

2017

DESHIDRATACIÓN DE MANZANAS TIPO GRANNY SMITH EN VENTANA REFRACTIVA CON PRETRATAMIENTO DE DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA Y CAMPO ELÉCTRICO MODERADO

HERNÁNDEZ RUIZ, YOSSEBANN NICOLÁS

<http://hdl.handle.net/11673/23645>

Repositorio Digital USM, UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA

VALPARAISO – CHILE



**Deshidratación de manzanas tipo Granny Smith en
ventana refractiva con pretratamiento de deshidratación
osmótica y campo eléctrico moderado**

Yossebann Nicolás Hernández Ruíz

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVÍL QUÍMICO**

PROFESOR GUÍA:

Dr. Ricardo Simpson

PROFESORES CORREFERENTES:

Dr. Cristian Ramírez

MsC. Helena Núñez

2017

RESUMEN

En la actualidad nuestro país es el máximo exportador de manzanas deshidratadas en el mundo, por lo cual resulta atractivo evaluar procesos de deshidratación como lo es el secado en ventana refractiva (VR). El objetivo de la investigación es caracterizar en cuanto a cinética y propiedades finales la deshidratación de manzana de variedad Granny Smith en VR y túnel de aire pretratada con deshidratación osmótica acoplada a aplicación de campos eléctricos moderados.

Los experimentos contemplaron secado en VR para tres temperaturas de operación (55,75 y 95°C) tanto para fruta fresca de control y pretratada, además de secado convencional en túnel de aire para una temperatura de 55°C y velocidad de aire de 2,2m/s. Para el pretratamiento se utilizó una solución osmótica de sacarosa de 45 °Brix a una temperatura de 40°C y una intensidad de campo eléctrico de 9,3V/cm. Este pretratamiento se aplicó hasta lograr $a_w = 0,95$ en las muestras.

Existen diferencias significativas en la cinética de ambos métodos de secado. Se tomó como criterio que las muestras deshidratadas alcanzaran $a_w = 0,4$, lo cual se logró para manzana sin pretratamiento en 50min y 280min para VR (95°C) y túnel de aire respectivamente. El pretratamiento disminuyó el tiempo de secado para el túnel de aire en 40min mientras que en VR no tuvo efecto.

Las muestras secadas en VR (95°C) presentaron una dureza final un 86% menor a las muestras secadas en túnel de aire. El color de muestras por su parte aumentó según el parámetro ΔE en 14,4 y 11,7 unidades para el secado en VR y túnel de aire respectivamente lo cual no representa diferencias significativas a la resolución del ojo humano. Para el contenido de sólidos solubles y cambios volumétricos de la fruta seca no se registraron diferencias significativas. Por otra parte el pretratamiento aumentó la dureza, volumen y contenido de sólidos solubles de las muestras secadas en VR en promedio un 32,3%, 22,2% y 14,3% respectivamente y no se encontraron diferencias significativas de color.

Para secado en VR (95°C) los modelos de difusión anómala y segunda ley de Fick se ajusta con valores de R^2 de 0,9927 y 0,7540 respectivamente. El proceso es considerado súper difusivo ya que se obtuvo un valor de $\alpha = 2,231$. Además se encontraron valores para el coeficiente difusivo que están entre $(0,73 - 3,67) \cdot E-10 \text{ m}^2/\text{s}$ según la segunda ley de Fick y de $(0,11 - 3,00) \cdot E-14 \text{ m}^2/\text{s}^\alpha$ según el modelo de difusión anómala para el valor de α recién mencionado.

Se concluye que el secado de manzana en ventana refractiva posee una velocidad de deshidratación mayor al secado convencional para un producto final de similares características. Por su parte el pretratamiento solo logro una disminución de tiempo de 40min en el secado convencional sin tener efecto en VR (95°C).

ABSTRACT

At present our country is the maximum exporter of dehydrated apples in the world, reason why it is attractive to evaluate dehydration processes as it is the drying in refractance window (VR). The objective of the research is to characterize the dehydration of apple of the Granny Smith variety pretreated with osmotic dehydration coupled to the application of moderate electric fields, in addition to contrasting these results with conventional drying in air tunnel.

