidad antioxidante de 46%. En cuanto a la microperforación laser esta no presenta cambios significativos para la cinética de secado en los equipos de VR y ES.

## Agradecimientos

Quiero agradecer en primer lugar a los profesores, Ricardo Simpson, Helena Núñez y Cristian Ramírez por entregarme la oportunidad de trabajar en esta investigación, darle las gracias por la enorme disposición, ayuda y tiempo que me brindaron durante todo el proceso.

Agradecer también a mi querida familia que ha estado presente, brindándome cariño y apoyo en cada decisión a lo largo de todas las etapas de mi vida. Además, agradecer a mis amigas de universidad que estuvieron junto a mí en todos los momentos difíciles.

También quiero agradecer por el cariño, acogida, amistad y palabras de ánimo que me entregaron mis compañeras de residencia, donde me llevo los mejores recuerdos de mis últimos tres años de formación académica.

Finalmente, quiero agradecer al proyecto FONDECYT N°1160761 por el financiamiento otorgado para el desarrollo de esta investigación.

## Tabla de Contenido

|   |    |
|---|----|
| Resumen.....  | 2  |
| Agradecimientos.....  | 3  |
| Tabla de Contenido .....  | 4  |
| Índice de Tablas.....   | 6  |
| Índice de Figuras.....  | 7  |
| 1. Introducción.....  | 8  |
| 2. Objetivos .....  | 9  |
| 2.1. Objetivo general .....   | 9  |
| 2.2. Objetivo específico .....  | 9  |
| 3. Antecedentes Generales.....  | 10 |
| 3.1. Historia y propiedades nutricionales de la manzana .....         | 10 |
| 3.2. Manzana deshidratada en Chile y sus exportaciones.....           | 12 |
| 3.3. Deshidratación de alimentos.....                                 | 13 |
| 3.3.1. Actividad de agua y humedad.....                               | 14 |
| 3.3.2. Mecanismos de secado .....                                     | 16 |
| a) Secado Convencional .....  | 17 |
| b) Secado por Ventana Refractiva .....                                | 17 |
| c) Secado por Liofilizador .....                                      | 18 |
| 3.3.3. Mecanismos de difusión.....                                    | 20 |
| 3.4. Enriquecimientos de matrices alimentarias.....                   | 23 |
| 3.4.1. Impregnación con compuestos fenólicos.....                     | 25 |
| 3.4.2. Compuestos fenólicos de la granada y sus beneficios .....      | 26 |
| 3.4.3. Teoría del método para determinar compuestos fenólicos .....   | 27 |
| 3.4.4. Teoría del método para determinar actividad antioxidante ..... | 28 |
| 3.5. Aplicación de Perforación Láser en productos alimenticios .....  | 30 |
| 4. Materiales y Métodos .....   | 31 |
| 4.1. Materia Prima y preparación de la muestra .....                  | 31 |
| 4.2. Solución y método de impregnación a vacío.....                   | 32 |
| 4.3. Equipo de micro perforación Láser de CO <sub>2</sub> .....       | 33 |

|        |   |    |
|--------|---|----|
| 4.4.   | Equipos para deshidratación .....   | 35 |
| 4.4.1. | Secado Convencional .....   | 35 |
| 4.4.2. | Ventana Refractiva .....  | 35 |
| 4.4.3. | Liofilizador .....  | 36 |
| 4.5.   | Determinación de tiempo de secado .....                                   | 37 |
| 4.6.   | Determinación de actividad de agua y humedad.....                         | 38 |
| 4.6.1. | Actividad de agua .....   | 38 |
| 4.6.2. | Contenido de Humedad .....  | 38 |
| 4.7.   | Determinación de polifenoles totales .....                                | 39 |
| 4.7.1. | Preparación de la muestra y curva patrón de ácido gálico .....            | 39 |
| 4.8.   | Determinación de capacidad antioxidante .....                             | 40 |
| 4.8.1. | Preparación de la muestra y curva patrón de Trolox.....                   | 40 |
| 4.9.   | Diseño de Experimentos.....   | 42 |
| 4.10.  | Determinación de coeficiente difusivo.....                                | 44 |
| 4.11.  | Análisis estadístico.....   | 44 |
| 5.     | Resultados y Discusión.....   | 45 |
| 5.1.   | Cinética de secado en ventana refractiva .....                            | 45 |
| 5.2.   | Cinética de secado en estufa .....  | 46 |
| 5.3.   | Comparación de cinética de secado entre estufa y ventana refractiva ..... | 48 |
| 5.4.   | Tamaño de perforaciones.....  | 50 |
| 5.5.   | Propiedades jugo de granada .....   | 51 |
| 5.6.   | Contenido de polifenoles totales .....                                    | 51 |
| 5.7.   | Capacidad antioxidante .....  | 54 |
| 5.8.   | Coeficiente de difusión para ventana refractiva y estufa .....            | 56 |
| 5.9.   | Aspecto de la fruta impregnada y deshidratada .....                       | 58 |
| 6.     | Conclusiones .....  | 60 |
|        | Referencias .....   | 61 |
|        | Anexos .....  | 65 |

## Índice de Tablas

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1: Actividad de agua mínimo reportado para la germinación y crecimiento de levaduras y mohos.....                   | 16 |
| Tabla 2: Parámetros de micro perforaciones laser.....   | 34 |
| Tabla 3: Replicas realizadas para los diferentes experimentos.....  | 43 |
| Tabla 4: Propiedades Jugo de granada AFE.....   | 51 |
| Tabla 5: Resultados de coeficiente de difusión para modelo de la 2ª Ley de Fick en VR y estufa.<br>.....                  | 56 |
| Tabla 6: Resultados de coeficiente de difusión para modelo de difusión anómala en VR y estufa.<br>.....                   | 56 |
| Tabla 7: Preparación de la curva patrón de ácido gálico a partir de una disolución concentrada de 0,2 mg/ml.....          | 65 |
| Tabla 8: Preparación de la curva patrón de equivalente de Trolox a partir de una disolución concentrada de 1 mM.....      | 66 |
| Tabla 9: Tamaño de perforación laser.....   | 67 |
| Tabla 10: Datos de masa en el tiempo para manzana sin tratamiento y seca en VR.....                                       | 68 |
| Tabla 11: Datos de masa en el tiempo para manzana con tratamiento de impregnación y seca en VR.....                       | 68 |
| Tabla 12: Datos de masa en el tiempo para manzana con tratamiento de micro perforación e impregnación seca en VR.....     | 68 |
| Tabla 13: Datos de masa en el tiempo para manzana sin tratamiento y seca en estufa.....                                   | 69 |
| Tabla 14: Datos de masa en el tiempo para manzana con tratamiento de impregnación y seca en estufa.....                   | 69 |
| Tabla 15: Datos de masa en el tiempo para manzana con tratamiento de micro perforación e impregnación seca en estufa..... | 69 |
| Tabla 16: Propiedades de la manzana fresca.....   | 73 |
| Tabla 17: Propiedades de la manzana deshidratada en Ventana Refractiva a 75°C.....  | 73 |
| Tabla 18: Propiedades de la manzana deshidratada en estufa a 75°C.....  | 73 |
| Tabla 19: Propiedades de la manzana deshidratada en Liofilizador de alimentos.....  | 74 |

## Índice de Figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 1: Representación esquemática de los componentes más notables de una fruta.....   | 11 |
| Figura 2: Representación de Manzana deshidratada. ....   | 12 |
| Figura 3: Manzana deshidratada exportada por Chile.....  | 13 |
| Figura 4: Esquema de las fases alimento-fluido donde se produce el transporte de agua durante la deshidratación debido a un gradiente de $a_w$ ..... | 14 |
| Figura 5: Representación del agua ligada y libre. ....   | 15 |
| Figura 6: Disposición esquemática del secador por ventana refractante. ....  | 18 |
| Figura 7: Mecanismos de transporte durante la impregnación a vacío. ....   | 24 |
| Figura 8: Mecanismo de acción del reactivo de Folin-Ciocalteu.....   | 28 |
| Figura 9: Estructura molecular con y sin radical libre. ....   | 29 |
| Figura 10: Elementos y proceso para obtener discos de manzana.....   | 31 |
| Figura 11: Desecador con muestras impregnadas a vacío en su interior. ....   | 32 |
| Figura 12: Laser de $CO_2$ . ....  | 33 |
| Figura 13: Configuración panel. ....   | 33 |
| Figura 14: Micro perforación láser de $CO_2$ en muestra de manzana.....  | 34 |
| Figura 15: Sistema de secado por ventana refractiva.....   | 36 |
| Figura 16: Liofilizador Christ, Alpha 2-4 LSCPlus. ....  | 37 |
| Figura 17: Diagrama de Bloques para diseño experimental. ....  | 42 |
| Figura 18: Cinética de secado en ventana refractiva a $75^\circ C$ . ....  | 45 |
| Figura 19: Cinética de secado en estufa a $75^\circ C$ . ....  | 47 |
| Figura 20: Cinética de secado para fruta sin tratamiento en ventana refractiva y estufa. ....  | 48 |
| Figura 21: Cinética de secado para fruta con impregnación en ventana refractiva y estufa. ....   | 49 |
| Figura 22: Cinética de secado para fruta con perforación e impregnación en ventana refractiva y estufa.....  | 50 |
| Figura 23: Contenido de polifenoles totales para todas las condiciones de fruta deshidratada y fresca. ....  | 52 |
| Figura 24: Capacidad Antioxidante para todas las condiciones de fruta deshidratada y fresca. .   | 54 |
| Figura 25: Fotografías del aspecto inicial de la manzana.....  | 58 |
| Figura 26: Fotografías del aspecto final de la fruta deshidratada. ....  | 58 |
| Figura 27: Decoloración de mayor a menor concentración para curva patrón de ácido gálico...65  | 65 |
| Figura 28: Curva patrón Equivalente de Ácido Gálico.....   | 65 |
| Figura 29: Decoloración de mayor a menor concentración para curva patrón de Trolox.....66  | 66 |
| Figura 30: Curva patrón Equivalente de Trolox.....   | 66 |
| Figura 31: Ajuste de cinética para fruta sin tratamiento seca en VR a $75^\circ C$ .....   | 70 |
| Figura 32: Ajuste de cinética para fruta impregnada seca en VR a $75^\circ C$ . ....   | 70 |
| Figura 33: Ajuste de cinética para fruta perforada e impregnada seca en VR a $75^\circ C$ . ....   | 71 |
| Figura 34: Ajuste de cinética para fruta sin tratamiento seca en estufa a $75^\circ C$ . ....  | 71 |
| Figura 35: Ajuste de cinética para fruta impregnada seca en estufa a $75^\circ C$ . ....   | 72 |
| Figura 36: Ajuste de cinética para fruta perforada e impregnada seca en estufa a $75^\circ C$ . ....   | 72 |

## 1. Introducción

La deshidratación es uno de los métodos más antiguos de conservación de alimentos, es un proceso aplicado principalmente con el propósito de extender la vida útil del producto, a través de una reducción, en el contenido de agua a un nivel lo suficientemente bajo para inhibir las reacciones de deterioro, es la técnica más común y rentable para la producción de productos tradicionales e innovadores (Rosenthal, Deliza, Welti Chanes, & Barbosa Cánovas, 2018). Actualmente, es importante incorporar productos funcionales que afecten de manera positiva a la dieta saludable que hoy en día se le da tanto énfasis, productos como snacks de fruta deshidratada los cuales poseen un alto contenido de antioxidantes, fibra y vitaminas. Cabe señalar, que el alimento durante el proceso térmico pierde propiedades que se desean maximizar, para obtener un producto con el más alto nivel que exige actualmente el mercado.

El enriquecimiento de alimentos es un proceso diseñado para incorporar compuestos en una matriz alimentaria, el cual entrega la posibilidad de mejorar la calidad nutricional del producto. En comparación con la impregnación atmosférica, la aplicación de vacío permite una incorporación más rápida y controlada de solutos en la matriz, lo que se utiliza como tratamiento previo al secado o la congelación de los productos finales, se pueden incorporar diferentes ingredientes en la estructura porosa de los alimentos para generar cambios en la composición y así obtener características funcionales mejoradas, además este tratamiento previo, permite cambiar el sabor a los productos tratados dependiendo de la solución a impregnar (Rosenthal, Deliza, Welti Chanes, & Barbosa Cánovas, 2018).

La granada contiene: flavonoides, pigmentos vegetales responsables del color rojizo de sus granos, de acción antioxidante y antiséptica, dichos componentes tienen la capacidad de captar radicales libres nocivos para el organismo. Según un estudio en la Universidad de Chapman (Estados Unidos) llegaron a la conclusión de que el consumo de granada contribuye a reducir el riesgo de enfermedades degenerativas, cardiovasculares y de cáncer (Gomez, Shackelford,

Tocchi, & Rowland-Goldsmith, 2014). Por esta razón el jugo de granada es una solución atractiva para pretratamientos de impregnación, rica en polifenoles que permite maximizar las propiedades funcionales de un producto alimenticio.

La micro perforación laser de CO<sub>2</sub>, es una tecnología utilizada anteriormente para mejorar el proceso de secado osmótico de arándanos, que concluye en, una mejor eficiencia del proceso y calidad final del producto (Fujimaru, Ling, & Morrissey, 2012). Por otro lado, se ha utilizado el láser de CO<sub>2</sub> para grabar la identificación del producto en la superficie del aguante, opción viable para identificar los productos con una etiqueta permanente (Sood P, 2009). Sin embargo, se requiere potenciar métodos que reduzcan en lo posible, los tiempos de secado y en consecuencia la energía que ocupan las tecnologías para deshidratación.

## 2. Objetivos

### 2.1. Objetivo general

Desarrollar un snack de manzana enriquecido con jugo de granada mediante la impregnación a vacío y aplicación de perforación laser.

### 2.2. Objetivo específico

- ✓ Determinar el tiempo que requiere el alimento para llegar a una actividad de agua inferior a 0,4.
- ✓ Determinar el coeficiente de difusión y modelar matemáticamente los datos experimentales.
- ✓ Estudiar el efecto que produce la micro perforación laser en la deshidratación del alimento.
- ✓ Determinar las propiedades del alimento fresco y deshidratado; polifenoles totales, capacidad antioxidante, humedad y actividad de agua.

## 3. Antecedentes Generales

### 3.1. Historia y propiedades nutricionales de la manzana

La manzana es el fruto del manzano, árbol de la familia Rosáceas, familia que incluye más de 2.000 especies de plantas herbáceas, arbustos y árboles distribuidos por regiones templadas de todo el mundo. El cultivo de la manzana es tan antiguo como la humanidad, siendo el manzano el árbol frutal más cultivado a nivel mundial (Eroski Consumer, 2019).

La manzana de tipo Granny Smith procede de Australia, su piel es de color verde intenso con algunos puntos blancos, redonda de carne blanca, crujiente y jugosa con sabor ligeramente ácido. Un 85% de su composición es agua, por lo que resulta muy refrescante e hidratante. Las manzanas poseen vitaminas C y E, minerales como el calcio, hierro, magnesio, nitrógeno, fósforo, potasio y fibra soluble, llamada pectina. Además, contienen aminoácidos y ácidos como el glutamínico, el málico o el oleico. Es una fruta muy diurética y previene enfermedades del corazón, así como el envejecimiento prematuro (Eroski Consumer, 2019).

Una de las propiedades más importantes de la manzana es la capacidad antioxidante, esta se debe a los elementos fitoquímicos que contiene más abundantes en la piel, en concreto, polifenoles (Quercitina, Flavonas y flavonoides) (Amarowicz, et al., 2008). Los polifenoles se encargan de neutralizan los radicales libres, reduciendo o incluso evitando parte de los daños que estos provocan en el organismo. Es por esta razón que su composición en sustancias antioxidantes está especialmente recomendada en dietas de prevención de riesgo cardiovascular, enfermedades degenerativas y cáncer (Rodríguez, 2019). La Figura 1 muestra una representación esquemática de los componentes más característicos de una fruta como la manzana.

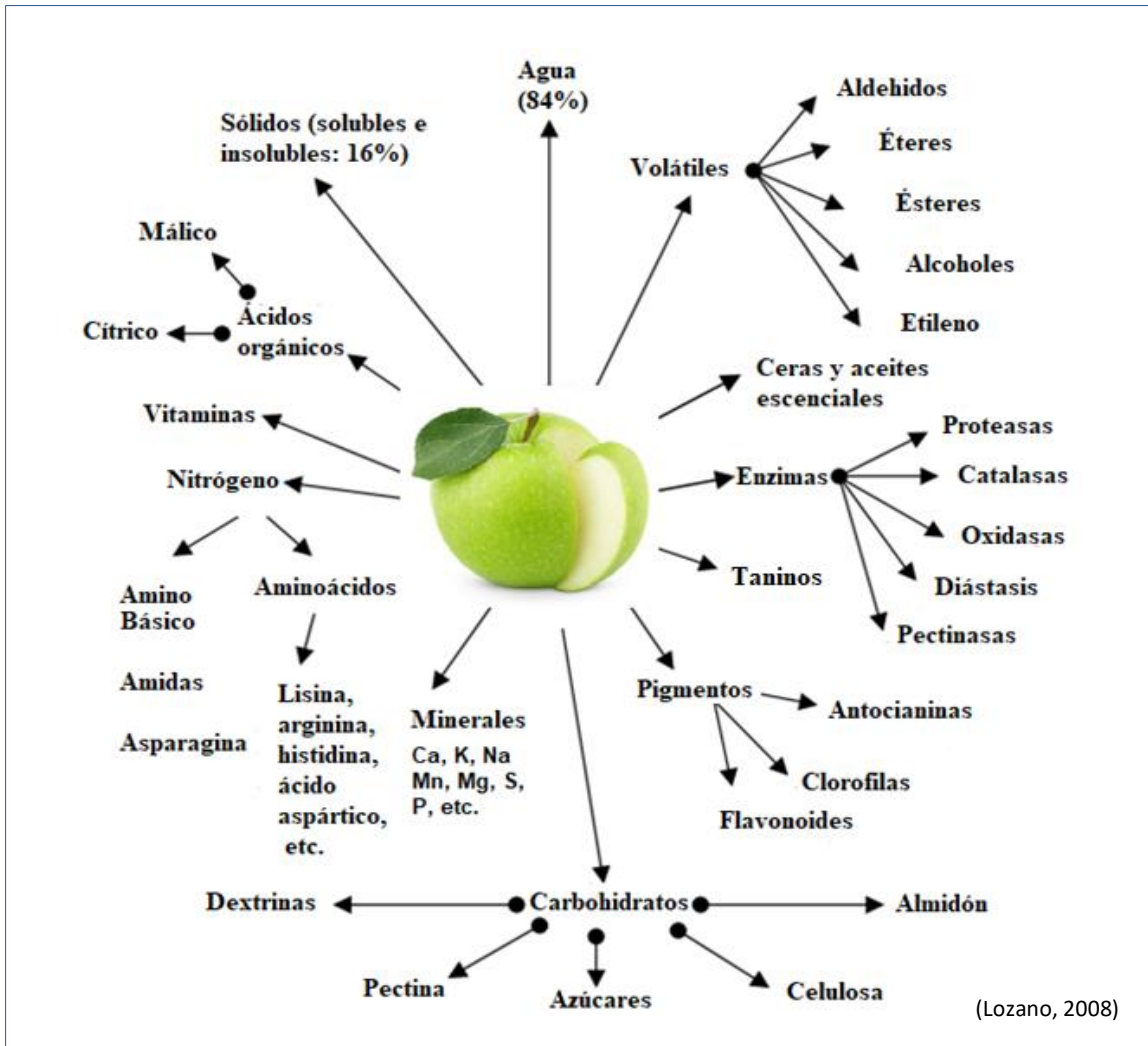


Figura 1: Representación esquemática de los componentes más notables de una fruta.

Como se puede apreciar en la Figura 1 la manzana es rica en muchos nutrientes, es por esto que existen muchos estudios que se enfocan en maximizar el uso y reducir la pérdida por maduración de la fruta.

### 3.2. Manzana deshidratada en Chile y sus exportaciones

La deshidratación es una manera fácil, rápida y segura de preservar los alimentos, en el mundo de la alimentación, la manzana deshidratada puede incorporarse a las ensaladas, licuados y muchos platillos que tienen a la manzana como alimento base. El mundo coctelero y la industria de los vinos y sidras, por mencionar dos ejemplos, utilizan este fruto para desarrollar los más exquisitos y sofisticados productos que se exportan por todo el mundo. Las exportaciones chilenas en manzana deshidratada entre enero y abril del año 2019 fueron de 1.154 Toneladas según el ministerio de agricultura (Cruz, 2019). La figura 2 muestra una imagen referencial.



*Figura 2: Representación de Manzana deshidratada.*

Las exportaciones de Chile a nivel mundial alcanzan las 4.836 toneladas para el año 2017 aumentando al año 2018 en 5.117 toneladas, equivalentes a 32.027 miles de dólares americanos. La figura 3 muestra la lista de los mercados importadores más representativos a nivel mundial para la manzana deshidratada exportada por Chile entre el año 2016 y 2018 (TRADE MAP, 2019). El país con mayor importación de manzana deshidratada es Estados Unidos con una participación del 48,1% a nivel mundial, seguido de Alemania con 11,2% al año 2018.

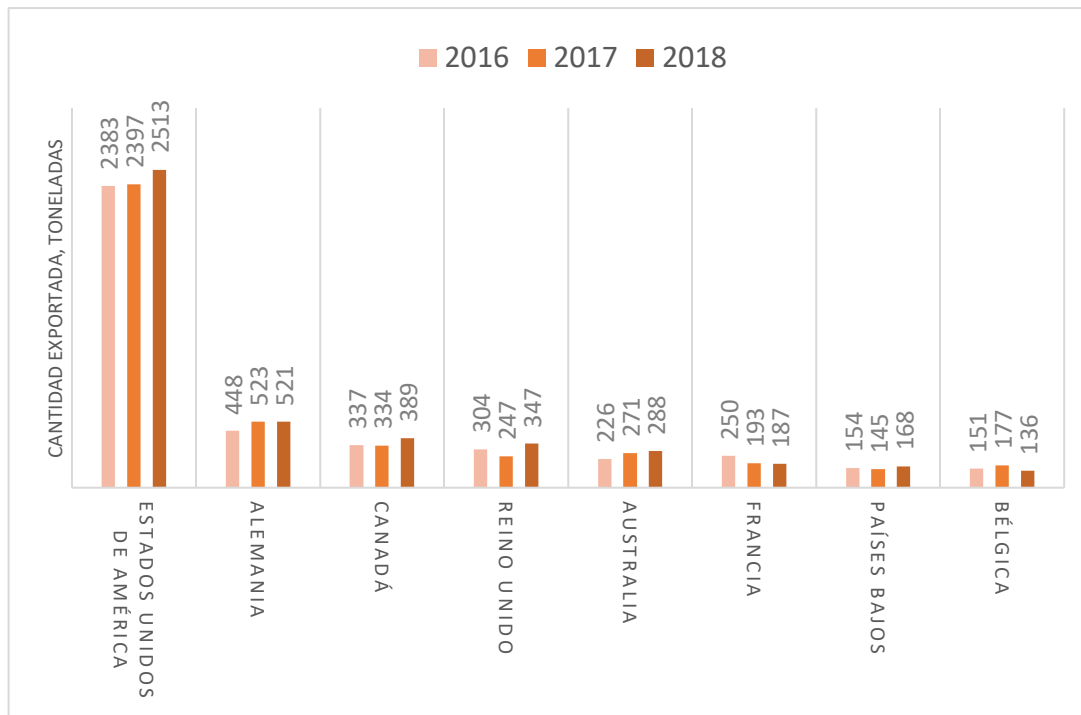


Figura 3: Manzana deshidratada exportada por Chile.

### 3.3. Deshidratación de alimentos

El secado o deshidratado es probablemente uno de los métodos más antiguos de preservación de alimentos, aplicado principalmente con el propósito de extender la vida útil del producto. Es la técnica más común y rentable, para la producción de productos tradicionales e innovadores (Rosenthal, Deliza, Welti Chanes, & Barbosa Cánovas, 2018). Investigaciones realizadas durante los últimos cien años ayudan al desarrollo de una variedad de métodos y equipos de secado, lo que impulsa la investigación y la mejora de distintas tecnologías para la deshidratación (Lewicki, 2006).

Existen distintos factores que influyen en el secado térmico del alimento, entre ellos se considera el diseño del equipo, la cantidad de producción y el tipo de tecnología para la deshidratación. La deshidratación es una operación unitaria mediante la cual se elimina total o parcialmente el agua de la sustancia que la contiene, es un proceso de transferencia simultánea de materia (agua) y

de energía (calor), se cuenta con una transmisión de energía que proporciona el calor latente de vaporización necesario para eliminar el agua que se transporta desde el alimento hacia el exterior. La velocidad a la que se produce el secado, así como el tiempo necesario para ello, dependerán de estas transferencias acopladas (Treybal, 1988).

Este proceso se emplea como método de preservación, inhibiendo la velocidad de crecimiento de microorganismos y las reacciones de degradación de calidad (Rosenthal, Deliza, Welti Chanes, & Barbosa Cánovas, 2018). Se basa en el hecho de que los microorganismos y las enzimas necesitan el agua para estar activos. Los alimentos secos, son aquellos que generalmente no contienen un porcentaje mayor al 25% de humedad y actividad agua ( $a_w$ ) entre 0,00 y 0,60. Estos son los alimentos secos tradicionales, además de los alimentos liofilizados que también se incluyen en esta categoría (Jay, Loessner, & Golden, 2005). La Figura 4 muestra una representación de las fases alimento- fluido que interactúan durante la deshidratación debido a un gradiente de actividad de agua ( $a_w$ ).

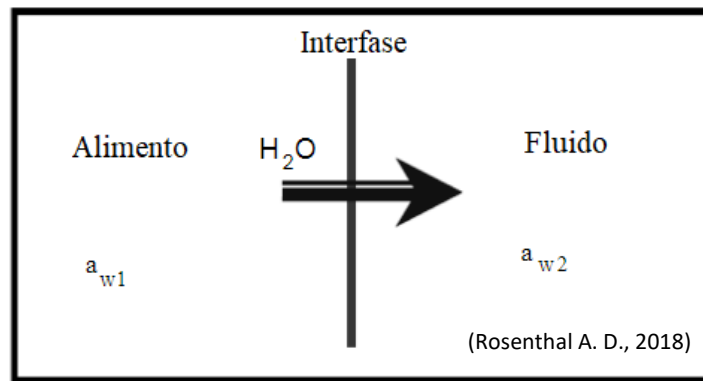


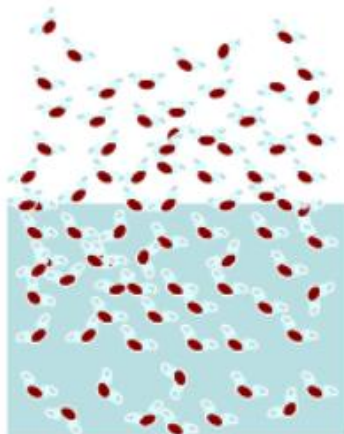
Figura 4: Esquema de las fases alimento-fluido donde se produce el transporte de agua durante la deshidratación debido a un gradiente de  $a_w$ .

### 3.3.1. Actividad de agua y humedad

La fruta es un producto vivo donde su contenido de agua cambia con la madurez, la variedad, el crecimiento, las condiciones de cosecha y almacenamiento. Los valores de la mayoría de las

propiedades termofísicas se pueden calcular directamente a partir del contenido de agua (Lozano, 2008).

La definición de la actividad del agua ( $a_w$ ) es la relación entre la presión de vapor del aire alrededor de un alimento ( $p$ ) y la presión de vapor del agua pura ( $p_0$ ), ambos permaneciendo a una misma temperatura. Normalmente se expresa con las siglas AW. Una definición más sencilla sería la cantidad de agua libre que hay en un alimento, es decir, la cantidad de agua disponible para reaccionar químicamente con otras sustancias y provocar el crecimiento microbiano. El resto de agua que permanece en el alimento es el agua ligada, está combinada con otros elementos y no está disponible para los microorganismos, por tanto, no afecta al crecimiento microbiano (Instruments, 2019). Lo anterior se puede ver representado en la Figura 5.



*Figura 5: Representación del agua ligada y libre.*

Las unidades de medida van de 0 a 1  $a_w$  y equivalen a la humedad relativa de equilibrio (ERH) que va de 0- 100% H.R. Por otra parte, el contenido de agua o de humedad de un alimento, hace referencia a la cantidad total de agua que contiene, sin hacer referencia a qué fracción del agua está ligada a otras sustancias, por tanto, no proporciona información exacta sobre el crecimiento microbiano. Si bien, es cierto que al aumentar el contenido de agua o humedad también suele aumentar la actividad del agua, no puede establecerse una relación lineal entre ambos parámetros (Instruments, 2019).

A niveles de aw 0,90 los organismos con mayor probabilidad de crecimiento son las levaduras y los mohos. El deterioro de una fruta es casi preventivo a una aw menor a 0,65. Sin embargo, se sabe que algunos mohos crecen lentamente a una aw 0,60-0,62. El grupo más problemático en alimentos secos es el moho, con el *Aspergillus*. La Tabla 1 presenta el valor de aw mínimo reportado para la germinación y crecimiento de levaduras y moho (Jay, Loessner, & Golden, 2005).

Tabla 1: Actividad de agua mínimo reportado para la germinación y crecimiento de levaduras y mohos.

| Organismo                              | Mínima (aw) |
|--|-------------|
| <i>Candida utilis</i>                  | 0,94        |
| <i>Botrytis cinérea</i>                | 0,93        |
| <i>Rhizopus stolonifer (nigricans)</i> | 0,93        |
| <i>Mucor spinosus</i>                  | 0,93        |
| <i>Candida scottii</i>                 | 0,92        |
| <i>Trichosporon pullulans</i>          | 0,91        |
| <i>Candida Zeylanoides</i>             | 0,90        |
| <i>Saccharomyces vernalis</i>          | 0,89        |
| <i>Alternaria citri</i>                | 0,84        |
| <i>Aspergillus glaucus</i>             | 0,70        |
| <i>Aspergillus echinulatus</i>         | 0,64        |
| <i>Zygosaccharomyces rouxii</i>        | 0,62        |

Consideraciones importantes para prevenir el deterioro por hongos, es la humedad relativa del entorno de almacenamiento del producto, en condiciones desfavorables recogerán humedad de la atmosfera hasta establecer cierto grado de equilibrio entre el alimento y su entorno, donde se ve afectada en primera instancia la superficie del producto seco que favorece el crecimiento de los mohos debido a sus requerimientos de oxígeno (Jay, Loessner, & Golden, 2005).

### 3.3.2. Mecanismos de secado

El mecanismo de transferencia de calor generalmente emplea el modo de conducción, convección o radiación de transferencia de energía, desde una fuente de calor (gas caliente o superficie metálica calentada) al material alimenticio. Por otro lado, el mecanismo de

transferencia de masa durante el secado puede controlarse mediante la velocidad de difusión de la humedad (líquido o vapor) dentro de la matriz alimentaria o por la velocidad de evaporación de la humedad desde la superficie del producto hasta el medio de secado (externo). Los mecanismos de transporte de líquidos incluyen flujo capilar, difusión superficial y difusión líquida (Rosenthal, et al., 2018). Diferentes mecanismos de secado entregan calor por convección, conducción y radiación. A continuación, se describen los métodos de: secado convencional, ventana refractiva y liofilización de alimentos.

#### a) Secado Convencional

El secado al aire por convección incluye dos mecanismos de transporte distintos que ocurren simultáneamente, involucrando transferencia de calor del aire de secado al material alimenticio y el transporte de agua (ya sea como líquido o vapor) desde el interior del producto sólido hasta la superficie y eventualmente al aire por evaporación. Se recomienda que el secado por aire caliente o secado convencional para la manzana este entre valores de 40, 60 y 80 °C (Rosenthal, et al., 2018).

#### b) Secado por Ventana Refractiva

El método de secado por ventana refractiva se ha vuelto atractivo para la industria de los alimentos, los productos secos por este método son de alta calidad y el equipo es relativamente barato. El costo del equipo de secado de ventanas Refractante es aproximadamente un tercio de un liofilizador para secar cantidad similar de producto, mientras que los costos de energía para operar secadoras por ventana refractiva son menos de la mitad de los equipos de liofilización (Nindo & Tang, 2007).

En un estudio realizado por Vahid Baeghbali, se evaluaron las características de retención de calidad del concentrado de jugo de granada comparado métodos de secado por ventana refractiva y liofilización, el análisis químico y las mediciones de color de las muestras

reconstituidas mostraron que el secador VR puede producir productos de alta calidad con un contenido de antocianinas, color de antocianinas y actividad antioxidante igual o mayor que los de las muestras liofilizadas (Baeghbali, Niakousari, & Farahnaky, 2016).

Durante el secado, están activos los tres métodos de transferencia de calor, conducción, convección y radiación. El calor se transfiere del agua caliente circulante al producto, el agua de proceso se calienta en un baño termorregulado para transferir energía térmica a la ventana de plástico tipo Mylar, resistente a temperaturas extremas y al desgaste, es transparente para espesores bajos y permite el paso de energía infrarroja. La energía térmica del agua caliente se transmite a través de la ventana de plástico por conducción y radiación. La Figura 6 muestra una representación esquemática del método de deshidratación por ventana refractiva.

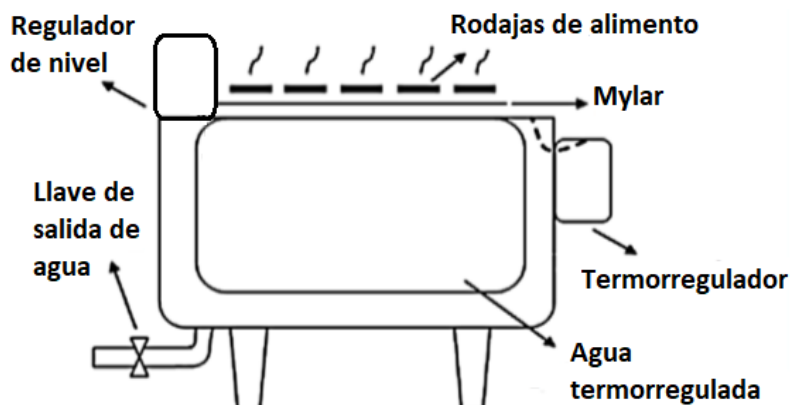


Figura 6: Disposición esquemática del secador por ventana refractante.

### c) Secado por Liofilizador

La liofilización es el proceso de deshidratación por el cual el agua es eliminada de un producto congelado pasando directamente del estado sólido (hielo) al estado vapor. La transformación entre el estado sólido y vapor recibe el nombre de sublimación y es producida a baja temperatura y presión. Al ser una deshidratación desde el estado congelado, constituye el mejor sistema de

preservación de productos biológicos sin cadena de frío evitando el crecimiento de microorganismos (hongos, moho, etc.), inhibiendo el deterioro por reacción química (cambio de sabor, aroma, pérdida de propiedades fisiológicas). Además, tiene otras dos virtudes trascendentes, el producto no cambia de forma y es fácilmente rehidratable (PRODAO, 2009). Se ha demostrado que la congelación rápida produce productos que son más aceptables que la congelación lenta. La congelación rápida permite la formación de pequeños cristales de hielo, causando menor daño a la estructura de los alimentos. Al descongelar, los alimentos de congelación rápida estos muestran características más parecidas al producto fresco, que los alimentos congelados lentamente (Jay, Loessner, & Golden, 2005).

La liofilización busca alcanzar valores de 5% de humedad o menores, disminuyendo las pérdidas de los componentes volátiles y termo sensibles (Valencia, Rodríguez, & Giraldo, 2011), con una actividad de agua entre 0,10 a 0,25 (Jay, Loessner, & Golden, 2005). Algunos alimentos pueden mantenerse estables a niveles más altos de humedad, lo que evitarían el gasto adicional que se produce al eliminar los niveles más bajos de agua. Durante el proceso de liofilización se destruyen relativamente pocos organismos por tanto la necesidad de aumentar el tiempo de secado es nula, es la etapa de congelación la que alcanza a destruir entre el 5 y 10% de los organismos (Jay, Loessner, & Golden, 2005).

Los cambios en el sabor y aroma de los productos deshidratados se deben fundamentalmente a la pérdida de componentes volátiles durante el proceso, así como al desarrollo de sabores y aromas típicos de productos cocidos provocados por las altas temperaturas. Estos cambios son tanto mayores cuando más altas son las temperaturas utilizadas y/o cuanto mayor es el tiempo de secado, pudiendo minimizarse utilizando métodos de secado que impliquen el uso de temperaturas moderadas o bajas (Maupoey, Grau, Sorolla, & Baviera, 2001).

### 3.3.3. Mecanismos de difusión

Difusión es el proceso por el cual la materia se transporta desde una parte del sistema a otro como resultado de movimientos moleculares aleatorios, esto se puede ver reflejado en la transferencia de calor por conducción, una analogía realizada entre los dos procesos fue reconocida por Fick (1855), quien primero puso la difusión sobre una base cuantitativa adoptando la ecuación matemática de conducción de calor derivada por Fourier (1822). La teoría matemática se basa en la hipótesis de que la tasa de transferencia de la sustancia difusora a través del área unitaria de una sección es proporcional a la gradiente de concentración medido normal a la sección (Crank, 1975) como se muestra en la ecuación (1). Además, se asume que el coeficiente de difusión no depende de la composición y por tanto de la posición.

$$F = D_{eff} \frac{\partial C}{\partial x} \quad (1)$$

$F$  es la velocidad de transferencia por unidad de área,  $C$  la concentración de sustancia difusora,  $x$  la coordenada espacial medida normal a la sección y  $D_{eff}$  es el coeficiente de difusión efectivo. La segunda ley de Fick hace referencia al cambio del gradiente de concentración en función del tiempo, se deriva de la primera ley considerando que el cambio en concentración a partir de una posición  $x$  está dado por la diferencia del flujo hacia y desde un elemento diferencial  $dx$ . Donde, además es posible considerar una difusión unidireccional con una geometría de placa infinita. De esta manera se puede expresar la segunda ley de Fick como la ecuación (2).

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

Luego, la solución para la ecuación (2) considerando las condiciones de borde:  $t > 0$ ,  $C = C_0$ ,  $X = 0$  y las condiciones iniciales:  $t = 0$ ,  $C = 0$ ,  $X > 0$ , con  $C$  equivalente a la concentración de soluto en la fase líquida del producto,  $C_0$  concentración inicial,  $X$  dimensión espacial y  $t$  el tiempo de proceso, la

segunda Ley de Fick, para una placa plana de longitud infinita y difusión unidireccional (Crank, 1975) queda representada por la ecuación (3).

$$C'(t) = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp(-D_{eff}((2n+1)\pi/L)^2 t) \quad (3)$$

$$C'(t) = \frac{C(t)-C_e}{C_0 - C_e} \quad (4)$$

Donde  $C(t)$  es la concentración en un periodo de tiempo  $t$  en la fruta,  $C_e$  corresponde a la concentración de equilibrio alcanzada,  $C_0$  representa la concentración inicial del producto,  $L$  es el espesor de la placa y  $n$  el número de términos ocupados para la realización del cálculo.

Sin embargo, la complejidad del proceso de transferencia de masa debido a la naturaleza compleja de los tejidos vegetales, como su estructura celular heterogénea, la contracción y los cambios de volumen durante el proceso de deshidratación, provoca que varios de los supuestos de la segunda Ley de Fick no se ajusten a tejidos heterogéneos, como es el caso de la manzana (Simpson, et al., 2015). Se ha demostrado que la difusión anómala o no fickiana es una herramienta útil para describir cuantitativamente la difusión durante el secado de alimentos, la cual considera muchos de los cambios que ocurren en el material alimenticio, y su microestructura, como la contracción y la porosidad (Simpson et al., 2013). Debido a la influencia de la estructura celular del material alimenticio, los fenómenos de difusión anómala real de solutos se explican como un movimiento que puede ser, más rápido o más lento de lo que se postula en la segunda Ley de Fick (Simpson et al., 2013). Las descripciones del comportamiento de transferencia de masa se pueden modelar con ecuaciones diferenciales de orden no entero, como números fraccionarios (Simpson, et al., 2015). Donde, la difusión anómala viene dada por la representación descrita en la ecuación (5).

$$\frac{\partial^\alpha C}{\partial t^\alpha} = D_{eff} \frac{\partial^\beta C}{\partial x^\beta} \quad (5)$$

Considerando solo la derivada de orden fraccional para el tiempo y el orden de la derivada espacial de orden 2 como en el modelo de la segunda ley de Fick, entonces la ecuación de difusión anómala (5) queda representada como la ecuación (6).

$$\frac{\partial^\alpha C}{\partial t^\alpha} = D_{eff} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (6)$$

La solución para la relación de difusión anómala mostrada en la ecuación (6) utilizando solo ordenes fraccionales temporales, se describe en la ecuación (7), con  $C'(t)$  equivalente a la ecuación (4).

$$C'(t) = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} E_\alpha(-D_{eff}((2n+1)\pi/L)^2 t^\alpha) \quad (7)$$

Donde  $E_\alpha$  corresponde a la función Mittag-Leffler, la cual es importante y recurrente en la resolución de ecuaciones como las derivadas de orden fraccional, presentada en la ecuación (8).

$$E_\alpha(x) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{x^k}{\Gamma(1+\alpha k)} \quad (8)$$

La ecuación de Mittag-Lefflet converge a la función exponencial cuando  $\alpha=1$ . Esto transforma el modelo de ecuación fraccional (6) en un modelo de Fick (Crank, 1975), lo cual es consistente con el hecho de que, si el factor fraccional  $\alpha$  es 1, la ecuación fundamental de difusión anómala se convierte en la ecuación fundamental de difusión de Fick (Simpson, et al., 2015). Si el análisis se realiza durante mucho tiempo al igual que en la 2° Ley de Fick, la ecuación (7) se simplificará utilizando solo el primer término de la serie ( $n = 0$ ), como se muestra en la ecuación (9) siendo esta una buena aproximación de la realidad.

$$C'(t) = \frac{8}{\pi^2} E_\alpha(-D_{eff}(\pi/L)^2 t^\alpha) \quad (9)$$

Donde  $C'(t)$  se define como una concentración adimensional,  $L$  es el espesor del sólido,  $D_{eff}$  es el coeficiente de difusión efectivo con dimensiones de  $m^2/t^\alpha$ , y  $t$  es el tiempo en segundos. El valor del parámetro  $\alpha$  es un valor que depende del material y define el proceso de difusión como sub difusivo para  $0 < \alpha < 1$  y como súper difusivo para  $\alpha > 1$ . En materiales biológicos la heterogeneidad debida a la estructura celular, producen regiones donde los difusores pueden viajar distancias de longitud anómalas o detenerse en compartimentos, produciendo una desviación a los resultados esperados, los fenómenos, superdifusión y subdifusión de transferencia ocurren en sistemas complejos. En subdifusión, los difusores tardan más tiempo en recorrer una distancia específica en comparación con una distribución normal. Por el contrario, la súper difusión ocurre cuando los difusores "saltan" de una posición a otra, es decir, el tiempo que lleva viajar una distancia dada es mucho menor que en la difusión normal (Simpson, Jaques, Nuñez, Ramirez, & Almonacid, 2012).

### 3.4. Enriquecimientos de matrices alimentarias

Es un proceso diseñado para incorporar compuestos en una matriz alimentaria que permite mejorar la calidad nutricional y la funcionalidad del alimento, debido a la incorporación de soluciones que contengan vitaminas, minerales, compuestos bioactivos y microorganismos. En el diseño del proceso es necesario considerar diferentes parámetros o características de: (a) alimento (porosidad, estructura del tejido, tamaño y geometría), (b) solución de impregnación (concentración y tipo de soluto), (c) el proceso (presión de vacío, tiempo de exposición, tiempo de relajación a presión atmosférica, temperatura, relación producto /solución y agitación), estos parámetros son monitoreados, controlados y aplicados, lo cual permite que las características nutricionales y sensoriales de los alimentos sean menos afectados para lograr el objetivo de diseñar nuevos alimentos funcionales mínimamente procesados (Rosenthal, Deliza, Welti Chanes, & Barbosa Cánovas, 2018).

La incorporación de líquido en los alimentos es causada por la pérdida de gas atrapado dentro de los poros de la matriz, una vez que la presión se restablece a la presión atmosférica. Esto tiene

lugar en dos pasos: primer paso, el alimento se coloca en un recipiente cerrado que contiene la solución a impregnar, y se aplica una presión por debajo de la atmosférica, lo que hace que el gas atrapado dentro de los poros del alimento se expanda y fluya, este paso continúa hasta que la presión externa en el recipiente es igual a la presión en el interior del alimento, permitiendo la transferencia de una cantidad de líquido de la solución de impregnación a los poros de la matriz, en el segundo paso las condiciones atmosféricas se restauran dentro del contenedor causando que el gas residual se comprima y el líquido externo fluya hacia los poros de los alimentos por mecanismos hidrodinámicos (Rosenthal, Deliza, Welti Chanes, & Barbosa Cánovas, 2018).