The experiments included VR drying for three operating temperatures (55, 75 and 95 °C) for both control and pretreated fresh fruit, as well as conventional drying in an air tunnel for a temperature of 55 °C and air velocity of 2,2 m / s. For the pretreatment, an osmotic sucrose solution of 45 °Brix was used at a temperature of 40 °C and an electric field strength of 9.3 V/cm. This pretreatment was applied until $a_w = 0.95$ was obtained in the samples.

There are significant differences in the kinetics of both drying methods. The dehydrated samples were taken as a criterion to reach $a_w = 0.4$, which was achieved for apple without pretreatment in 50 min and 280 min for VR (95 °C) and air tunnel respectively. The pretreatment decreased the drying time for the air tunnel in 40 min while in VR it had no effect.

Samples dried in VR (95 °C) had a final hardness 86% lower than the samples dried in air tunnel. The sample color on the other hand increased according to the parameter ΔE in 14.4 and 11.7 units for the drying in VR and air tunnel respectively which does not represent significant differences to the resolution of the human eye. For the soluble solids content and volumetric changes of the dried fruit there were no significant differences. On the other hand, pretreatment increased the hardness, volume and soluble solids contents of the dried samples in VR on average 32.3%, 22.2% and 14.3% respectively and no significant color differences were found.

For drying in VR (95 °C) the anomalous diffusion and second Fick law models are adjusted with R^2 values of 0,9927 and 0,7540 respectively. The process is considered super diffusive since a value of $\alpha = 2,231$ was obtained. In addition, values for the diffusive coefficient were found between $(0,73 - 3,67) \cdot E-10 \text{ m}^2 / \text{s}$ according to the second law of Fick and $(0,11-3,00) \cdot E-14 \text{ m}^2 / \text{s}$ according to the anomalous diffusion model for the aforementioned α value.

It is concluded that the drying of apple in refractance window has a dehydration rate greater than the conventional drying for a final product of similar characteristics. Pretreatment only achieved a 40 min reduction in conventional drying without having an effect on VR (95 °C).

AGRADECIMIENTOS

Quiero comenzar agradeciendo a los docentes del departamento de ingeniería química y ambiental Ricardo Simpson, Cristian Ramírez y Helena Núñez por permitirme trabajar junto a ellos en esta investigación y agradezco también la gran disposición mostrada durante todo el proceso.

El mayor de los agradecimientos va dirigido a mi familia los cuales han estado presentes en todas las etapas de mi vida y el paso por la universidad no fue la excepción. Agradezco el apoyo incondicional que me han dado durante estos años siendo parte importante de todos mis logros.

Me gustaría agradecer a todas las personas y amigos que han estado conmigo durante este periodo universitario. Estas personas sin duda han hecho de mi paso por la universidad una de las etapas más felices y enriquecedoras de mi vida.

Finalmente agradecer al proyecto Fondecyt Nº 1160761 por el financiamiento entregado lo cual hizo posible el desarrollo de esta memoria.