La Figura 7 muestra los mecanismos de transporte durante la impregnación al vacío, considerando las siguientes abreviaciones. DRP: Fenómenos de deformación-relajación, HDM: Mecanismo hidrodinámico,  $V_g$ : Gas dentro del volumen de poro,  $p_i$ : Presión interna,  $p_e$ : Presión externa,  $p_{at}$ : Presión atmosférica.

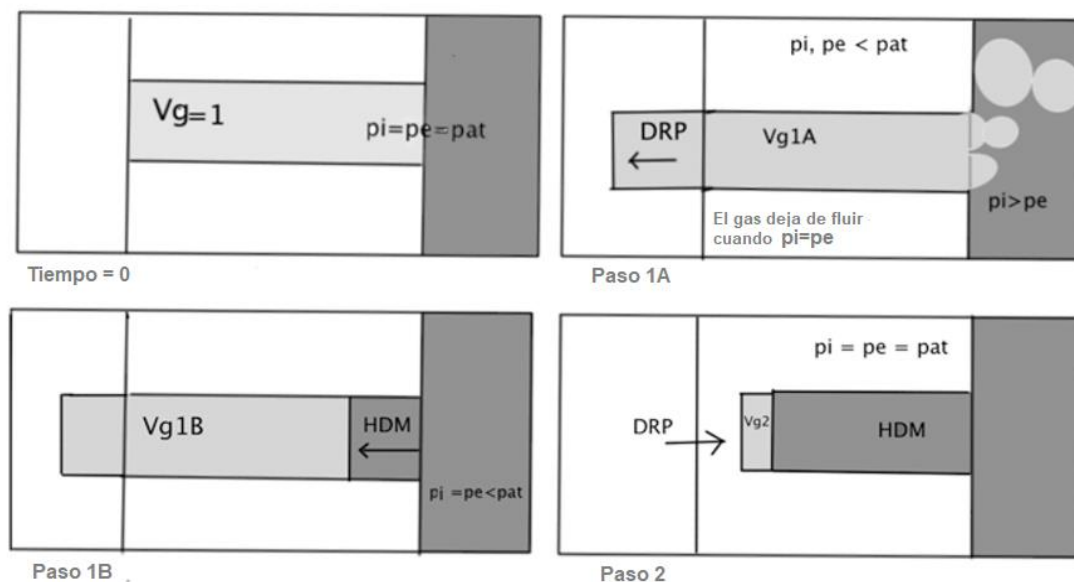


Figura 7: Mecanismos de transporte durante la impregnación al vacío.

La pérdida de líquido y la ganancia de soluto en la estructura de los alimentos depende principalmente de la presión de vacío y su tiempo de aplicación, también son factores

determinantes el diámetro y el número de poros en la estructura de los alimentos, por lo que es necesario saber la porosidad efectiva para predecir la solución máxima que puede ser impregnada en el alimento (Rosenthal, Deliza, Welti Chanes, & Barbosa Cánovas, 2018).

La porosidad efectiva ( $\epsilon_e$ ) es una propiedad importante que se define como la relación entre el volumen de gas total en la muestra y el volumen inicial de la muestra. El estudio realizado por Mújica-Paz determina los valores de  $\epsilon_e$  en diferentes frutas, como la manzana que obtiene un  $\epsilon_e$  de 0.33. Otro parámetro importante para considerar es la porosidad real ( $\epsilon_r$ ), que constituye una medida de los espacios vacíos en el tejido alimentario y representa el espacio máximo que podría estar impregnada una solución isotónica. La manzana tiene grandes valores de  $\epsilon_r$  (0.273), mientras que el mango y el melón presentan valores intermedios (0.152 y 0.133). Por otro lado, el mamey, papaya, banana, y el melocotón presentan los niveles más bajos (0.016–0.058) (Mújica-Paz, Valdez-Fragoso, López-Malo, & Palou, 2003b).

Los tejidos vegetales cuentan con amplios espacios intracelulares que requieren poco tiempo para ser impregnados, el tiempo necesario es de aproximadamente 5 minutos, cuando el líquido externo es jarabe de azúcar, sin embargo, se requieren períodos de vacío más largos para alcanzar el equilibrio mecánico con poros más pequeños (Chiralt, et al., 2001). Las frutas con alta porosidad (20-30%) se impregnarán fácilmente, un ejemplo es la manzana, que cuenta con un tejido altamente poroso que permite su fácil impregnación al vacío y en condiciones atmosféricas (Degraeve, et al., 2003; Mújica-Paz, et al., 2003a; Mújica-Paz, et al., 2003b; Salvatori, et al., 1998).

#### 3.4.1. Impregnación con compuestos fenólicos

Los compuestos fenólicos ampliamente distribuidos en la naturaleza son reconocidos como moléculas funcionales debido a sus propiedades para promover de manera positiva la salud. Estos compuestos se clasifican como flavonoides y no flavonoides, con gran influencia en el sabor y apariencia de los alimentos. Debido a la diferente distribución de los flavonoides en los

alimentos y las diferentes propiedades beneficiosas que contienen, la impregnación con estos compuestos representa un método para aumentar su concentración o para incorporar compuestos específicos que no se presentan en algunos alimentos (Rosenthal A. D., 2018).

Un estudio basado en rodajas de manzana con impregnación protege el compuesto fenólico contra la degradación que puede ocurrir durante un mayor secado por aire convectivo. Se recomienda que la impregnación en rebanadas de manzana alcance una presión inferior a la atmosférica, alcanzando una presión de vacío de 100–800 mbar por 5 min y con restauración de la presión atmosférica durante 10 minutos (Schulze, Peth, Hubbermann, & Schwarz, 2012).

### 3.4.2. Compuestos fenólicos de la granada y sus beneficios

La granada es fruto de un árbol llamado granado que alcanza hasta cuatro metros de altura, pertenece a la familia de las Punicáceas, la fruta posee una piel gruesa de color escarlata o dorada con tono carmesí en el exterior y una gran cantidad de semillas internas rodeadas de una jugosa pulpa de color rubí, es una de las frutas comestibles más antiguas conocidas por la humanidad. La parte comestible de una fruta de granada (arilos) se consume directamente o se usa para la preparación de jugos y bebidas enlatadas, incluidas bebidas alcohólicas, jaleas y mermeladas, también se usa para aromatizar y colorear bebidas (Labbé, et al., 2016).

El área utilizada para el cultivo y la producción de granada en Chile ha aumentado significativamente, pasando de un área cultivada de 670 ha en 2012 a 1.368 ha (según fechas de catastro frutícola) para granado al año 2017 (ODEPA, 2017). Este aumento se atribuye a la popularidad de la fruta de granada en los últimos años debido a las propiedades funcionales de sus compuestos fenólicos, que incluyen ácidos fenólicos, flavonoides, taninos condensados y taninos hidrolizables (Li, et al., 2015; Mphahlele, et al., 2015).

Es una fruta de muy bajo valor calórico debido a su escaso contenido de hidratos de carbono, el componente mayoritario es el agua y en lo que se refiere a otros nutrientes, se destaca su aporte mineral de potasio. Otros componentes destacables son el ácido cítrico (de acción desinfectante, alcaliniza la orina y potencia la acción de la vitamina C), málico, flavonoides y los taninos. Estos últimos son sustancias con propiedades astringentes y antiinflamatorias, que se reconocen rápidamente por la sensación áspera que producen al paladar. Por otra parte, los flavonoides son pigmentos vegetales responsables del color rojizo de sus granos, de acción antioxidante y antiséptica. Dichos componentes tienen la capacidad de captar radicales libres nocivos para el organismo. El consumo de granada contribuye a reducir el riesgo de enfermedades degenerativas, cardiovasculares y de cáncer (Eroski Consumer, 2019). El extracto de zumo de granada tiene efectos anti-proliferativos y pro-apoptóticos en células humanas de cáncer pancreático, lo que puede ayudar a restaurar la adhesión de las células tumorales, según los resultados de una investigación realizada en la Universidad de Chapman (Estados Unidos), publicado en "e-Research: A Journal of Undergraduate Work", (Gomez, Shackelford, Tocchi, & Rowland-Goldsmith, 2014) que además, corrobora trabajos anteriores que indican que los fitoquímicos de las frutas pueden reducir el riesgo de cáncer gracias a los efectos antioxidantes y antiinflamatorios de los polifenoles.

### 3.4.3. Teoría del método para determinar compuestos fenólicos

El análisis del contenido total de compuestos polifenólicos de un alimento es importante debido a la gran variedad de actividades biológicas que estos presentan. La actividad biológica de los polifenoles está relacionada con su carácter antioxidante, esto se debe principalmente a sus propiedades redox, que les permiten actuar como agentes reductores, donadores de hidrógeno y extintores de oxígeno singlete (Kaur & Kapoor, 2001). Su determinación puede realizarse por medio de diversos métodos, uno de los métodos más utilizados es llamado "Folin-Ciocalteu" y se basa en los compuestos fenólicos, estos compuestos reaccionan con el reactivo de Folin-Ciocalteu a pH básico.

La oxidación de los polifenoles presentes en la muestra causa la aparición de una coloración azulada que presenta un máximo de absorción a 765 nm, y que se cuantifica por espectrofotometría en base a una recta patrón de ácido gálico. Se trata de un método preciso y sensible, que puede padecer numerosas variaciones, fundamentalmente en lo relativo a los volúmenes utilizados de la muestra a analizar, concentración de reactivos y tiempo de reacción. (Garcia Martinez, Fernández, & Fuentes, 2015). La Figura 8 muestra el mecanismo de acción del reactivo Folin- Ciocalteu donde se ve el cambio molecular debido a su propiedad redox.

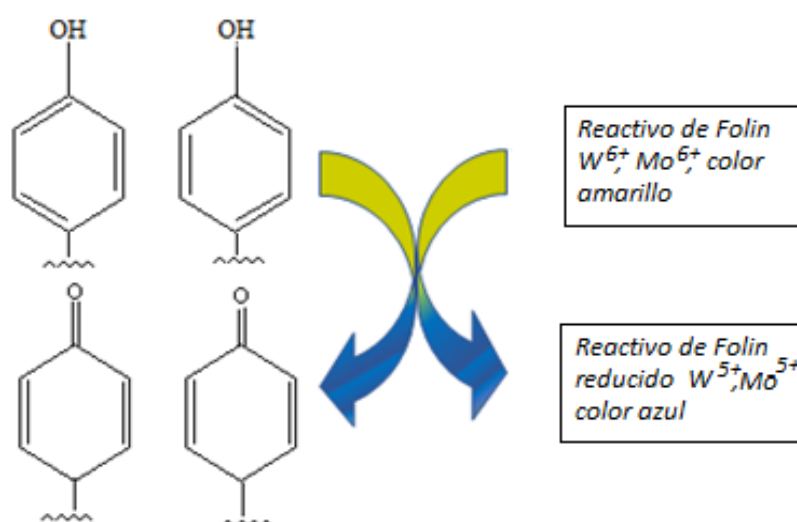


Figura 8: Mecanismo de acción del reactivo de Folin-Ciocalteu.

#### 3.4.4. Teoría del método para determinar actividad antioxidante

Se han descrito diversas técnicas para evaluar la capacidad antioxidante de alimentos y plantas medicinales, sin embargo, la técnica que utiliza el radical libre 2,2-difenil-1-picrilhidrazilo conocido por las siglas DPPH es el método más utilizado actualmente. Este método fue desarrollado por Blois (1958) para determinar la actividad antioxidante utilizando un radical libre estable (DPPH;  $C_{18}H_{12}N_5O_6$ ,  $M = 394.33$ ) (Kedare & Singh, 2011), este radical libre es

susceptible de reaccionar con compuestos antioxidantes a través de un proceso caracterizado por la cesión de un átomo de hidrógeno proporcionado por el agente antioxidante. En tal sentido, podemos considerar que el valor de la capacidad antioxidante es dependiente de la concentración del DPPH, así como, de la naturaleza del compuesto antioxidante (Guija, Inocente, Ponce, & Zarzosa, 2015).

La Figura 9 muestra la molécula DPPH en su forma de radical libre y cuando ocurre la cesión de un átomo de hidrogeno proporcionado por el agente antioxidante.

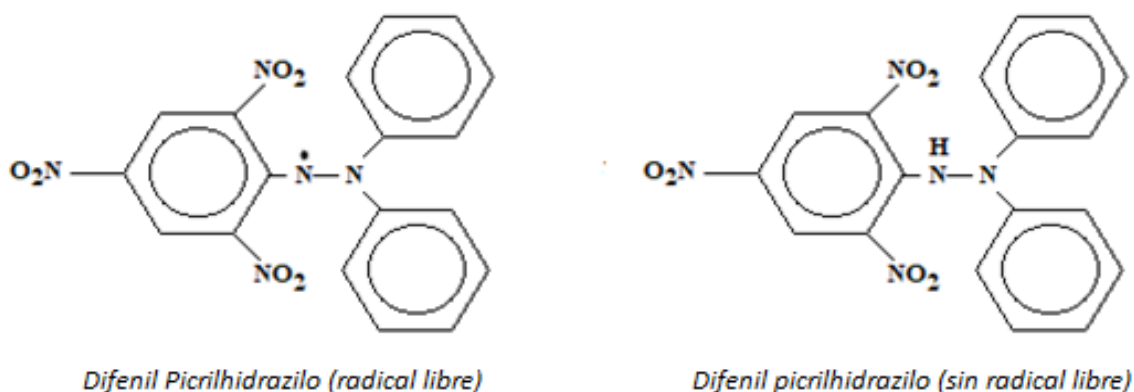


Figura 9: Estructura molecular con y sin radical libre.

Los radicales libres son moléculas caracterizadas por tener uno o más electrones desapareados en su orbital externo, condición que los torna altamente reactivos (Guija, Inocente, Ponce, & Zarzosa, 2015). Si bien el DPPH puede aceptar que un electrón o un radical hidrógeno se convierta en una molécula diamagnética estable, puede oxidarse solo con dificultad y luego de manera irreversible. Al mezclar la solución DPPH con una sustancia que puede donar un átomo de hidrógeno, da lugar a la forma reducida con la pérdida de color violeta. Cabe señalar que el DPPH muestra una fuerte banda de absorción a 517 nm debido a su extraño electrón y la solución aparece en un color violeta intenso, la absorción se desvanece a medida que el electrón se empareja. La decoloración resultante es estequiométrica con respecto al número de electrones absorbidos (Kedare & Singh, 2011).

### 3.5. Aplicación de Perforación Láser en productos alimenticios

Un láser es Luz amplificada por emisión estimulada de radiación, que produce un haz coherente, monocromático y con una dirección específica que puede ser colimado en pequeños puntos, permitiendo generar una destrucción con gran precisión y con daño mínimo al área circundante, significando una mínima disminución de la masa, aproximadamente en un 0,4% (Tanzi, Lupton, & Alster, 2003).

El láser se ha mantenido como una herramienta potencialmente útil para una gran variedad de aplicaciones. Las propiedades de monocromaticidad y coherencia espacial del láser permiten enfocar el haz a un nivel extremadamente pequeño por un sistema de lentes, para producir una alta densidad de potencia rayo láser utilizado para soldar, cortar, perforar o como material de tratamiento (Ferraz, Mittal, Bilanski, & Abdullah, 2007).

Se utiliza gas de CO<sub>2</sub> para obtener una longitud de onda específica de 10,6 μm (SYNRAD, 2017). Entre varios tipos de laser comerciales, los láser de CO<sub>2</sub> son los más considerados para el tratamiento de matrices biológicas, dado que su longitud de onda es fuertemente absorbida por agua (Bilanski & Ferraz, 1991; Etxeberria, et al., 2006). Esta tecnología ha permitido transformar el procesamiento de materiales en varios campos debido a su precisión, seguridad y cuidado al medioambiente. Estudios anteriores de la micro perforación laser de CO<sub>2</sub>, indican que esta tecnología es utilizada para mejorar el proceso de secado osmótico de arándanos, que concluye en, una mejor eficiencia del proceso y calidad final del producto (Fujimaru, Ling, & Morrissey, 2012). Por otro lado, se ha utilizado el láser de CO<sub>2</sub> para grabar la identificación del producto en la superficie del aguante, opción viable para identificar los productos con una etiqueta permanente (Sood P, 2009). Sin embargo, La industria de alimentos no ha incorporado completamente esta tecnología. Se sugiere que la generación de micro perforaciones aumente el coeficiente de difusividad efectiva y por ende disminuya el tiempo de secado en alimentos deshidratados.

## 4. Materiales y Métodos

### 4.1. Materia Prima y preparación de la muestra

Como materia prima se utiliza manzana a granel adquirida en la línea de supermercados Jumbo de la ciudad de Valparaíso, la manzana es de tipo Granny Smith y se almacena refrigerada a 2°C en el laboratorio de alimentos ubicado en la zona de investigación. Son seleccionadas las manzanas que tienen el tamaño más grande para obtener 7 a 9 discos de pulpa por unidad. Para obtener los discos de materia prima se utiliza un rebanador metálico que cumple la función de laminar la manzana con un tamaño definido en 4 mm de espesor. Por medio de un pie de metro se mide el espesor de 64 discos que dan como resultado  $4,06 \pm 0,19$  mm. Para obtener el diámetro se utiliza un sacabocado metálico de 40 mm de diámetro el cual permite obtener los discos del tamaño apropiado para obtener el snack de manzana. Para cada experimento se obtiene un total de 22 a 24 discos y se registra la masa inicial de la materia prima. La Figura 10 muestra los materiales necesarios y el proceso enumerado del 1-4 para obtener los discos de manzana.

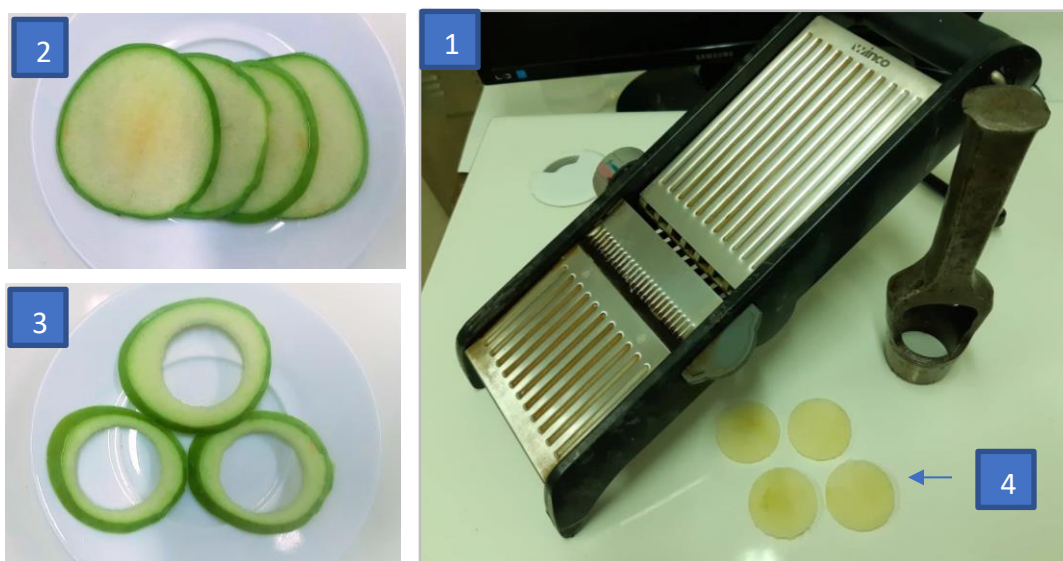


Figura 10: Elementos y proceso para obtener discos de manzana.

#### 4.2. Solución y método de impregnación a vacío

La solución de impregnación se lleva a cabo con un producto natural pasteurizado de larga vida que es adquirido en un pack de 24 botellas de 200 ml de jugo de granda AFE, dentro de su descripción es 100% jugo de fruta natural, hecho solo en base de grandas frescas seleccionadas (Jugo AFE, 2019). Para llevar las muestras a impregnación por vacío se utiliza un desecador de vidrio que contiene una válvula en la parte superior, la cual permite conectar la bomba de vacío marca Dosivac (modelo DVP-1, Buenos Aires, Argentina) al recipiente y de esta manera generar una presión inferior a la presión atmosférica. Por medio de un vacuómetro con llave de regulación se logra modificar la presión de vacío hasta obtener 0,5 bar.

La relación entre la masa de manzanas a impregnar y la solución de impregnación a utilizar fue de 1:3 para cada experimento realizado. El jugo refrigerado fue previamente calentado en un baño a 60°C por 10 minutos hasta lograr una temperatura entre 35-40 °C. En la Figura 11 se puede visualizar el sistema listo para realizar la impregnación a vacío.



Figura 11: Desecador con muestras impregnadas a vacío en su interior.

#### 4.3. Equipo de micro perforación Láser de CO<sub>2</sub>

El equipo láser de CO<sub>2</sub> de 100 W (Firestar t100, Synrad Inc. Mukilteo, Wash., USA) cuenta con un enfoque de 1500 mm con lentes FLA-370 (Serial #847) y FLA-125 (Serial #1859) junto a una interfaz de computadora con software de mercado láser WinMark Pro (Synrad Inc.), el equipo se puede observar en la Figura 12.



Figura 12: Laser de CO<sub>2</sub>.

Para las micro perforaciones realizadas, se ocupa el lente FLA-125 y se considera un 100% de penetración en el disco de manzana, con una configuración de tipo panel y distancia horizontal entre puntos de 2,75 mm. En la figura 13 muestra una representación de la configuración panel utilizada en el disco de manzana.

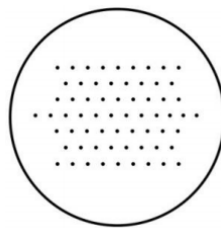


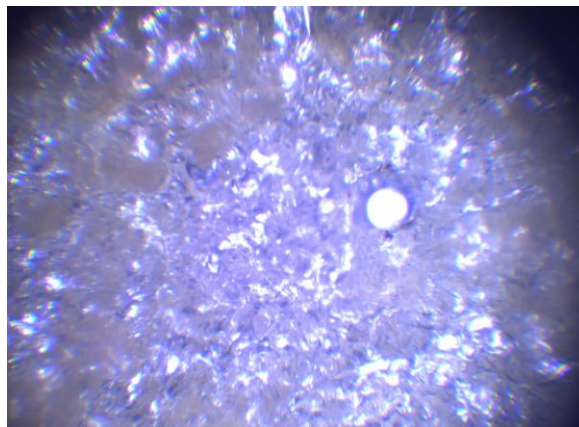
Figura 13: Configuración panel.

Los parámetros definidos para obtener la micro perforación laser en el alimento se puede observar en la Tabla 2.

*Tabla 2: Parámetros de micro perforaciones laser.*

| Parámetro                      | Cantidad         |
|--------------------------------|------------------|
| Espacio entre columnas         | 2,75 mm          |
| Configuración                  | Panal (64 poros) |
| Potencia (base 100 W)          | 10,0 %           |
| Tiempo de residencia del laser | 1 ms             |
| Numero de pulsos               | 120              |
| Frecuencia                     | 50 KHz           |

El diámetro de poro se determinó mediante 25 muestras con micro perforación, en cada una de ellas se seleccionó de forma aleatoria 4 poros de la misma fila del arreglo, configuración panal. Mediante un bisturí se corta del disco de manzana la fila seleccionada, considerando una capa muy delgada. La delgada lamina con micro perforaciones es llevada a un microscopio óptico tipo Hund (600/12 230V-50-60 Hz, Wetzlar, Alemania), el cual permite tomar imágenes a través de un computador conectado al equipo, utilizando el Software Imagen.pro plus. Por muestra se analizaron 4 imágenes para analizar su radio mediante el Software. En el Anexo 3 se encuentra la tabla con los datos totales de radio para cada una de las muestras con micro perforación analizadas. La Figura 14 muestra una de las fotografías de micro perforación láser analizada en el microscopio óptico.



*Figura 14: Micro perforación láser de CO<sub>2</sub> en muestra de manzana.*

## 4.4. Equipos para deshidratación

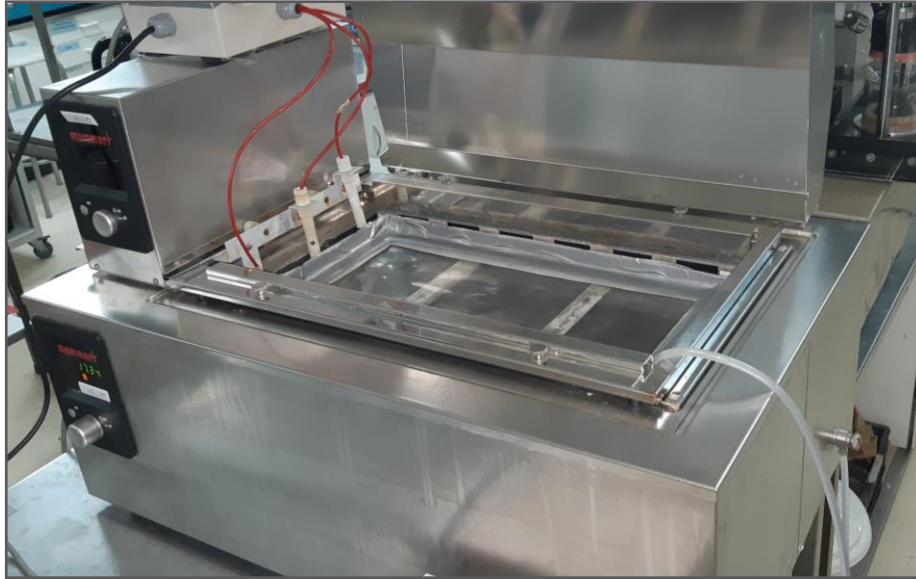
### 4.4.1. Secado Convencional

El Secado convencional se lleva a cabo en una estufa Beschickung modelo 100-800 (Büchenbach, Alemania) a 75 °C, la deshidratación del alimento se realiza hasta lograr una actividad de agua menor a 0,4. Para cada experimento un total de 24 muestras son colocadas sobre un papel aluminio ordenadas de manera uniforme.

### 4.4.2. Ventana Refractiva

El secado por ventana refractiva se compone de un baño termostático, de acero inoxidable marca MEMMERT (WNB22, Alemania), con una capacidad de 60 L de agua destilada. La superficie del agua fue cubierta por una ventana metálica diseñada según las dimensiones del equipo, en ella es colocado un plástico tipo MYLAR (polietileno tereftalato) de 2 mm de espesor donde las muestras son colocadas y espaciadas uniformemente sobre la superficie de secado (150x470 mm<sup>2</sup>). Las muestras estarán en contacto directo con el agua a temperatura de 75 °C. Luego, se acopla la ventana refractiva sobre el baño termorregulado y se asegura que no queden burbujas de aire en la interfaz agua y Mylar, el baño termorregulado tiene acoplado una bomba peristáltica que regula el nivel de agua, mediante un controlador de nivel.

El diseño de esta ventana solo permite colocar 21 muestras por experimento. Donde la deshidratación finaliza cuando la actividad de agua es inferior a 0,4. La Figura 16 muestra el equipo de secado por ventana refractiva.



*Figura 15: Sistema de secado por ventana refractiva.*

#### 4.4.3. Liofilizador

Las muestras Liofilizadas se deshidratan en un equipo marca Christ (Alpha 2-4 LSCPlus, Osterode am Harz, Alemania) a una temperatura de 25 °C por bandeja, el equipo cuenta con 3 bandejas y en cada una de ellas se pueden colocar un total de 12 muestras. El sistema cuenta con una bomba que permite la generación de vacío de 0,3 mbar.

Las muestras para congelar son colocadas sobre un papel aluminio y se llevan a una temperatura de -40°C por 1 hora, pasado este tiempo se inicia la congelación de los platos a la misma temperatura por 15 minutos. La finalidad de esta etapa previa a la liofilización es obtener temperaturas iguales en el producto y la superficie de contacto para asegurar un calentamiento gradual y controlado. Para este método fueron definidas 8 horas de liofilización esto solo incluye el secado primario, con este tiempo las muestras obtienen la humedad y actividad de agua requerida para la investigación. La Figura 16 muestra el equipo de liofilización de alimentos.



Figura 16: Liofilizador Christ, Alpha 2-4 LSCPlus.

#### 4.5. Determinación de tiempo de secado

La cinética de secado es la que permite definir el tiempo de proceso, esto queda definido cuando las muestras de alimento alcanzan una actividad de agua ( $a_w$ ) inferior a 0,4. Para dos de los tres métodos de secado (ventana refractiva y estufa) se llevaron a cabo 3 experimentos en cada equipo midiendo la pérdida de masa (agua) de muestras en duplicado en el tiempo, las mediciones fueron hechas mediante una balanza analítica con intervalos de 20 minutos y luego tres intervalos de 10 minutos para una masa constante en el tiempo. La cinética de secado nos permite obtener un patrón de comparación entre las distintas condiciones de secado generando un producto estable microbiológicamente.

Para el tercer equipo el liofilizador de alimentos. Se midieron las propiedades de la manzana; polifenoles totales, actividad antioxidante, humedad en muestra seca y actividad de agua para cada uno de los experimentos realizados. Definiendo el tiempo de secado en 8 horas.

## 4.6. Determinación de actividad de agua y humedad.

### 4.6.1. Actividad de agua

La actividad de agua ( $a_w$ ) se obtuvo mediante un higrómetro marca AQUALAB, modelo 4TE (Decagon Devices Inc., Pullman Washington USA) el cual especifica un rango de medición entre 0,030 a 1,000 con una precisión de  $\pm 0,003$ , y una resolución de  $\pm 0,001$ .

### 4.6.2. Contenido de Humedad

El contenido de humedad en la muestra se basa en el método definido por AOAC (Association of Official Analytical Chemists) para frutas, el cual indica pesar 5 a 10 [g] de muestra para secar a una temperatura de 60°C con una presión inferior a 100 [mm Hg] que se logra dentro de un desecador acoplado a una bomba de vacío. El método se realizó en una estufa Beschickung modelo 100-800 (Büchenbach, Alemania) a 60 °C y se midió el peso de la muestra en una balanza analítica modelo AS 220/C/2 con una precisión de 0,001 [g].

Las muestras se dejan en el equipo durante 48 horas tiempo en el cual alcanzan un peso constante. La determinación de humedad en la muestra se obtuvo utilizando la siguiente correlación:

$$X^w = \frac{m_0 - m_f}{m_0} \cdot 100 \quad (10)$$

Donde cada factor corresponde a:

$X^w$ : Fracción de humedad medida en porcentaje

$m_0$ : Masa de la muestra inicial

$m_f$ : Masa de la muestra seca

#### 4.7. Determinación de polifenoles totales

Se utilizó el método Folin Ciocalteu descrito en la sección de “Antecedentes generales” punto 3.7.3. que se basa en los compuestos fenólicos, los cuales reaccionan con el reactivo de Folin-Ciocalteu a pH básico. El método presenta un máximo de absorción a 765 nm que se cuantifica por espectrofotometría en base a una recta patrón de ácido gálico (Ver Anexo 1).

##### 4.7.1. Preparación de la muestra y curva patrón de ácido gálico

Para la extracción de los compuestos fenólicos de la muestra de manzana con impregnación de jugo de granda, se llevó a cabo la siguiente metodología:

- Pesar 2 gr de muestra y triturar por medio de un mortero.
- Adicionar 20 ml de metanol al 80% v/v.
- Mantener en agitación con un agitador magnético durante 1 hora, tapado en papel aluminio para evitar el contacto con la luz y el oxígeno.
- Filtrar el contenido y obtener el sobrenadante.

Determinación de los polifenoles en la muestra y en los patrones de ácido gálico.

- Tomar 1000  $\mu$ L de cada disolución patrón de ácido gálico o del sobrenadante procedente de la extracción de los compuestos polifenólicos en la muestra y “diluir” en un aforo de 10 mL con metanol al 80% v/v (agitar). Para la curva de ácido gálico obtener concentraciones entre 0,12 – 0,02 mg ACG/ml como se muestra en Anexo 1.
- Tomar 1000  $\mu$ L de la dilución y agregar en tubos de ensayo ambar o previamente tapados con papel aluminio (tubos duplicado previamente enumerados).
- Añadir 5 ml de reactivo Folin- Ciocalteu al 10% v/v.
- Añadir 4 ml de la disolución de carbonato de sodio al 10% p/v.

- Homogenizar y mantener en oscuridad a temperatura ambiente por 1 hora.
- Medir la absorbancia a 765nm.

Mediante la curva patrón de ácido gálico se logra obtener la concentración de cada absorbancia obtenida mediante el equipo Espectrofotómetro (Spectronic Genesys 5, modelo 336001, NY, USA). Se determinó la cantidad de polifenoles totales por gramos de masa seca según la relación (11).

$$\text{Polifenoles} \left[ \frac{\text{mg EAG}}{\text{g masa seca}} \right] = X_c \cdot \frac{20}{m_e} \cdot \frac{1}{1 - X^w} \cdot F_d \quad (11)$$

Donde cada factor corresponde:

$X^w$ : Fracción de humedad en la muestra medida en porcentaje.

$X_c$ : Concentración de la muestra obtenida de la curva patrón de ácido gálico.

$m_e$ : Masa de la muestra para extracción de polifenoles.

$F_d$ : Factor de Dilución de la muestra.

#### 4.8. Determinación de capacidad antioxidante

Se utilizó el método DPPH descrito en la sección de “Antecedentes generales” punto 3.7.4., técnica que utiliza el radical libre 2,2-difenil-1-picrilhidrazilo, radical susceptible de reaccionar con compuestos antioxidantes a través de un proceso caracterizado por la cesión de un átomo de hidrógeno proporcionado por el agente antioxidante. Cuenta con una banda de absorción a 517 nm que se cuantifica en base a una curva patrón de trolox (Ver Anexo 2).

##### 4.8.1. Preparación de la muestra y curva patrón de Trolox

Para la extracción de los compuestos polifenólicos (agente antioxidante encargados de atrapar los radicales libres DPPH) se debe realizar el mismo procedimiento descrito en el punto 4.7.1.

Para la curva patrón, la concentración de trolox preparada es de 1 mM, para esto, se pesan 25,029 mg de trolox para un aforo de 100 ml, con metanol al 80%. Con esta solución se realiza cada punto de la curva en distintas concentraciones. La concentración del DPPH es de 0,1 mM en metanol puro, para un volumen de 200 ml de metanol puro se pesan 7,8864 mg de DPPH (Verificar que la absorbancia del DPPH sin extracto este en un rango de 1,025-1,045 medido en el espectrofotómetro a 517 nm).

Para obtener la absorbancia de los compuestos polifenólicos se realizó la siguiente metodología:

- Del extracto previamente filtrado y diluido por un factor de dilución 10, se toma 500 µL y se agrega en tubos ambar o tapados con papel aluminio (tubos en duplicado previamente enumerados).
- Luego se agrega 4,5 ml de la solución DPPH y se deja en obscuridad a temperatura ambiente por 30 minutos.
- Finalmente, se mide la absorbancia de la muestra a 517nm.

Mediante la curva patrón de Equivalentes de trolox se logró obtener la concentración de cada absorbancia obtenida mediante el equipo Espectrofotómetro (Spectronic Genesys 5, modelo 336001, NY, USA). Se determina la capacidad antioxidante por gramos de masa seca según la relación (12).

$$\text{Capacidad Antioxidante} \left[ \frac{\mu\text{mol Trolox}}{\text{g masa seca}} \right] = X_c \cdot \frac{20}{m_e} \cdot \frac{1}{1 - X^w} \cdot F_d \quad (12)$$

Donde cada factor corresponde a:

$X^w$ : Fracción de humedad en la muestra medida en porcentaje.

$X_c$ : Concentración de la muestra obtenida de curva patrón de Trolox.

$m_e$ : Masa de la muestra con capacidad antioxidante.

$F_d$ : Factor de Dilución de la muestra.

#### 4.9. Diseño de Experimentos

El diseño de experimentos busca determinar y comparar las propiedades funcionales del snack con y sin pretratamiento de impregnación a vacío con jugo de granada, por medio de 3 técnicas de secado, considerando una actividad de agua ( $a_w$ ) inferior a 0,4. Se analizó la viabilidad de los métodos de secado con y sin perforaciones en la muestra impregnada, con la finalidad de verificar si existen diferencias significativas en sus propiedades y cinética de secado. El control se fija con la muestra fresca y seca evaluando las propiedades polifenolicas y capacidad antioxidante de la fruta. Lo anterior se puede ver representado en el diagrama de bloques de la Figura 17.

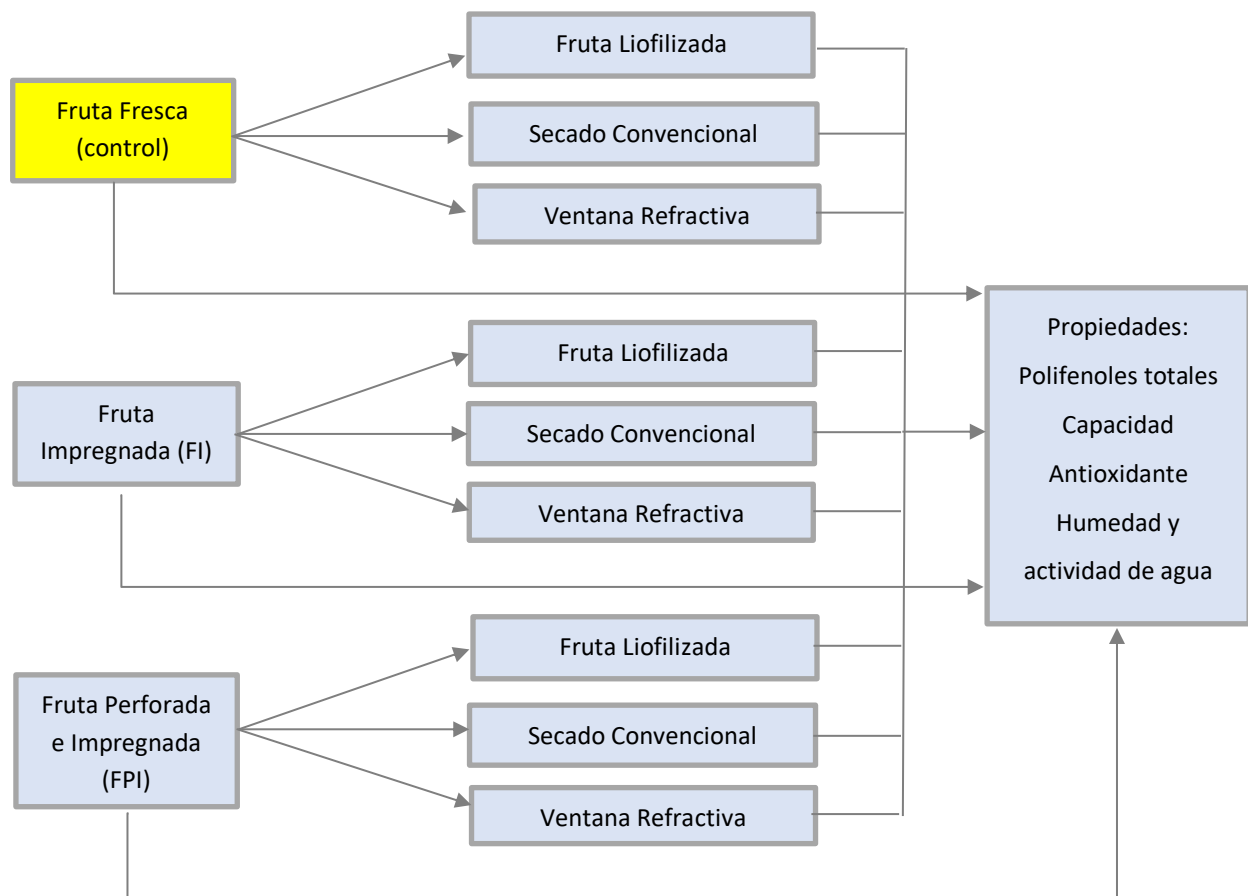


Figura 17: Diagrama de Bloques para diseño experimental.

Las tres condiciones que se deben considerar son: manzana fresca, manzana impregnada a vacío, y manzana perforada e impregnada a vacío, todas estas condiciones llevadas a deshidratación. Se realizó un total de 33 experimentos, clasificados en: 3 experimento por cada condición de muestra fresca (sin deshidratación) y 3 experimentos por cada condición en equipos de ventana refractiva y estufa, además de 2 experimentos por cada condición en el equipo de liofilización. Los experimentos previos para evaluar la cinética de secado, también considero 3 experimentos por equipo. Para medir las propiedades del alimento, se tiene en cuenta en todos los experimentos, un duplicado.

A continuación, en la Tabla 3 se detallan las réplicas realizadas para los diferentes experimentos que fueron llevados a cabo, para determinar las propiedades bioactivas. Es importante considerar las siguientes abreviaciones; SS- Sin Secar, VR - Ventana Refractiva, SE- Secado en estufa, LI – Liofilizador, FF - Fruta Fresca, FI -Fruta Impregnada, FPI – Fruta Perforada Impregnada.

*Tabla 3: Réplicas realizadas para los diferentes experimentos.*

| Equipo | Condición | Experimentos |
|--------|-----------|--------------|
| SS     | FF        | 3            |
| SS     | FI        | 3            |
| SS     | FPI       | 3            |
| VR     | FF        | 3            |
| VR     | FI        | 3            |
| VR     | FPI       | 3            |
| SE     | FF        | 3            |
| SE     | FI        | 3            |
| SE     | FPI       | 3            |
| LI     | FF        | 2            |
| LI     | FI        | 2            |
| LI     | FPI       | 2            |

Complementario a este diseño mediante un refractómetro digital Hanna Instruments (HI 96801, Woonsocket, USA) para el análisis de azúcar, se midió para el jugo de granada, los °Brix. Además,

por la metodología Folin Ciocalteu y DPPH se realizaron 2 experimentos en duplicado para determinar cantidad de polifenoles totales y capacidad antioxidante en mg EAG/ml y  $\mu\text{mol}$  Trolox/ml respectivamente.

#### 4.10. Determinación de coeficiente difusivo

Para determinar los coeficientes de difusión efectivos en el proceso de secado se evaluará el ajuste presentado por la segunda ley de Fick y la modelación según difusión anómala. El ajuste de las cinéticas de secado permite determinar los coeficientes de difusión en ventana refractiva y estufa tanto para fruta fresca, como fruta pretratada con y sin perforación. Para ambos ajustes se considerará el espesor promedio de las muestras.

Este ajuste se realizará mediante la herramienta *MATLAB* a través de una programación utilizando  $n$  términos de la serie ( $n=100$ ), descrita para la 2° Ley de Fick y modelo de difusión anómala, asumiendo una placa plana infinita. El software permite encontrar los valores de coeficiente de difusión, el parámetro alfa, la sumatoria de los errores al cuadrado y el  $R^2$  final.

#### 4.11. Análisis estadístico

La diferencia de los resultados fue determinada a través del análisis de varianza (ANOVA), utilizando el software STATGRAPHICS Centurion. La significancia estadística fue determinada con un nivel de probabilidad de 0,05 ( $p<0,05$ ), y con un nivel de confianza del 95%.

## 5. Resultados y Discusión

### 5.1. Cinética de secado en ventana refractiva

La Figura 18 muestra la cinética de secado para los discos de manzana deshidratados en ventana refractiva, donde especifica las 3 condiciones a las que se deshidrata el alimento. El detalle de los datos de humedad se presenta en el Anexo 7.

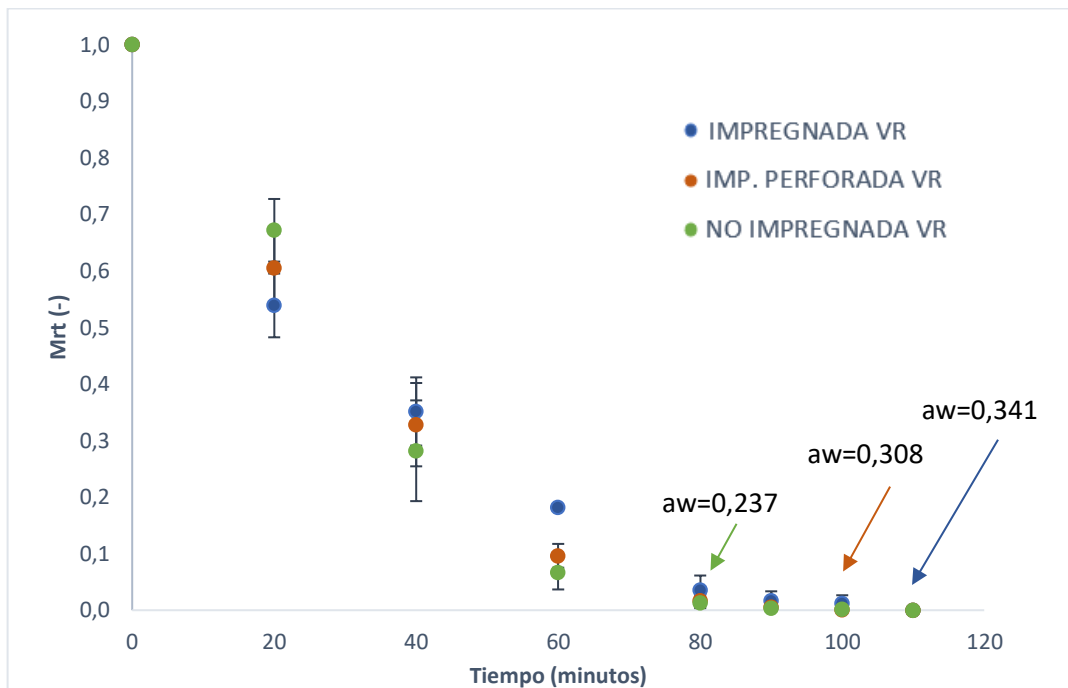


Figura 18: Cinética de secado en ventana refractiva a 75°C.

El gráfico permite identificar la cinética de secado para cada condición, el menor tiempo se puede observar para la manzana sin ningún tipo de tratamiento (manzana fresca), la cual alcanza una actividad de agua de 0,237 a los 80 minutos de deshidratación, cabe señalar que incluso a un tiempo menor el alimento puede alcanzar la actividad de agua definida como parámetro. Para la manzana con tratamiento de perforación e impregnación se aprecia en el gráfico, que a un tiempo de 100 minutos alcanza una actividad de agua de 0,308. El mismo análisis se lleva a cabo para la cinética de manzana solo con impregnación de jugo de granada, el cual alcanza una

actividad de agua de 0,341 a los 110 minutos, resultados similares se obtienen en la investigación de aperitivos de manzana con efecto probiótico mediante impregnación con *Lactobacillus Rhamnosus*, donde se desarrolló un snack de igual geometría y deshidratado en VR a 70°C, concluyendo una  $a_w$   $0,259 \pm 0,022$  a los 120 minutos de secado, con una humedad promedio final del 8% (Carrascosa, 2019) . El experimento control considera la condición inicial (manzana sin tratamiento y deshidratada), la cual presenta una pequeña diferencia con respecto a las muestras secas con tratamiento previo, sin embargo, todas las condiciones alcanzan el equilibrio a un tiempo de 90-100 minutos, un comportamiento parecido de cinética de secado obtiene la manzana pretratada con deshidratación osmótica y campo eléctrico, seca en VR (75°C), alcanzando el equilibrio a los 120 minutos y para manzana sin tratamiento a los 90 minutos aproximadamente (Hernández, 2017). Cabe señalar, que la actividad de agua cuando la manzana cuenta por perforaciones se obtiene minutos antes que, sin ellas, sin embargo, esta diferencia no es significativa dado que una actividad de agua inferior a 0,4 es suficiente para evitar el deterioro microbiológico del alimento (Jay, Loessner, & Golden, 2005).

## 5.2. Cinética de secado en estufa

La figura 19 muestra la cinética de secado para los discos de manzana deshidratados en estufa, donde se observan las 3 condiciones a las que se procesa el alimento. El detalle de los datos de humedad se presenta en el Anexo 7.

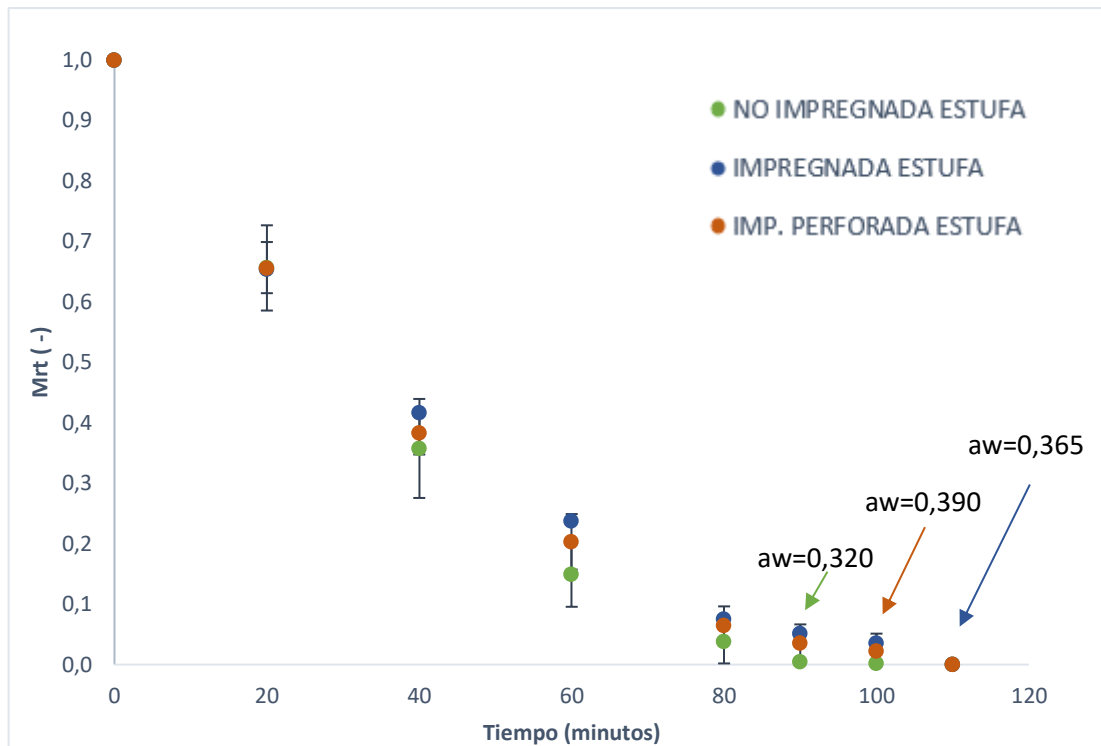


Figura 19: Cinética de secado en estufa a 75°C.

Al igual que el punto anterior la cinética se asemeja a lo ocurrido en ventana refractiva. El secado convencional muestra inicialmente el tiempo que demora la deshidratación para las muestras sin tratamiento, alcanzando una actividad de agua de 0,320 a los 90 minutos de secado, para los discos de manzana con tratamiento de perforación e impregnación a los 100 minutos, ya se puede observar un valor de  $a_w$  igual a 0,390, y finalmente con un tiempo de 110 minutos las muestras deshidratadas que fueron solo impregnadas cuentan con una  $a_w$  en torno a 0,365. De la misma forma, este análisis no percibe diferencias significativas para llegar al equilibrio de deshidratación, para condiciones de tratamiento previo. La misma tendencia grafica obtiene Hernández, para manzana pretratada y fresca, seca en túnel de aire (Hernández, 2017).

### 5.3. Comparación de cinética de secado entre estufa y ventana refractiva

La Figura 20 muestra la cinética de secado para fruta sin tratamiento deshidratada por ventana refractiva y estufa.

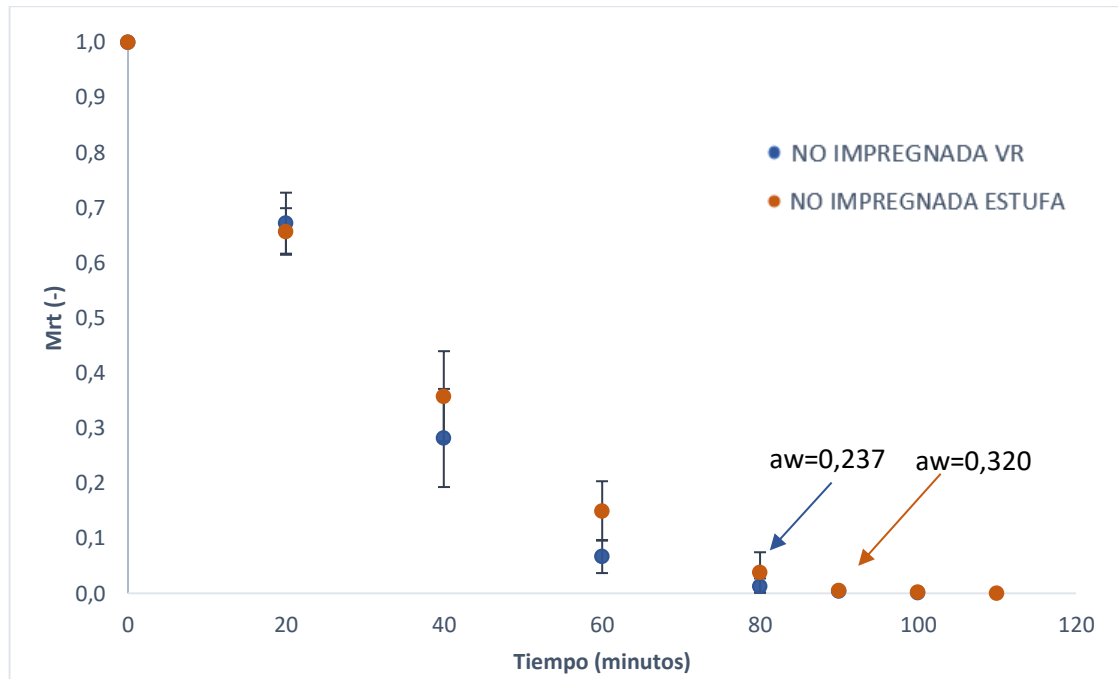


Figura 20: Cinética de secado para fruta sin tratamiento en ventana refractiva y estufa.

La condición inicial de los discos de manzana deshidratados está definida por el alimento sin un tratamiento previo. Esta condición se diferencia en un tiempo de 5 minutos entre el equipo de ventana refractiva y estufa para obtener una actividad de agua inferior a 0,4 se observa además que la actividad de agua que alcanza la muestra en VR es más baja en casi un 10%, se dúdese entonces que el equipo que requiere menos tiempo para lograr el objetivo base (actividad de agua inferior a 0,4) es ventana refractiva.

La Figura 21, compara la cinética de secado para la fruta en condiciones de impregnación a vacío, en los equipos de ventana refractiva y estufa.

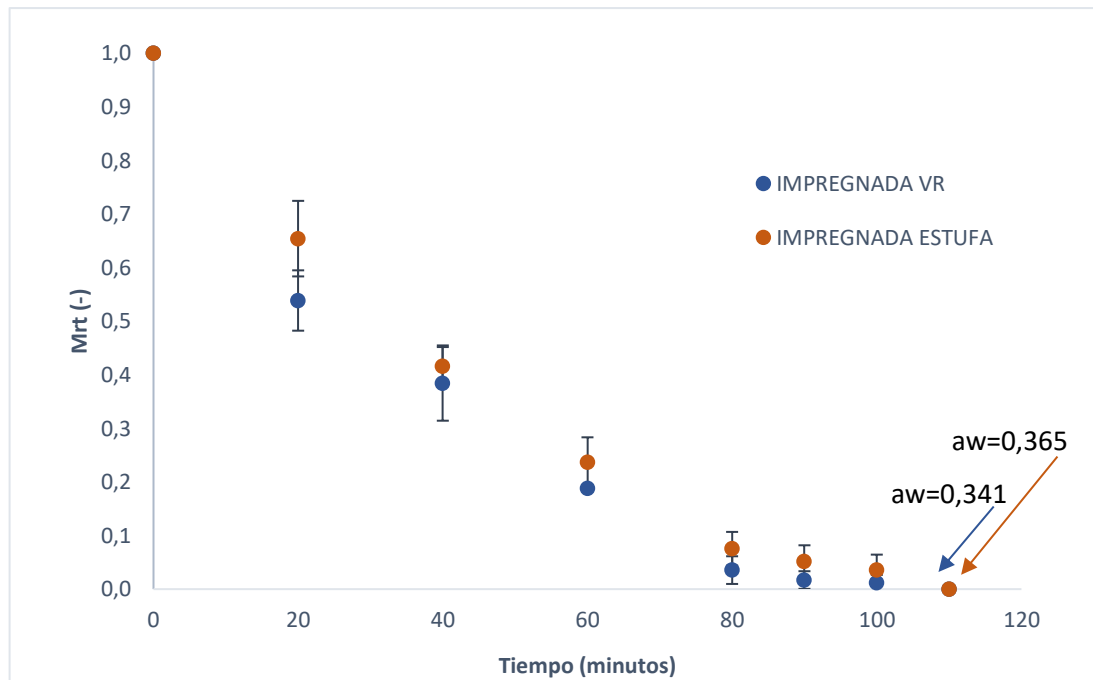


Figura 21: Cinética de secado para fruta con impregnación en ventana refractiva y estufa.

El gráfico muestra un equilibrio alrededor de los 100 minutos de deshidratación. Respecto a la actividad de agua, existe diferencia mínima en un mismo tiempo de secado (110 minutos) con un 7% de diferencia, con menor  $a_w$  la muestra obtenida por VR. Según la humedad obtenida por el método AOAC (Association of Official Analytical Chemists) para frutas, el equipo VR permite llegar a una humedad de  $7,09 \pm 0,59$  % para manzana con tratamiento de impregnación, en cambio para secado en estufa la humedad alcanza  $11,19 \pm 2,48$  % (Ver Anexo 7), resultado similar se encuentra en el estudio de Carrascosa donde la humedad, para manzana con tratamiento de impregnación a vacío en VR es de  $6,60 \pm 0,10$  % y para estufa  $8,30 \pm 2,10$  %, concluyendo una mayor humedad en el secado convencional (Carrascosa, 2019). La tendencia gráfica de la cinética de secado a  $75^\circ\text{C}$  es comparable al estudio realizado por Hernández, para fruta pretratada y seca en VR a  $75^\circ\text{C}$ , con un equilibrio de secado a los 110 minutos (Hernández, 2017).

La Figura 22 muestra la comparación de la fruta con tratamiento de micro perforación e impregnación, en equipo de ventana refractiva y estufa.

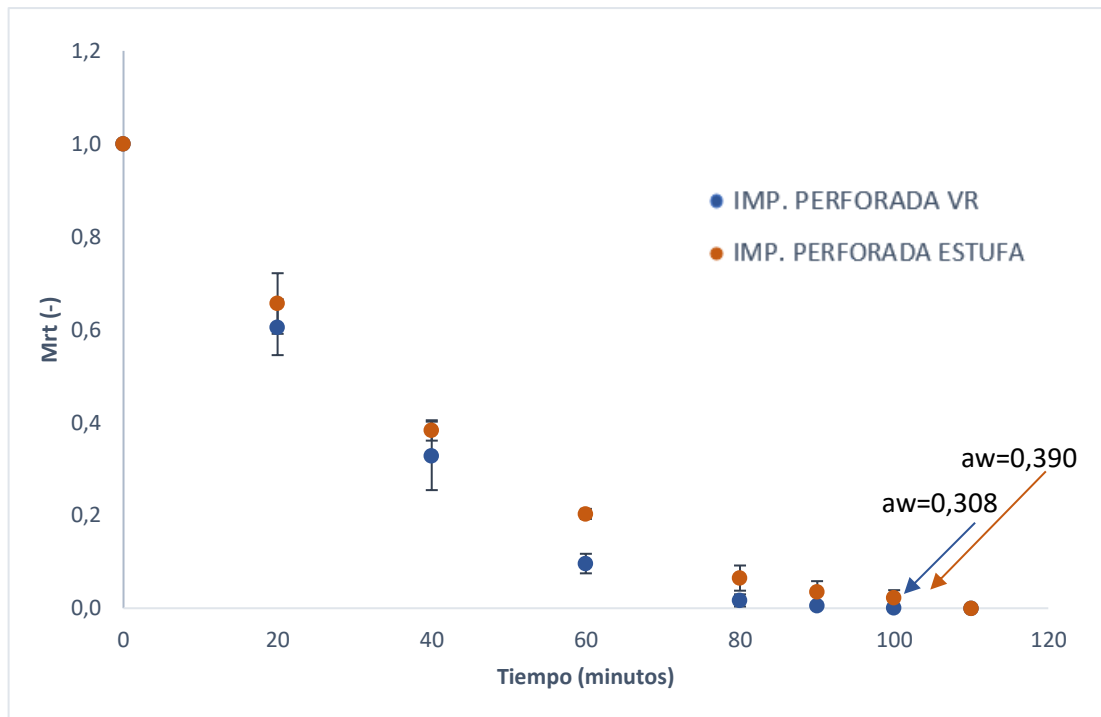


Figura 22: Cinética de secado para fruta con perforación e impregnación en ventana refractiva y estufa.

El gráfico en ambos métodos de secado, señala que la deshidratación alcanza el equilibrio a los 90- 100 minutos, con una actividad de agua a los 100 minutos alrededor de 0,400 y 0,300 cumpliendo el parámetro definido. Sin embargo, el equipo que logra una actividad de agua más baja es VR. Respecto a la humedad final del alimento la fruta perforada, seca en VR obtiene un valor de  $7,96 \pm 1,07 \%$  en cambio, para secado convencional logra un  $16,67 \pm 2,62 \%$  (Ver Anexo 7), este análisis muestra que, al mismo tiempo de secado, el equipo más eficiente es ventana refractiva logrando una humedad más baja. El mismo análisis concluye Carrascosa, para manzana con tratamiento y perforación en VR, humedad final de  $6,60 \pm 0,10 \%$ , en cambio para secado convencional, la humedad final es  $11,10 \pm 2,00 \%$  (Carrascosa, 2019).

#### 5.4. Tamaño de perforaciones

El tamaño de perforación fue definido en  $300 \mu\text{m}$  (Araya, 2019), este diámetro se obtiene con la metodología descrita en el punto 4.3. lo que resultó un radio equivalente a  $148,8025 \pm 16,5289 \text{ mm}$ .

## 5.5. Propiedades jugo de granada

Se determina para el jugo de granada el porcentaje en °Brix, junto a los polifenoles totales mediante el método folin ciocalteau y Capacidad antioxidante por método DPPH, los cuales se presentan en la Tabla 4.

*Tabla 4: Propiedades Jugo de granada AFE.*

| Parámetro                   | Cantidad                      |
|-----------------------------|-------------------------------|
| Contenido de azúcar         | 12 ± 0,3 ° Brix               |
| Polifenoles totales (PT)    | 4,283 ± 0,111 mg EAG/ml       |
| Capacidad Antioxidante (CA) | 16,341 ± 0,733 μmol Trolox/ml |

Los PT y la CA son datos comparables a un estudio realizado de la composición de compuestos bioactivos de jugo de granada (Labbé, et al., 2016). Este análisis se lleva a cabo con la finalidad de obtener las propiedades del jugo de granada que se utiliza para la impregnación, pero no se considera una comparación de resultados con las muestras impregnadas, ya que todas ellas se encuentran analizadas por gramos de masa seca.

## 5.6. Contenido de polifenoles totales

La Figura 23 muestra los polifenoles totales obtenidos mediante el método Folin Ciocalteau para todas las condiciones de la fruta deshidratada y fresca.

El grafico se expresó en miligramos de equivalentes de ácido gálico por gramos de masa seca (mg EAG/ g masa seca) para medir los polifenoles totales de todas las condiciones según el equipo de deshidratación. La Figura 23 vista de izquierda a derecha muestra, la cantidad de polifenoles totales para manzana fresca, seguido de la manzana deshidratada en ventana refractiva, liofilizador y finalmente estufa. Todos ellos con tres condiciones asociadas las cuales son: 1- manzana sin tratamiento, 2- con tratamiento de impregnación a vacío y 3- tratamiento de micro perforación e impregnación a vacío.

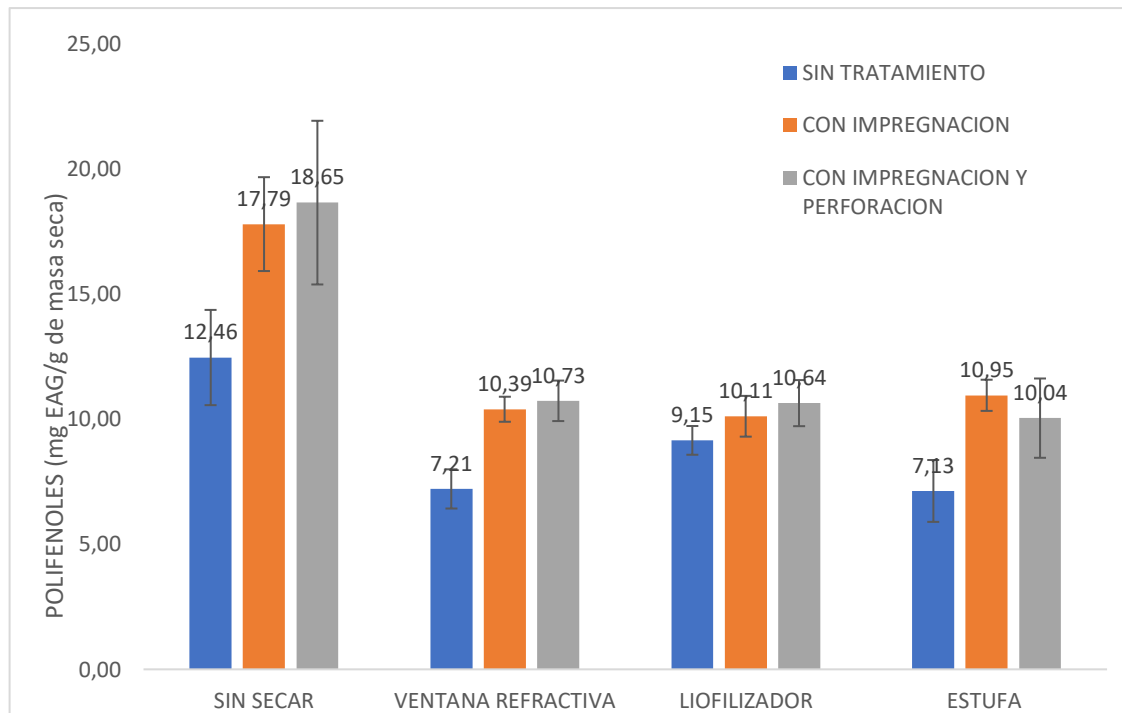


Figura 23: Contenido de polifenoles totales para todas las condiciones de fruta deshidratada y fresca.

Se puede apreciar, que no existen diferencias significativas entre los 3 métodos ocupados para deshidratación, específicamente para las 2 últimas condiciones de tratamiento mencionadas (2 y 3) donde su valor se encuentra en torno a 10,11 – 10,95 mg EAG/g de masa seca, entre los equipos de secado. Resultados similares se encuentran en el estudio realizado por Ferrada, donde las muestras con tratamiento de impregnación de jugo de granada deshidratadas en estufa y liofilizador, no presenta diferencias significativas en polifenoles totales (Ferrada, 2016). En otros reportes de investigación para cascara de granada seca no hubo diferencia estadística en el contenido de fenoles totales entre secado al aire y muestras liofilizadas (Al-Rawahi, Rahman, Guizani, & Essa, 2013). Sin embargo, existen diferencias significativas entre las muestras que solo están deshidratadas (sin ningún tipo de tratamiento) y las con algún tratamiento previo, esto se explica debido a la capacidad que adquiere la manzana para retener compuestos polifenólicos dentro de su matriz porosa (Rosenthal, et al., 2018), se demuestra con este efecto que la impregnación a vacío permite aumentar las propiedades funcionales del alimento tratado. Demostrado que el uso de tratamientos de impregnación ayuda en la retención de compuestos

polifenólicos, cuando se compara con muestras frescas (Moreno, et al., 2016). La comparación entre fruta fresca y fruta deshidratada (sin tratamiento), entrega una reducción del 43 % en polifenoles totales para VR, 27 % para fruta liofilizada y 43 % para fruta seca en estufa. Existen estudios en los que la variedad granny Smith puede reducir en hasta un 27% el contenido total de polifenoles en tratamientos de impregnación al vacío, siendo la mayoría de estos procianidinas y epicatequinas (Blanda, et al., 2008), en este caso, estas moléculas estarían siendo reemplazadas, en menor cantidad, por polifenoles provenientes del jugo de granada, disminuyendo la pérdida total. Los polifenoles cuando el alimento es deshidratado, para la manzana que inicialmente tiene alrededor del 85% de humedad, con la cual alcanza valores hasta  $18,65 \pm 3,27$  mg EAG/g masa seca (ejemplificando el caso de la manzana perforada e impregnada sin deshidratación), disminuyen aproximadamente 40% para la muestra deshidratada con la misma condición de impregnación y perforación, este cambio se puede atribuir a que los compuestos fenólicos son altamente inestables a procesos térmicos ya que se transforman rápidamente en varios productos, debido principalmente al daño de las células vegetales, causando cambios bioquímicos y químicos (Henríquez, Almonacid, Lutz, Simpson, & Valdenegro, 2013). Los polifenoles son compuestos altamente reactivos y buenos sustratos para diversas enzimas, el proceso bioquímico más importante es la oxidación enzimática, que comienza tan pronto como se rompe la integridad de la célula, pero otros tipos de enzimas, tales como esterasas, glicosidasas y descarboxilasas, también puede catalizar transformaciones y degradaciones de compuestos polifenólicos (Cheynier, 2005).

Respecto a la microperforación laser no se perciben diferencias significativas en sus propiedades, por lo tanto, no aumenta la calidad del producto deshidratado. Esto se puede atribuir al tiempo de impregnación a vacío que se ocupa en esta investigación, donde la saturación de líquido puede estar afectada en un tiempo inferior a 5 minutos, lo que provoca que ambas condiciones alcancen la misma cantidad de polifenoles totales, dada la alta porosidad de la fruta (Rosenthal, et al., 2018).

## 5.7. Capacidad antioxidante

La Figura 24 muestra la capacidad antioxidante obtenidos mediante el método DPPH para todas las condiciones de la fruta deshidratada y fresca. Para el grafico mostrado, el orden de análisis y condiciones es la misma que fue mostrada en la Figura 23 de polifenoles totales.

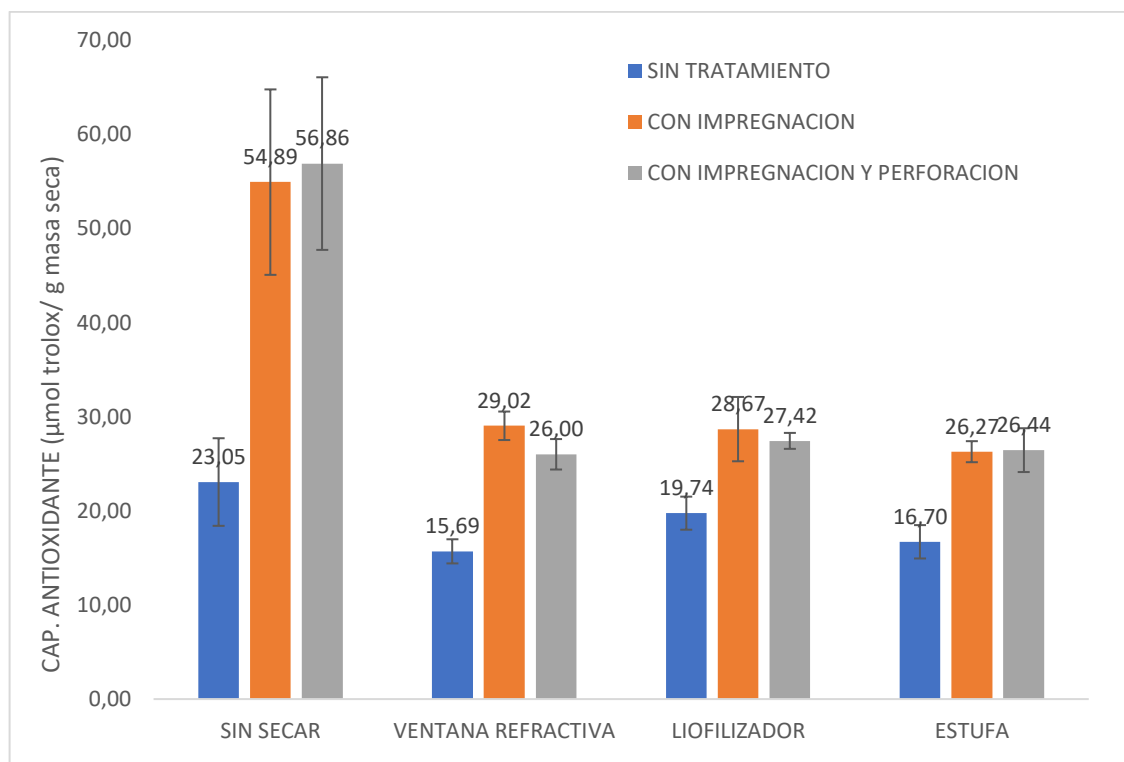


Figura 24: Capacidad Antioxidante para todas las condiciones de fruta deshidratada y fresca.

La determinación de capacidad antioxidante en el alimento está determinada en unidades de micro mol de trolox por gramos de masa seca ( $\mu\text{mol trolox/g}$  masa seca). En los tres métodos de secado, considerando la condición de impregnación, los resultados no presentan diferencias significativas, por lo tanto, los 3 tratamientos de deshidratación son igual de efectivos en la capacidad antioxidante que produce la muestra polifenólica. Los cambios en las propiedades antioxidantes generales de los alimentos durante el procesamiento, se pueden atribuir a la suma de los eventos diferentes y, a veces opuestos, como la pérdida de antioxidantes naturales y la

formación de nuevos compuestos que tienen actividad prooxidante o antioxidante, dependiendo de las tasas relativas de estas reacciones, la actividad antioxidante general puede disminuir, aumentar o permanecer sin cambios durante el procesamiento de alimentos (Lavelli & Vantaggi, 2009; Henríquez, Almonacid, Lutz, Simpson, & Valdenegro, 2013). En estudios previos realizados por Lavelli, se descubrió que las manzanas secas y los pures de manzana tienen una menor actividad antioxidante con respecto a las frutas frescas correspondientes, además la investigación muestra que la actividad antioxidante del pure de manzana disminuyó durante el almacenamiento (Lavelli & Vantaggi, 2009). La comparación entre la fruta sin tratamiento (control) y con tratamiento de impregnación, ambas deshidratadas, percibe un aumento del 46% de capacidad antioxidante para VR, 31% para la fruta liofilizada y 37 % para la fruta seca en estufa, resultado comparable con el estudio realizado por Ferrada, con un 37 % de aumento en capacidad antioxidante con tratamiento previo de impregnación a vacío y campo eléctrico (Ferrada, 2016). Se demuestra con este efecto que la impregnación a vacío permite aumentar las propiedades funcionales del alimento tratado, que se explica por la solución rica en polifenoles que se encuentran en el jugo de granada (Li, et al., 2015), la cual es impregnada mediante vacío en la matriz porosa de la fruta.

Respecto a las muestras con microperforación laser, al igual que en polifenoles totales, no existen diferencias significativas respecto a la fruta impregnada sin perforación, tanto para la fruta fresca, como para la fruta deshidratada. Este efecto también se explica por el tiempo de secado que tienen las muestras deshidratadas, donde no existen diferencias significativas respecto a la fruta impregnada sin perforación, además de esto, los objetivos que busca la micro perforación laser en esta investigación es disminuir los tiempos de secado (Fujimaru, Ling, & Morrissey, 2012). Se concluye entonces, que la calidad del producto final no se ve afectado por la micro perforación, una explicación respecto a esta conclusión es que la manzana impregnada con y sin perforaciones, se satura de líquido (solución de impregnación) antes de finalizar los 5 minutos de vacío, donde ambas condiciones saturadas no logran recibir más jugo de granada dentro de su matriz porosa, el mismo análisis fue concluido para polifenoles totales.

### 5.8. Coeficiente de difusión para ventana refractiva y estufa

La Tabla 5 presenta el modelo propuesto por la 2° Ley de Fick. Mientras que, la Tabla 6 detalla los parámetros para el modelo de difusión anómala (coeficiente de difusión y  $\alpha$ ) según el tratamiento y equipo de secado a una temperatura fija de 75°C. Adicionalmente, el Anexo 6 muestran los ajustes de forma gráfica para todas las condiciones.

Tabla 5: Resultados de coeficiente de difusión para modelo de la 2ª Ley de Fick en VR y estufa.

| 2° Ley de Fick    | Deff m <sup>2</sup> /s ± | Desv                  | R <sup>2</sup> | SEE    |
|-------------------|--------------------------|-----------------------|----------------|--------|
| Verde VR          | 4,58E-07 ±               | 3,81E-07 <sup>A</sup> | 0,9345         | 0,0734 |
| Imp. VR           | 2,91E-07 ±               | 1,68E-07 <sup>A</sup> | 0,9625         | 0,0987 |
| Imp. Perf. VR     | 3,08E-07 ±               | 1,87E-07 <sup>A</sup> | 0,9597         | 0,0987 |
| Verde ESTUFA      | 3,39E-07 ±               | 2,41E-07 <sup>A</sup> | 0,9465         | 0,0734 |
| Imp. ESTUFA       | 2,22E-07 ±               | 1,29E-07 <sup>A</sup> | 0,9568         | 0,0987 |
| Imp. Perf. ESTUFA | 2,88E-07 ±               | 1,87E-07 <sup>A</sup> | 0,9526         | 0,0987 |

\* Letra mayúscula diferente indica un efecto estadísticamente significativo con un 95,0% de nivel de confianza

Tabla 6: Resultados de coeficiente de difusión para modelo de difusión anómala en VR y estufa.

| Difusión Anómala  | Deffm <sup>2</sup> /s <sup>α</sup> ± | Desv                  | α ±      | Desv                | R <sup>2</sup> | SEE     |
|-------------------|--------------------------------------|-----------------------|----------|---------------------|----------------|---------|
| Verde VR          | 2,87E-14 ±                           | 6,13E-15 <sup>B</sup> | 2,0376 ± | 0,0111 <sup>A</sup> | 0,9987         | 0,00160 |
| Imp. VR           | 5,59E-12 ±                           | 4,20E-12 <sup>C</sup> | 1,6809 ± | 0,0336 <sup>B</sup> | 0,9972         | 0,00580 |
| Imp. Perf. VR     | 6,10E-12 ±                           | 4,95E-12 <sup>C</sup> | 1,6809 ± | 0,0336 <sup>B</sup> | 0,9958         | 0,00580 |
| Verde ESTUFA      | 1,85E-14 ±                           | 5,29E-15 <sup>B</sup> | 2,0376 ± | 0,0111 <sup>A</sup> | 0,9987         | 0,00160 |
| Imp. ESTUFA       | 3,69E-12 ±                           | 2,50E-12 <sup>C</sup> | 1,6809 ± | 0,0336 <sup>B</sup> | 0,9985         | 0,00580 |
| Imp. Perf. ESTUFA | 4,93E-12 ±                           | 3,21E-12 <sup>C</sup> | 1,6809 ± | 0,0336 <sup>B</sup> | 0,9986         | 0,00580 |

\* Letra mayúscula diferente indica un efecto estadísticamente significativo con un 95,0% de nivel de confianza.

Las Tablas 5 y 6 como ya se mencionó, presentan los resultados para las muestras secas en ventana refractiva y estufa tanto para el modelo de difusión anómala y 2° Ley de Fick. Para ventana refractiva la fruta con tratamiento de impregnación, deshidratada a 75°C presenta un valor de R<sup>2</sup> de 0,9625 mientras que este parámetro para el modelo de difusión anómala muestra un mejor ajuste con un valor de R<sup>2</sup> 0,9972. El modelo de difusión anómala es el que presenta el mejor ajuste para todas las condiciones realizadas en la investigación, se concluyó el mismo análisis para la deshidratación de manzana en ventana refractiva, con pretratamiento de deshidratación osmótica y campo eléctrico moderado realizado por Hernández, con R<sup>2</sup> 0,9565

para fruta pretratada ajustada a modelo predicho por la 2ª Ley de Fick y  $R^2 0,9878$  para la misma condición ajustado al modelo de difusión anómala, ambas deshidratadas en VR (75°C) (Hernández, 2017).

Analizando la Tabla 6, respecto al análisis *ANOVA* el coeficiente de difusión presenta una diferencia estadísticamente significativa comparando las muestras con tratamiento y sin tratamiento, esto se explica por la matriz porosa del alimento, la manzana impregnada llena su poro de líquido, permitiendo que este difunda más rápido formando una película superficial que obtiene un cambio de estado en menos tiempo, en cambio la manzana sin tratamiento, tiene su porosidad con agua solo al inicio del mismo, donde demora más en recorrer el mismo camino, ya que debe pasar por un cambio de estado (evaporación) para llegar a la superficie del alimento. El transporte masivo de agua puede ocurrir de dos maneras: el agua líquida puede ser transportada a la superficie y luego eliminada como vapor por evaporación o puede ser evaporada dentro del producto en la interface líquido-vapor y transportada como vapor a la superficie (Ramakrishnan, 2017). Según esto existen diferentes mecanismos de transporte para líquidos y vapores. Siendo los más importantes la difusión y el transporte por capilaridad. Por otro lado, todas las condiciones analizadas por modelo de difusión anómala tienen un comportamiento super difusivo ( $\alpha > 1$ ). El parámetro  $\alpha$  es el mismo valor para todas las condiciones con tratamiento, esto se explica por ser el mismo alimento y por lo tanto, igual matriz porosa, sin embargo, la manzana sin tratamiento inicia con una humedad más baja (82%) que el resto de las condiciones, lo conlleva a un resultado distinto de  $\alpha$ .

En cuanto a los valores de coeficientes de difusión encontrados, estos no presentan diferencias significativas para condiciones que indican tratamiento previo. Estos datos son comparables con reportes publicados por otros autores, un ejemplo es la influencia en rodajas de pure de papaya de 4 mm de espesor procesadas por tecnología de ventana refractiva a 70°C, los resultados del coeficiente de difusión están alrededor de 3,166- 7,681 con un orden de magnitud de  $10^{-10}$  (Ocoro, 2013). Otra investigación analiza las influencias de la temperatura del aire de secado y

comportamiento de deshidratación de rodajas de manzana en una secadora convectiva a temperatura de 50, 60 y 70 ° C, donde la difusividad efectiva de humedad se encuentra en el rango de  $6,750 \times 10^{-10}$  y  $1,280 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s (BEIGI, 2016).

### 5.9. Aspecto de la fruta impregnada y deshidratada

La Figura 25 y 26 muestra la diferencia en aspecto, color y forma para la investigación realizada, que incluye el aspecto para muestra impregnada a vacío y para las muestras con deshidratación mediante las tres tecnologías de secado.



Figura 25: Fotografías del aspecto inicial de la manzana.

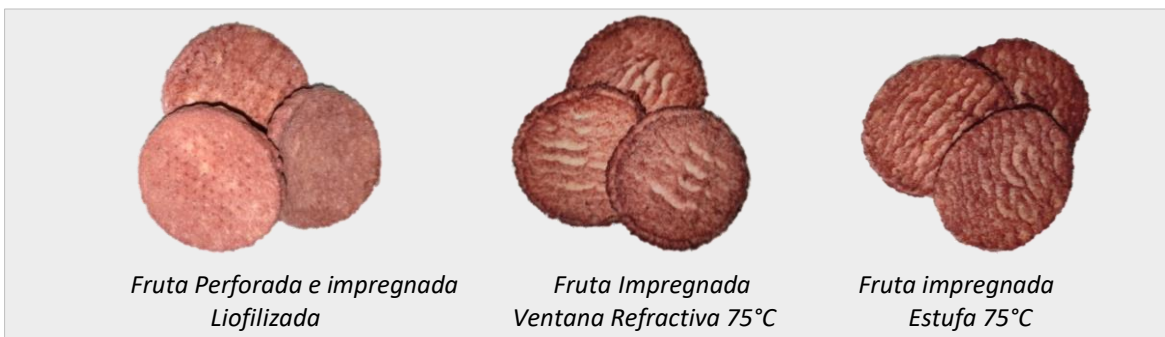


Figura 26: Fotografías del aspecto final de la fruta deshidratada.

En la Figura 25 Inicialmente se puede diferenciar el aspecto entre la fruta fresca, e impregnada a vacío, modificando su color y sabor por causa del tratamiento de jugo de granada. Para la Figura 26 el encogimiento, distorsiones de forma, intensificación natural del color y textura, son las propiedades más evidentes que se pueden visualizar en las imágenes de los productos secos. El

aspecto de la muestra liofilizada es totalmente diferente a las muestras deshidratadas en las otras 2 tecnologías, donde su color, forma y espesor se mantienen similar a la fruta fresca impregnada, no así en los otros 2 métodos. Cabe señalar que la imagen mostrada, es una muestra con tratamiento de, micro perforación e impregnación, donde los poros se aprecian en la primera imagen de la Figura 26, ya que la muestra no se ve afectada por el encogimiento, el snack obtenido sin perforación toma el mismo aspecto, pero sin poros. Para los otros métodos de secado no se diferencia entre muestras que se encuentran con y sin perforación, es por esta razón que solo se muestran las imágenes respecto a las muestras con tratamiento de impregnación, tanto para los equipos de ventana refractiva y estufa. Se concluye entonces, que la deshidratación para los dos últimos métodos mencionados no refleja diferencias entre aspecto color y forma, el encogimiento es evidente, alcanzando una reducción en espesor de 2 mm. Esto afecta principalmente en la rapidez de rehidratación del alimento, donde no se ve afectada la muestra liofilizada, ya que su capacidad de rehidratación es inmediata (PRODAO, 2009). Sin embargo, el costo del equipo de secado por ventana refractiva es aproximadamente un tercio de un liofilizador, mientras que los costos de energía para operar por ventana refractiva son menos de la mitad de los equipos de liofilización (Nindo & Tang, 2007).

## 6. Conclusiones

Los resultados obtenidos en este estudio muestran que la deshidratación de manzana de variedad Granny Smith, para las tres tecnologías de secado, no muestran diferencias significativas en las propiedades nutricionales del alimento, conservan de manera similar los compuestos bioactivos que fueron estudiados y analizados en esta investigación, sin embargo la impregnación de jugo de granada a vacío, implica un aumento en las propiedades bioactivas de la fruta fresca, alcanzando un 30% en aumento de polifenoles totales y 58% de capacidad antioxidante, lo que conlleva además, menos pérdida de propiedades bioactivas al deshidratar el alimento.

El modelo más apropiado para predecir las curvas de secado en ventana refractiva y estufa, es el modelo de difusión anómala, el cual se ajusta a los datos experimentales de mejor manera que lo predicho por el modelo matemático de la segunda Ley de Fick, para todas las condiciones se requiere un tiempo de 110 minutos máximo para alcanzar el equilibrio, donde todas estas cumplen el objetivo de una actividad de agua inferior a 0,4. La microperforación láser, no presenta cambios significativos en la deshidratación y en la calidad final del snack desarrollado.

El equipo de liofilización permite alcanzar una humedad final de 2% a 3%, con una actividad de agua alrededor de 0,17- 0,21. Este resultado muestra que la liofilización de la fruta con la característica buscada se puede encontrar incluso en un tiempo menor de secado. Sin embargo, los costos asociados a esta tecnología, en conjunto a los tiempos largos de deshidratación, trae una desventaja, respecto a los otros métodos. Se concluye entonces que el mejor método para la deshidratación térmica de manzana es por ventana refractiva, la cual es una técnica de secado que permite disminuir los costos asociados a la energía, además de tener una buena capacidad de retención de calidad en la fruta. El aspecto visualmente es similar al snack obtenido por estufa, pero la humedad alcanzada por VR está en el rango de 6%-7%, no así en estufa con valores alrededor de 10%-12%, lo mismo ocurre con la actividad de agua, la cual es siempre inferior en ventana refractiva para un mismo tiempo de secado.

## Referencias

- Al-Rawahi, A. S., Rahman, M. S., Guizani, N., & Essa, M. M. (2013). Chemical Composition, Water Sorption Isotherm, and Phenolic Contents in Fresh and Dried Pomegranate Peels. *Drying Technology*, 31, 257–263.
- Amarowicz, R., Carle, R., Dongowski, G., Durazzo, A., Galensa, R., Kammerer, D., & Piskula, M. K. (2008). Influence of postharvest processing and storage on the content of phenolic acids and flavonoids in foods. *Molecular Nutrition & Food Research*. 53(S2).
- Araya, E. (2019). Efecto de la Microperforación Láser en el Pretratamiento Osmótico de Deshidratación de Manzanas Granny Smith en Ventana Refractiva. Valparaíso.
- Baeghballi, V., Niakousari, M., & Farahnaky, A. (2016). Refractance Window drying of pomegranate juice: Quality retention and energy efficiency. *Food Science and Technology*, 66, 34-40.
- Baeghballi, V., Niakousari, M., & Farahnaky, A. (March 2016). Refractance Window drying of pomegranate juice: Quality retention and energy efficiency. *Food Science and Technology*, 66, 34-40.
- BEIGI, M. (2016). Energy efficiency and moisture diffusivity of apple slices during convective drying. *Food Science and Technology*, 36, 145–150.
- Bilanski, W., & Ferraz, A. (1991). Processing agricultural materials with aCO2 laser: a liner model. Intl. inter Meeting, Chicago, Illinois, Estados Unidos de America.
- Blanda, G., Cerretani, L., Bendini, A., Cardinali, A., Scarpellini, A., & Lercker, G. (2008). Effect of vacuum impregnation on the phenolic content of Granny Smith and Stark Delicious frozen apple cvv. *Eur Food Res Technol*, 226, 1229-1237.
- Carrascosa, A. (2019). OBTENCIÓN DE APERTIVOS DE MANZANA CON EFECTO PROBIÓTICO MEDIANTE IMPREGNACIÓN CON LACTOBACILLUS RHAMNOSUS. 16-17.
- Cheyrier, V. (2005). Polyphenols in foods are more complex than often thought. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 81, 223–229.
- Chiralt, A., Fito, P., Barat, J., Andrés, A., González-Martínez, C., Escriche, I., & Camacho, M. (2001). Use of vacuum impregnation in food salting process. *Journal of Food Engineering*, 49(2-3), 141–151.
- Crank, J. (1975). The Mathematics of Diffusion. *Oxford University: Clarendon Press*.
- Cruz, B. T. (17 de Mayo de 2019). ODEPA "Oficina de estudios y políticas agrarias". Obtenido de Boletín de Frutas y Hortalizas procesadas: <https://www.odepa.gob.cl/wp-content/uploads/2019/05/BFrutaprocada052019.pdf>
- Degraeve, P., Saurel, R., & Coutel, Y. (2003). Vacuum Impregnation Pretreatment with Pectinmethylesterase to Improve Firmness of Pasteurized Fruits. *Journal of Food Science*, 68(2), 716–721.
- Eroski Consumer . (2019). Obtenido de Manzana y sus propiedades: <https://frutas.consumer.es/manzana/propiedades>
- Eroski Consumer. (2019). Obtenido de Granda y sus propiedades: <http://frutas.consumer.es/granada/propiedades>

- Escobedo, Z., García, R., Valdez, A., Mújica-Paz, H., & Welte-Chanes, J. (2018). *Fruit Preservation and Design of Functional Fruit Products by Vacuum Impregnation*. In: Rosenthal A., Deliza R., Welte-Chanes J., Barbosa-Cánovas G. (eds) *Fruit Preservation*. Food Engineering Series. New York, NY: Springer.
- Etxeberria, E., Miller, W., & Achor, D. (2006). Anatomical and morphological characteristics of laser etching depressions for fruit labeling. *Horttechnology*, 16, 527-532.
- Ferrada, G. (2016). *Desarrollo de un snack de manzana enriquecido con jugo de granada mediante la impregnación al vacío y aplicación de perforación láser*. .
- Ferraz, A. C., Mittal, G. S., Bilanski, W. K., & Abdullah, H. A. (2007). Mathematical modeling of laser based potato cutting and peeling. *Biosystems*, 90, 602–613.
- Fujimaru, T., Ling, Q., & Morrissey, M. T. (2012). Effects of Carbon Dioxide (CO<sub>2</sub>) Laser Perforation as Skin Pretreatment to Improve Sugar Infusion Process of Frozen Blueberries. *Journal of Food Science*, 77(2), 45–51.
- García Martínez, E., Fernández, I., & Fuentes, A. (2015). *"Determinación de polifenoles totales por el método de Folin-Ciocalteu"*. España: Universidad Politécnica de Valencia.
- Gomez, V., Shackelford, T., Tocchi, A., & Rowland-Goldsmith, M. (2014). *"The effect of pomegranate juice extract on the Hedgehog signaling pathway in pancreatic cancer"*. Retrieved from Journal of Undergraduate Work: Vol. 1 : No. 2, Article 7: <https://digitalcommons.chapman.edu/e-Research/vol1/iss2/7>
- Guija, E., Inocente, M., Ponce, J., & Zarzosa, E. (2015). Evaluación de la técnica 2,2-Difenil-1-Picrilhidrazilo (DPPH) para determinar capacidad antioxidante. *Horiz Med*, 15(1): 57-60.
- Henríquez, M., Almonacid, S., Lutz, M., Simpson, R., & Valdenegro, M. (2013). Comparison of three drying processes to obtain an apple peel food ingredient. *CyTA - Journal of Food*, 11, 127–135.
- Hernández, Y. (2017). *Deshidratación de manzanas tipo Granny Smith en ventana refractiva con pretratamiento de deshidratación osmótica y campo eléctrico moderado*. Valparaíso .
- Instruments, I. (2019). *Rotronic leading in humidity Measurement*. Retrieved from <https://docplayer.es/6674865-Medicion-de-la-actividad-del-agua.html>
- Jay, J. M., Loessner, M. J., & Golden, D. A. (2005). *Modern Food Microbiology, Food Science Text Series*. Springer, Boston, MA, 445-446.
- Jugo AFE. (2019). Obtenido de <https://www.jugoafe.cl/jugo-de-granada-24-botellas-afe-200-ml>
- Kaur, C., & Kapoor, H. C. (2001). Antioxidants in fruits and vegetables - the millennium's health. *International Journal of Food Science and Technology*, 36(7), 703–725.
- Kedare, S. B., & Singh, R. P. (2011). Genesis and development of DPPH method of antioxidant assay. *International Journal of Food Science and Technology*, 48(4), 412–422.
- Labbé, M., Ulloa, P., López, F., Sáenz, C., Peña, A., & Salazar, F. (2016). Characterization of chemical compositions and bioactive compounds in juices from pomegranates ('Wonderful', 'Chaca' and 'Codpa') at different maturity stages. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 76(4), 479-486.
- Lavelli, V., & Vantaggi, C. (2009). Rate of Antioxidant Degradation and Color Variations in Dehydrated Apples as Related to Water Activity. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57, 4733–4738.

- Lewicki, P. P. (2006). Design of hot air drying for better foods. *Trends in Food Science & Technology, Elsevier*, 17, 153–163.
- Li, X., Wasila, H., Liu, L., Yuan, T., Gao, Z., Zhao, B., & Ahmad, I. (2015). Physicochemical characteristics, polyphenol compositions and antioxidant potential of pomegranate juices from 10 Chinese cultivars and the environmental factors analysis. *Food Chemistry*, 175, 575–584.
- Lozano, J. E. (2008). Fruit Manufacturing. *Food Engineering Series*, 75, 133-134.
- Maupoey, P. J., Grau, A. M., Sorolla, A. M., & Baviera, J. M. (2001). *Introducción al secado de alimentos por aire caliente: Universitat Politècnica de Valencia*. Zaragoza, España.
- Mena, P., García-Viguera, C., Navarro-Rico, J., Moreno, D. A., Bartual, J., Saura, D., & Martí, N. (2011). *Phytochemical characterisation for industrial use of pomegranate (Punica granatum L.) cultivars grown in Spain*. Spain: Journal of the Science of Food and Agriculture, 91(10), 1893–1906.
- Moreno, J., Gonzales, M., Zuñiga, P., Petzold, G., Mella, K., & Muñoz, O. (2016). Ohmic heating and pulsed vacuum effect on dehydration processes and polyphenol component retention of osmodehydrated blueberries (cv. Tifblue). *Innovative food science and emerging technologies*, 36, 112-119.
- Mphahlele, R. R., Caleb, O. J., Fawole, O. A., & Opara, U. L. (2015). Effects of different maturity stages and growing locations on changes in chemical, biochemical and aroma volatile composition of “Wonderful” pomegranate juice. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 96(3), 1002–1009.
- Mújica-Paz, H., Valdez-Fragoso, A., López-Malo, A., & Palou, E. W.-C. (2003a). Impregnation and osmotic dehydration of some fruits: effect of the vacuum pressure and syrup concentration. *Journal of Food Engineering*, 57(4), 305–314.
- Mújica-Paz, H., Valdez-Fragoso, A., López-Malo, A., & Palou, E. W.-C. (2003b). Impregnation properties of some fruits at vacuum pressure. *Journal of Food Engineering*, 56(4), 307–314.
- Nindo, C. I., & Tang, J. (2007). Refractance Window Dehydration Technology: A Novel Contact Drying Method. *Drying Technology*, 25(1), 37–48.
- Ochoa-Martinez. (2012). Drying characteristics of mango slices using the Refractance Window technique. *Journal of Food Engineering*, 109, 69-75.
- Ocoro, M. A. (2013). Influence of thickness on the drying of papaya puree (*Carica papaya* L.) through refractance windowTM technology. *DYNA*, 80(183).
- ODEPA. (2017). *Oficina de Estudios y Políticas Agrarias*. Retrieved from Superficie de frutales por región: <https://www.odepa.gob.cl/superficie-de-frutales-por-region-2>
- PRODAO. (2009). *Alternativas de Aplicación del Proceso de Liofilización en Frutas y Hortalizas compatible con la Normativa Orgánica*. Argentina.
- Ramakrishnan, A. (2017). Handbook of Drying for Dairy Products. *Indian Institute of crop processing technology*, (Ed.). Thanjavur, India: Wiley Blackwell.
- Rodríguez, M. (2019). *Eroski Consumer*. Retrieved from Manzana Origen y Propiedades: <http://frutas.consumer.es/manzana/propiedades>
- Rosenthal, A. D. (2018). En *Fruit Preservation* (págs. 343-344). USA: Springer.

- Rosenthal, A., Deliza, R., Welti Chanes, J., & Barbosa Cánovas, G. V. (2018). *Fruit Preservation. Food Engineering Series*. Washington State University, USA: Springer, Pag. 195-200, 336-349.
- Salas Salazar, N. A., Molina Corral, F. J., de Jesús Dávila Aviña, J. E., Parra Quezada, Á. R., Robles Hernández, L., & Olivás Orozco, G. I. (2017). Influencia del almacenamiento en la síntesis de compuestos volátiles de manzana "Red Delicious". *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, vol. 8, núm. 1 221-229.
- Salvatori, D., Andrés, A., Chiralt, A., & Fito, P. (1998). The response of some properties of fruits to vacuum impregnation. *Journal of Food Process Engineering*, 21(1), 59–73.
- Schulze, B., Peth, S., Hubbermann, E. M., & Schwarz, K. (2012). The influence of vacuum impregnation on the fortification of apple parenchyma with quercetin derivatives in combination with pore structures X-ray analysis. *Journal of Food Engineering*, 109(3), 380–387.
- Simpson, R., Jaques, A., Nuñez, H., Ramirez, C., & Almonacid, A. (2012). Fractional Calculus as a Mathematical Tool to Improve the Modeling of Mass Transfer Phenomena in Food Processing. *Food Engineering Reviews*, 5(1), 45–55.
- 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 subjected to a moderate electric field. *Journal of Food Engineering*, 166, 204–211.
- Sood P, F. C. (2009). Laser etching: a novel technology to label Florida grapefruits. *Horttechnology*, 19,504.
- Stojanovic, J., & Silva, J. L. (2007). *Influence of osmotic concentration, continuous high frequency ultrasound and dehydration on antioxidants, colour and chemical properties of rabbiteye blueberries*. *Food Chemistry*, 101(3), 898-906.
- Tanzi, E. L., Lupton, J. R., & Alster, T. S. (2003). Lasers in dermatology: Four decades of progress. *Journal of the American Academy of Dermatology*, 49(1), 1–34.
- TRADE MAP. (2019). Obtenido de Estadísticas del comercio para el desarrollo internacional de las empresas: <https://www.trademap.org>
- Treybal, R. E. (1988). *Operaciones de Transferencia de Masa*. México, D.F: McGraw-Hill.
- Valencia, C. S., Rodríguez, H. L., & Giraldo, P. G. (2011). Drying kinetics and oxidation control in Granny smith apples, through different drying methods. *Tumbaga*, 6, 7-16.

## Anexos

### Anexo 1: Curva patrón de ácido gálico

Tabla 7: Preparación de la curva patrón de ácido gálico a partir de una disolución concentrada de 0,2 mg/ml.

| Reactivo            | Concentración (mg ACG/ml) de la curva patrón |      |      |      |      |      |      |
|---------------------|--|------|------|------|------|------|------|
|                     | 0  | 0,02 | 0,04 | 0,06 | 0,08 | 0,10 | 0,12 |
| Acido Gálico (ml)   | 0  | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    |
| Metanol al 80% (ml) | 10   | 9    | 8    | 7    | 6    | 5    | 4    |

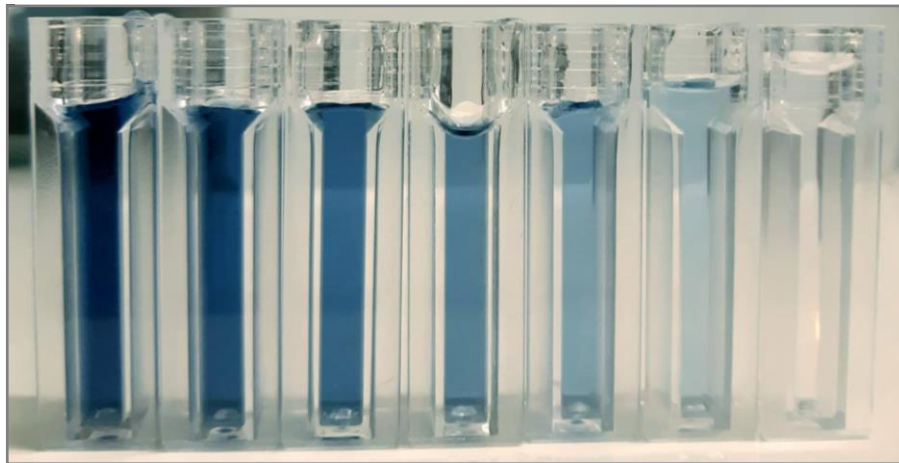


Figura 27: Decoloración de mayor a menor concentración para curva patrón de ácido gálico.

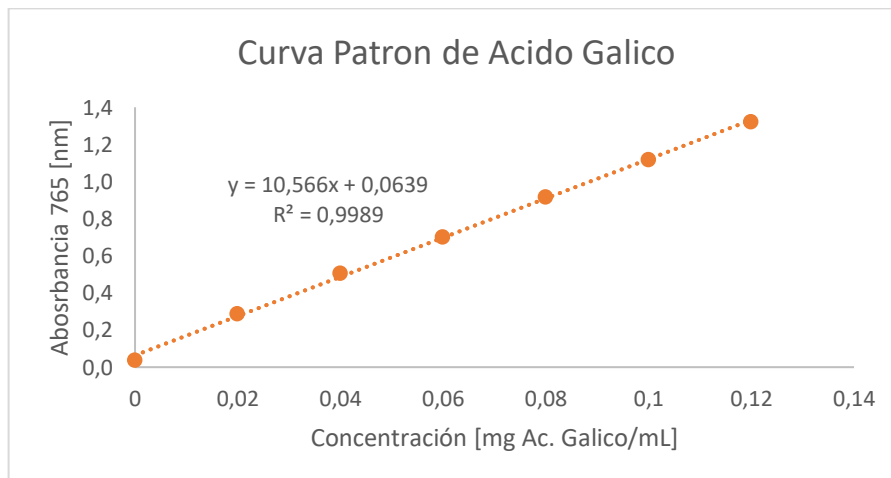


Figura 28: Curva patrón Equivalente de Ácido Gálico.

**Anexo 2: Curva patrón de Equivalente de Trolox**

Tabla 8: Preparación de la curva patrón de equivalente de Trolox a partir de una disolución concentrada de 1 mM.

| Reactivo            | Concentración (mM) de la curva patrón |      |     |     |     |     |
|---------------------|---------------------------------------|------|-----|-----|-----|-----|
|                     | 0                                     | 0,05 | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 |
| Trolox (ml)         | 0                                     | 0,5  | 1   | 2   | 3   | 4   |
| Metanol al 80% (ml) | 10                                    | 9,5  | 9   | 8   | 7   | 6   |



Figura 29: Decoloración de mayor a menor concentración para curva patrón de Trolox.

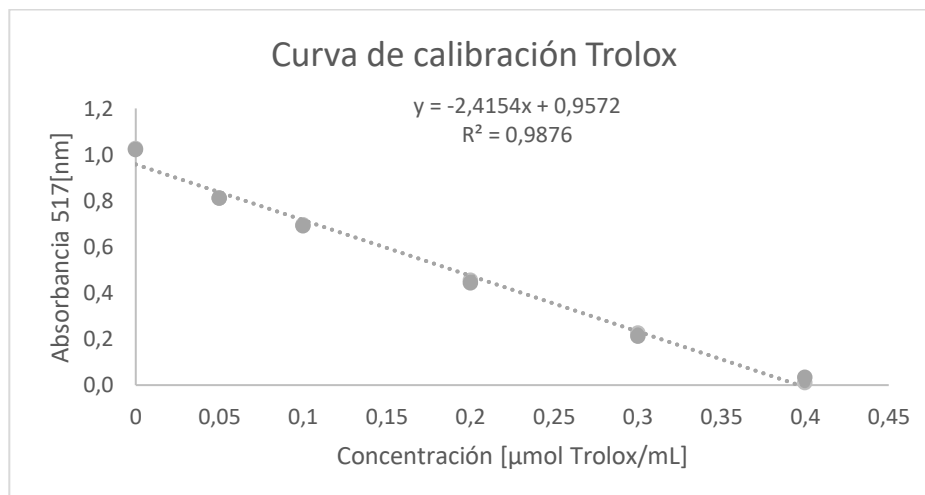


Figura 30: Curva patrón Equivalente de Trolox.

**Anexo 3: Tamaño de micro perforaciones laser.**

*Tabla 9: Tamaño de perforación laser.*

| Muestra                       | Radio $\mu\text{m}$ 1 | Radio $\mu\text{m}$ 2 | Radio $\mu\text{m}$ 3 | Radio $\mu\text{m}$ 4 |
|-------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1                             | 129,3555              | 129,3555              | 149,7036              | 164,2379              |
| 2                             | 167,1448              | 158,4242              | 164,2379              | 165,6914              |
| 3                             | 122,0884              | 133,7158              | 110,4609              | 145,3433              |
| 4                             | 162,7845              | 165,6914              | 168,5982              | 132,2624              |
| 5                             | 167,1448              | 165,6914              | 148,2502              | 116,2746              |
| 6                             | 132,2624              | 136,6227              | 151,1570              | 130,8090              |
| 7                             | 130,8090              | 119,1815              | 152,6105              | 151,1570              |
| 8                             | 156,9708              | 168,5982              | 151,157               | 149,7036              |
| 9                             | 152,6105              | 155,5173              | 117,7281              | 136,6227              |
| 10                            | 146,7967              | 126,4487              | 120,6349              | 138,0761              |
| 11                            | 139,5296              | 172,9582              | 140,983               | 130,809               |
| 12                            | 132,2624              | 177,3188              | 146,7967              | 139,5296              |
| 13                            | 165,6914              | 172,9585              | 151,157               | 156,9708              |
| 14                            | 154,0639              | 164,2379              | 170,0517              | 164,2379              |
| 15                            | 158,4242              | 140,983               | 158,4242              | 171,5051              |
| 16                            | 146,7967              | 152,6105              | 138,0761              | 143,8899              |
| 17                            | 142,4364              | 170,0517              | 156,9708              | 177,3188              |
| 18                            | 149,7036              | 162,7845              | 167,1448              | 161,3311              |
| 19                            | 145,3433              | 171,5051              | 170,0517              | 159,8776              |
| 20                            | 129,3555              | 149,7036              | 130,809               | 133,7158              |
| 21                            | 116,2746              | 162,7845              | 126,4487              | 120,6349              |
| 22                            | 146,7967              | 152,6105              | 167,1448              | 164,2379              |
| 23                            | 123,5418              | 117,7281              | 143,8899              | 154,0639              |
| 24                            | 149,7036              | 159,8776              | 159,8776              | 161,3311              |
| 25                            | 136,6227              | 152,6105              | 164,2379              | 139,5296              |
| Promedio total                |                       |                       |                       | 148,8025              |
| Desviación estándar ( $\pm$ ) |                       |                       |                       | 16,5289               |

**Anexo 4: Resumen de datos de humedad en el tiempo para las tres replicadas realizadas para ventana refractiva en todas las condiciones.**

*Tabla 10: Datos de masa en el tiempo para manzana sin tratamiento y seca en VR.*

| Tiempo (min) | H1    | H2    | H3    | H prom. | Mrt1  | Mrt2  | Mrt3  | Mrt prom. |
|--------------|-------|-------|-------|---------|-------|-------|-------|-----------|
| 0            | 0,822 | 0,822 | 0,822 | 0,822   | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000     |
| 20           | 0,558 | 0,596 | 0,506 | 0,553   | 0,677 | 0,724 | 0,614 | 0,672     |
| 40           | 0,315 | 0,174 | 0,212 | 0,234   | 0,381 | 0,209 | 0,256 | 0,282     |
| 60           | 0,084 | 0,034 | 0,055 | 0,058   | 0,098 | 0,038 | 0,064 | 0,067     |
| 80           | 0,008 | 0,027 | 0,005 | 0,013   | 0,006 | 0,029 | 0,003 | 0,013     |
| 90           | 0,007 | 0,007 | 0,004 | 0,006   | 0,004 | 0,005 | 0,002 | 0,004     |
| 100          | 0,004 | 0,005 | 0,004 | 0,004   | 0,001 | 0,003 | 0,001 | 0,001     |
| 110          | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003   | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000     |

*Tabla 11: Datos de masa en el tiempo para manzana con tratamiento de impregnación y seca en VR.*

| Tiempo (min) | H1    | H2    | H3    | H prom. | Mrt1  | Mrt2  | Mrt3  | Mrt prom. |
|--------------|-------|-------|-------|---------|-------|-------|-------|-----------|
| 0            | 0,846 | 0,846 | 0,846 | 0,846   | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000     |
| 20           | 0,511 | 0,447 | 0,435 | 0,464   | 0,603 | 0,525 | 0,514 | 0,984     |
| 40           | 0,366 | 0,266 | 0,349 | 0,327   | 0,432 | 0,310 | 0,412 | 0,256     |
| 60           | 0,151 | 0,160 | 0,149 | 0,153   | 0,178 | 0,183 | 0,175 | 0,064     |
| 80           | 0,016 | 0,061 | 0,041 | 0,039   | 0,018 | 0,065 | 0,048 | 0,003     |
| 90           | 0,030 | 0,026 | 0,009 | 0,022   | 0,035 | 0,023 | 0,010 | 0,002     |
| 100          | 0,003 | 0,030 | 0,004 | 0,012   | 0,003 | 0,029 | 0,004 | 0,001     |
| 110          | 0,001 | 0,006 | 0,000 | 0,002   | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000     |

*Tabla 12: Datos de masa en el tiempo para manzana con tratamiento de micro perforación e impregnación seca en VR.*

| Tiempo (min) | H1    | H2    | H3    | H prom. | Mrt1  | Mrt2  | Mrt3  | Mrt prom. |
|--------------|-------|-------|-------|---------|-------|-------|-------|-----------|
| 0            | 0,843 | 0,843 | 0,843 | 0,843   | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000     |
| 20           | 0,573 | 0,502 | 0,466 | 0,514   | 0,670 | 0,593 | 0,552 | 0,604     |
| 40           | 0,308 | 0,332 | 0,208 | 0,283   | 0,347 | 0,390 | 0,247 | 0,328     |
| 60           | 0,085 | 0,086 | 0,099 | 0,090   | 0,075 | 0,096 | 0,117 | 0,096     |
| 80           | 0,049 | 0,016 | 0,005 | 0,024   | 0,031 | 0,013 | 0,006 | 0,017     |
| 90           | 0,034 | 0,008 | 0,001 | 0,014   | 0,013 | 0,002 | 0,001 | 0,005     |
| 100          | 0,024 | 0,006 | 0,001 | 0,010   | 0,001 | 0,000 | 0,001 | 0,001     |
| 110          | 0,023 | 0,006 | 0,000 | 0,010   | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000     |

**Anexo 5: Resumen de datos de humedad en el tiempo para las tres replicadas realizadas para Estufa en todas las condiciones.**

*Tabla 13: Datos de masa en el tiempo para manzana sin tratamiento y seca en estufa.*

| Tiempo (min) | H1    | H2    | H3    | H prom. | Mrt1  | Mrt2  | Mrt3  | Mrt prom. |
|--------------|-------|-------|-------|---------|-------|-------|-------|-----------|
| 0            | 0,822 | 0,822 | 0,822 | 0,822   | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000     |
| 20           | 0,578 | 0,531 | 0,511 | 0,540   | 0,703 | 0,645 | 0,620 | 0,656     |
| 40           | 0,288 | 0,365 | 0,231 | 0,294   | 0,349 | 0,443 | 0,280 | 0,357     |
| 60           | 0,092 | 0,174 | 0,104 | 0,123   | 0,111 | 0,211 | 0,126 | 0,149     |
| 80           | 0,006 | 0,065 | 0,025 | 0,032   | 0,007 | 0,078 | 0,030 | 0,038     |
| 90           | 0,006 | 0,004 | 0,004 | 0,004   | 0,006 | 0,004 | 0,004 | 0,005     |
| 100          | 0,003 | 0,004 | 0,000 | 0,002   | 0,003 | 0,003 | 0,000 | 0,002     |
| 110          | 0,000 | 0,001 | 0,000 | 0,001   | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000     |

*Tabla 14: Datos de masa en el tiempo para manzana con tratamiento de impregnación y seca en estufa.*

| Tiempo (min) | H1    | H2    | H3    | H prom. | Mrt1  | Mrt2  | Mrt3  | Mrt prom. |
|--------------|-------|-------|-------|---------|-------|-------|-------|-----------|
| 0            | 0,846 | 0,846 | 0,846 | 0,846   | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000     |
| 20           | 0,600 | 0,576 | 0,487 | 0,554   | 0,604 | 0,679 | 0,575 | 0,654     |
| 40           | 0,359 | 0,382 | 0,320 | 0,354   | 0,328 | 0,447 | 0,378 | 0,416     |
| 60           | 0,231 | 0,162 | 0,216 | 0,203   | 0,096 | 0,185 | 0,255 | 0,238     |
| 80           | 0,040 | 0,098 | 0,060 | 0,066   | 0,017 | 0,109 | 0,070 | 0,075     |
| 90           | 0,035 | 0,078 | 0,024 | 0,046   | 0,005 | 0,086 | 0,027 | 0,051     |
| 100          | 0,048 | 0,046 | 0,003 | 0,032   | 0,001 | 0,048 | 0,002 | 0,035     |
| 110          | 0,000 | 0,006 | 0,001 | 0,002   | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000     |

*Tabla 15: Datos de masa en el tiempo para manzana con tratamiento de micro perforación e impregnación seca en estufa.*

| Tiempo (min) | H1    | H2    | H3    | H prom. | Mrt1  | Mrt2  | Mrt3  | Mrt prom. |
|--------------|-------|-------|-------|---------|-------|-------|-------|-----------|
| 0            | 0,843 | 0,843 | 0,843 | 0,843   | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000     |
| 20           | 0,536 | 0,608 | 0,506 | 0,550   | 0,632 | 0,724 | 0,598 | 0,652     |
| 40           | 0,305 | 0,318 | 0,325 | 0,316   | 0,357 | 0,384 | 0,382 | 0,374     |
| 60           | 0,183 | 0,153 | 0,151 | 0,162   | 0,211 | 0,190 | 0,175 | 0,192     |
| 80           | 0,073 | 0,020 | 0,039 | 0,044   | 0,079 | 0,035 | 0,041 | 0,052     |
| 90           | 0,049 | 0,002 | 0,007 | 0,019   | 0,051 | 0,013 | 0,004 | 0,023     |
| 100          | 0,031 | 0,009 | 0,001 | 0,008   | 0,030 | 0,000 | 0,004 | 0,009     |
| 110          | 0,006 | 0,009 | 0,004 | 0,000   | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000     |

**Anexo 6: Ajustes de cinética para segunda ley de Fick y modelo de difusión anómala.**

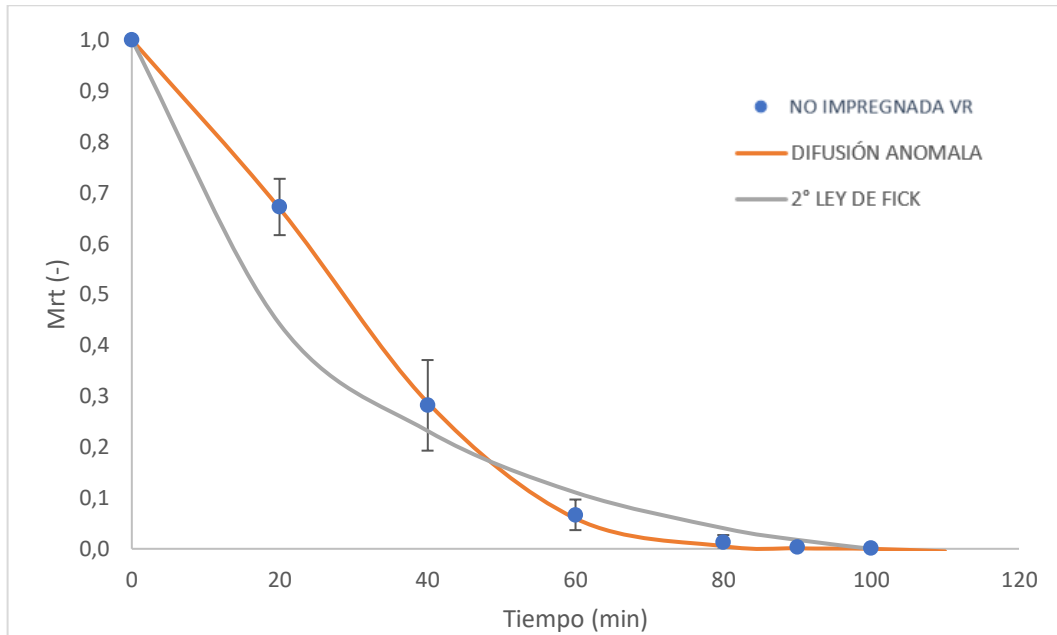


Figura 31: Ajuste de cinética para fruta sin tratamiento seca en VR a 75°C

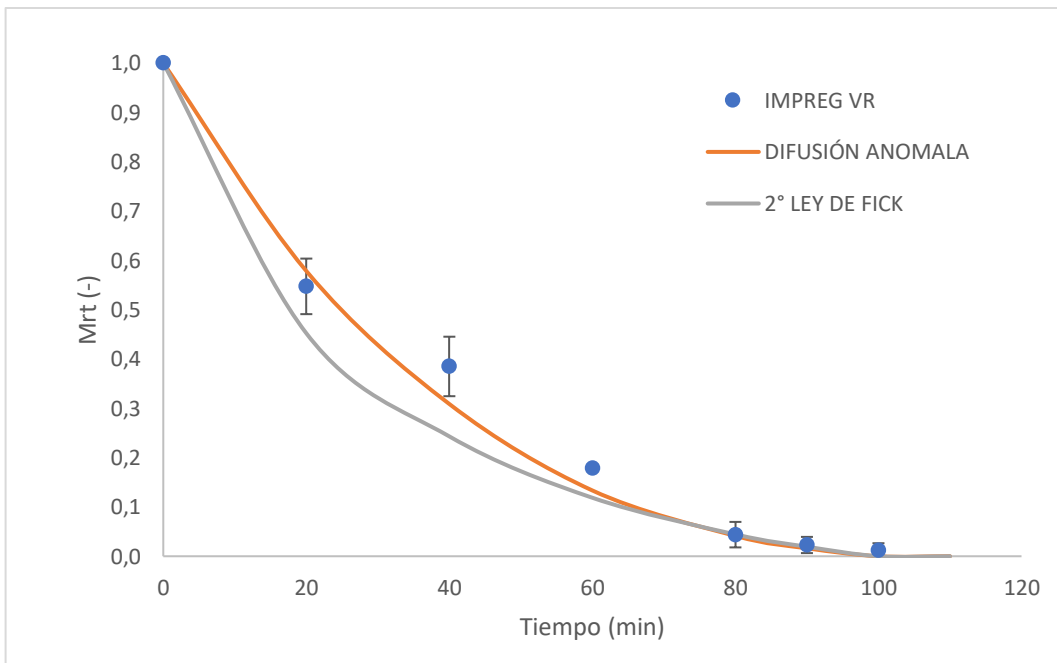


Figura 32: Ajuste de cinética para fruta impregnada seca en VR a 75°C.

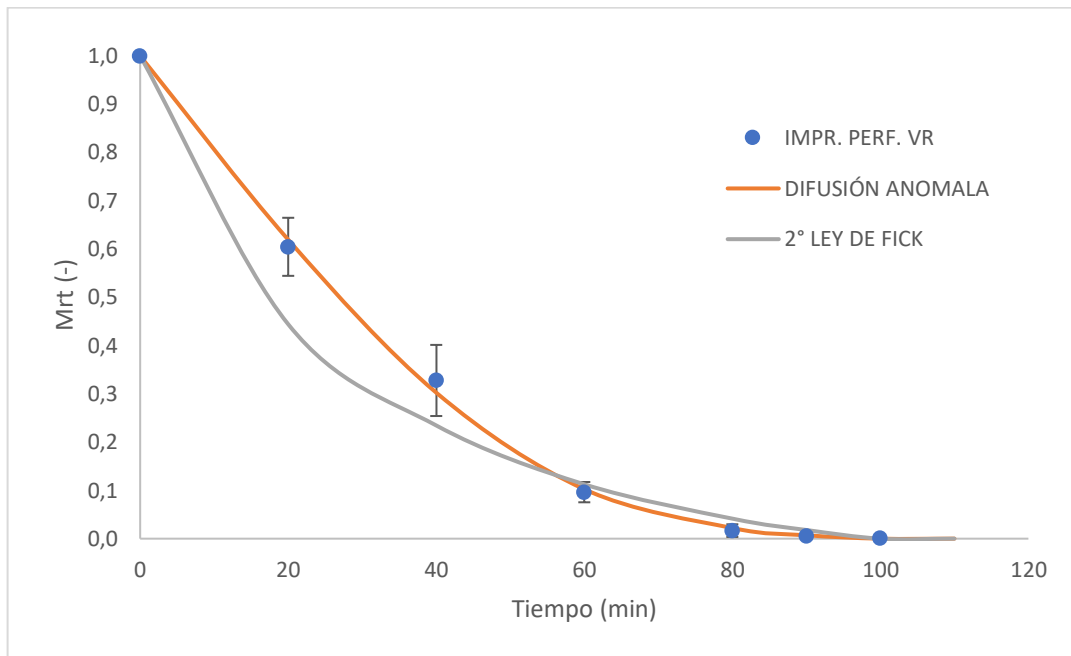


Figura 33: Ajuste de cinética para fruta perforada e impregnada seca en VR a 75°C.

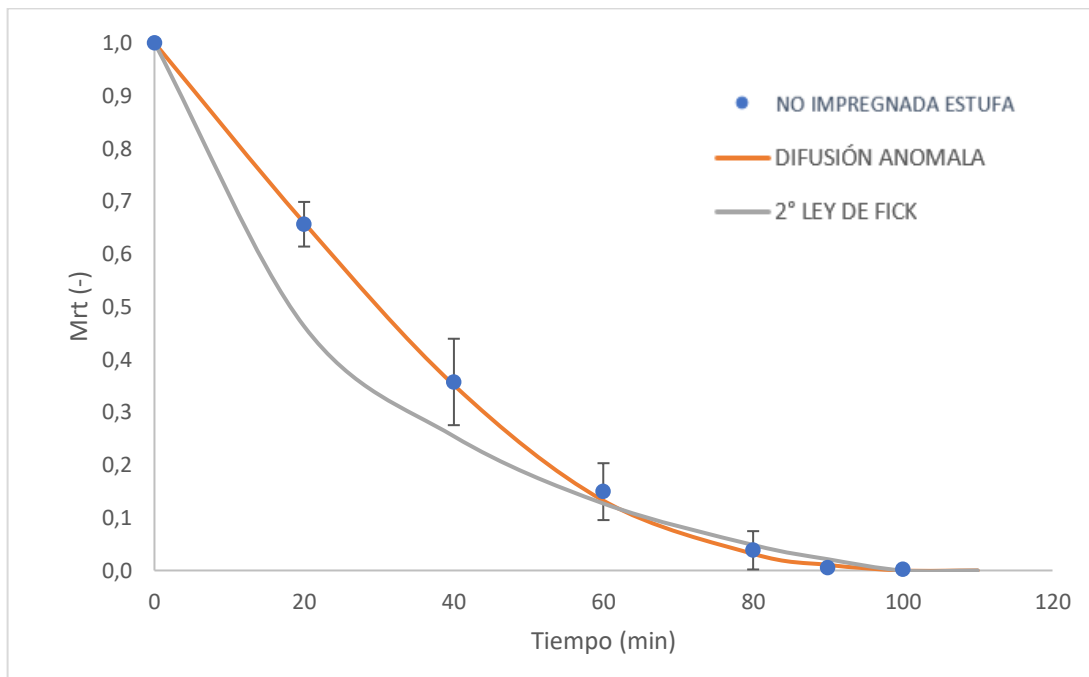


Figura 34: Ajuste de cinética para fruta sin tratamiento seca en estufa a 75°C.

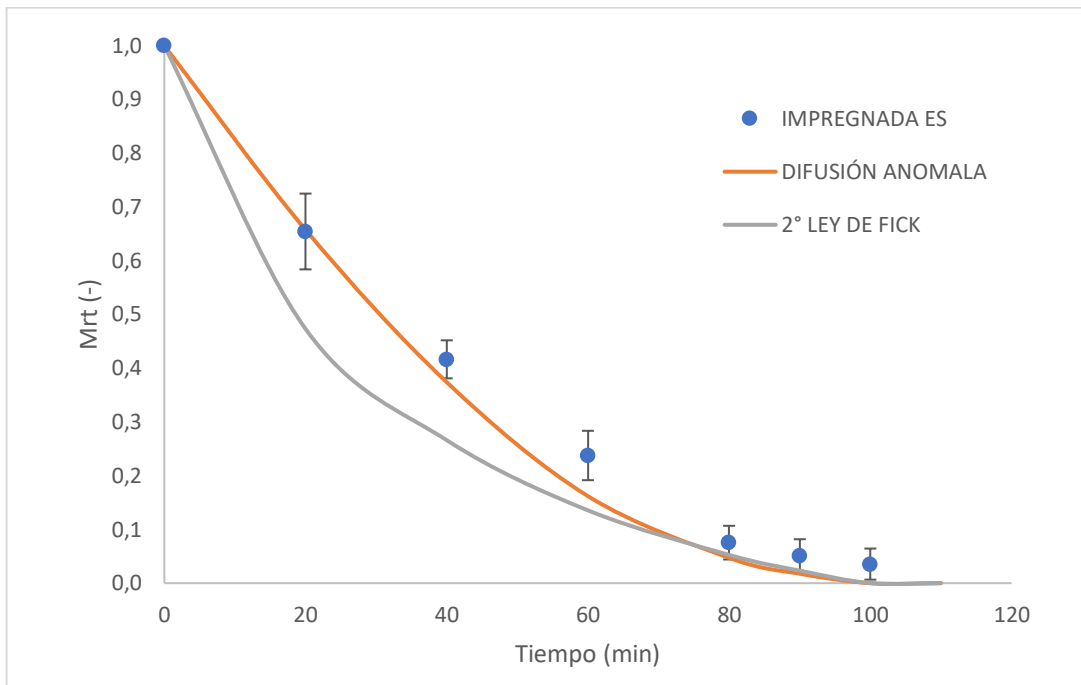


Figura 35: Ajuste de cinética para fruta impregnada seca en estufa a 75°C.

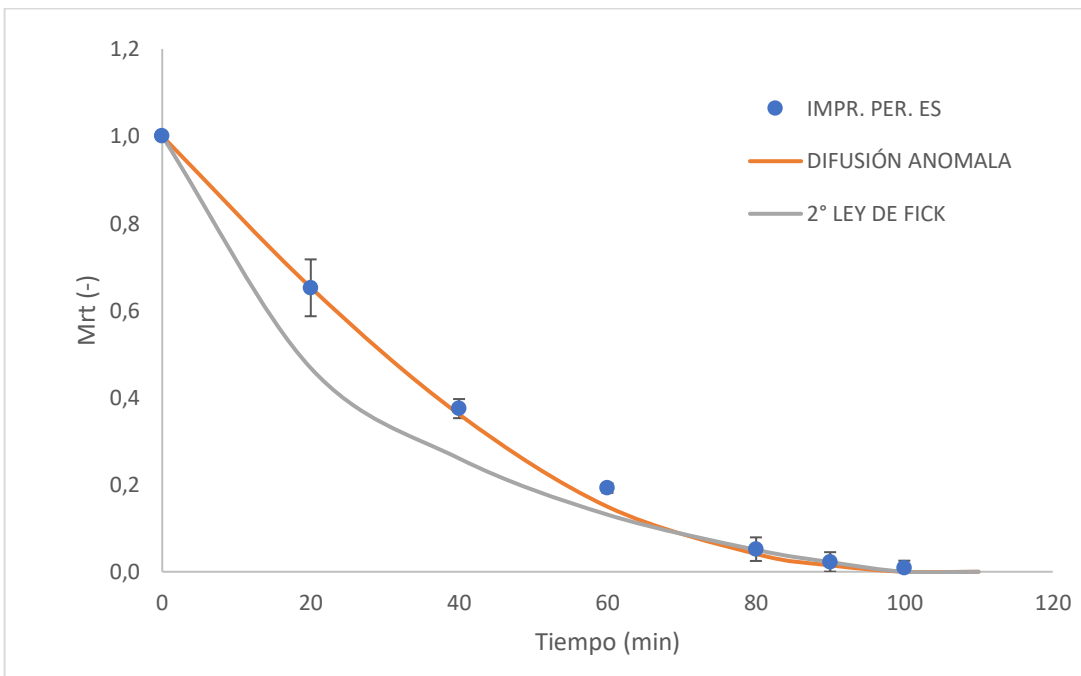


Figura 36: Ajuste de cinética para fruta perforada e impregnada seca en estufa a 75°C.

**Anexo 7: Resultados de polifenoles totales y capacidad antioxidante para todas las condiciones del alimento (humedad determinada por método AOAC).**

*Tabla 16: Propiedades de la manzana fresca.*

| Condición Fresca    | Humedad inicial (%) | Actividad de agua (aw) | Polifenoles (mg EAG/ g masa seca) | Actividad Antioxidante ( $\mu\text{mol trolox/g}$ masa seca) |
|---------------------|---------------------|------------------------|-----------------------------------|--|
| Manzana Verde       | 82,24 $\pm$ 1,40    | 0,9733 $\pm$ 0,0026    | 12,46 $\pm$ 1,90                  | 23,05 $\pm$ 4,65   |
| Manzana Impregnada  | 84,60 $\pm$ 0,61    | 0,9827 $\pm$ 0,0043    | 17,79 $\pm$ 1,88                  | 54,89 $\pm$ 9,85   |
| Manzana Perf. Impr. | 84,34 $\pm$ 0,14    | 0,9838 $\pm$ 0,0002    | 18,65 $\pm$ 3,27                  | 56,86 $\pm$ 9,16   |

*Tabla 17: Propiedades de la manzana deshidratada en Ventana Refractiva a 75°C.*

| Condición Fresca    | Tiempo de secado (min) | Humedad Final (%) | Actividad de agua (aw) | Polifenoles (mg EAG/ g masa seca) | Actividad Antioxidante ( $\mu\text{mol trolox/g}$ masa seca) |
|---------------------|------------------------|-------------------|------------------------|-----------------------------------|--|
| Manzana Verde       | 80                     | 4,77 $\pm$ 0,48   | 0,3183 $\pm$ 0,0440    | 7,21 $\pm$ 0,78                   | 15,69 $\pm$ 1,28   |
| Manzana Imp.        | 110                    | 7,09 $\pm$ 0,59   | 0,3096 $\pm$ 0,0494    | 10,39 $\pm$ 0,50                  | 29,02 $\pm$ 1,51   |
| Manzana Perf. Impr. | 100                    | 7,96 $\pm$ 1,07   | 0,3605 $\pm$ 0,0684    | 10,73 $\pm$ 0,81                  | 26,00 $\pm$ 1,62   |

*Tabla 18: Propiedades de la manzana deshidratada en estufa a 75°C.*

| Condición Fresca    | Tiempo de secado (min) | Humedad Final (%) | Actividad de agua (aw) | Polifenoles (mg EAG/ g masa seca) | Actividad Antioxidante ( $\mu\text{mol trolox/g}$ masa seca) |
|---------------------|------------------------|-------------------|------------------------|-----------------------------------|--|
| Manzana Verde       | 90                     | 8,93 $\pm$ 4,88   | 0,3243 $\pm$ 0,0372    | 7,13 $\pm$ 1,24                   | 16,70 $\pm$ 1,77   |
| Manzana Imp.        | 110                    | 11,19 $\pm$ 2,48  | 0,3057 $\pm$ 0,0667    | 10,95 $\pm$ 0,62                  | 26,27 $\pm$ 1,12   |
| Manzana Perf. Impr. | 100                    | 16,67 $\pm$ 2,62  | 0,3431 $\pm$ 0,0429    | 10,04 $\pm$ 1,58                  | 26,44 $\pm$ 2,33   |

Tabla 19: Propiedades de la manzana deshidratada en Liofilizador de alimentos.

| Condición Fresca    | Tiempo de secado (h) | Humedad Final (%) | Actividad de agua (aw) | Polifenoles (mg EAG/ g masa seca) | Actividad Antioxidante ( $\mu\text{mol trolox/g}$ masa seca) |
|---------------------|----------------------|-------------------|------------------------|-----------------------------------|--|
| Manzana Verde       | 8                    | 2,40 $\pm$ 0,21   | 0,1769 $\pm$ 0,0346    | 9,15 $\pm$ 0,57                   | 19,74 $\pm$ 1,76   |
| Manzana Imp.        | 8                    | 2,53 $\pm$ 0,30   | 0,1975 $\pm$ 0,0535    | 10,11 $\pm$ 0,81                  | 28,67 $\pm$ 3,42   |
| Manzana Perf. Impr. | 8                    | 2,78 $\pm$ 0,71   | 0,1463 $\pm$ 0,0317    | 10,64 $\pm$ 0,92                  | 27,42 $\pm$ 0,85   |