Tabla de contenido

RESUMEN	2
ABSTRACT	3
AGRADECIMIENTOS.....	4
1. INTRODUCCIÓN	10
2. ANTECEDENTES GENERALES	12
2.1. MATERIA PRIMA.....	12
2.2. CONTEXO DEL MERCADO MUNDIAL Y CHILENO	13
2.3. DESHIDRATACIÓN DE ALIMENTOS	15
2.4. TRANSFERENCIA DE MASA EN EL PROCESO DE SECADO	17
2.4.1. MECANISMO DE DIFUSIÓN	18
2.4.2. MECANISMO DE CAPILARIDAD	19
2.4.3. DIFUSIÓN ANOMALA.....	20
2.5. TÉCNICAS DE DESHIDRATACIÓN	20
2.6. SECADO POR AIRE CALIENTE O CONVENCIONAL	23
2.6.1. SECADOR DE TÚNEL	26
2.7. TECNOLOGÍA DE VENTANA REFRACTIVA PARA LA DESHIDRATACIÓN DE ALIMENTOS	28
2.7.1. CARACTERÍSTICAS DE LOS ALIMENTOS SECADOS EN VR	33
2.7.1.1. CARACTERÍSTCAS MICROBIOLÓGICAS DE LOS ALIMENTOS SECADOS EN VR	33
2.7.1.2. MODIFICACIÓN EN PROPIEDADES FÍSICAS DE ALIMENTOS SECADOS POR VENTANA REFRACTIVA.....	34
2.7.1.3. CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS, ORGANOLEPTICAS Y NUTRICIONALES DE ALIMENTOS SECADOS POR VENTANA REFRACTIVA.....	38
2.8. PRETRATAMIENTOS PARA LA DESHIDRATACIÓN DE ALIMENTOS	40
2.8.1. DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA.....	40
2.8.2. CAMPOS ELÉCTRICOS MODERADOS	42
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	44
3.1. MATERIA PRIMA Y REACTIVOS	44
3.2. EQUIPOS UTILIZADOS Y MEDICIÓN DE PROPIEDADES.....	44
3.2.1. EQUIPO DE DESHIDRATCIÓN OSMÓTICA Y APLICACIÓN DE CAMPOS ELÉCTRICOS MODERADOS	44
3.2.2. VENTANA REFRACTIVA.....	46
3.2.3. TÚNEL DE AIRE CALIENTE	48

3.2.4.	MEDICIÓN DE PROPIEDADES.....	49
3.2.4.1.	TEXTURA.....	49
3.2.4.2.	COLOR.....	50
3.2.4.3.	SÓLIDOS SOLUBLES	51
3.2.4.4.	DIMENSIONES.....	52
3.2.4.5.	DETERMINACIÓN DE ACTIVIDAD DE AGUA Y HUMEDAD	52
3.3.	DISEÑO DE EXPERIMENTOS.....	53
3.4.	METODOLOGÍA.....	55
3.4.1.	PREPARACIÓN MATERIA PRIMA.....	55
3.4.2.	PRETRATAMIENTO	55
3.4.3.	SECADO EN VENTANA REFRACTIVA	56
3.4.4.	SECADO EN TÚNEL DE AIRE	58
3.5.	OBTENCIÓN DE COEFICIENTE DIFUSIVO Y DEPENDENCIA CON LA TEMPERATURA.....	59
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	60
4.1.	PROPIEDADES MATERIA PRIMA	60
4.2.	CINÉTICAS DE DESHIDRATACIÓN Y DETERMINACIÓN DE TIEMPO DE SECADO.....	61
4.2.1.	CINÉTICA DE SECADO PARA VENTANA REFRACTIVA.....	62
4.2.2.	CINÉTICA DE SECADO PARA TÚNEL DE AIRE	63
4.2.3.	DETERMINACIÓN DE TIEMPOS DE SECADO	64
4.2.4.	COMPARACIÓN DE CINÉTICA PARA SECADO EN VR Y TÚNEL DE AIRE	66
4.3.	CAMBIOS DE LAS PROPIEDADES	67
4.3.1.	COMPARACIÓN DE PROPIEDADES DE MANZANAS SECADAS EN VR Y TÚNEL DE AIRE 68	
4.3.2.	EFFECTO DEL PRETRATAMIENTO EN PROPIEDADES ORGANOLEPTICAS	69
4.4.	DETERMINACIÓN DE COEFICIENTE DE DIFUSIÓN	73
4.4.1.	EFFECTO DE LA TEMPERATURA EN COEFICIENTE DE DIFUSIÓN	74
5.	CONCLUSIONES	76
6.	REFERENCIAS.....	77
7.	ANEXOS	80

Índice de figuras

Figura 1 Exportación mundial de manzanas en los últimos 15 años.	13
Figura 2 Exportación total de manzanas y Granny Smith en Chile.	14
Figura 3 Exportación y precio de manzanas deshidratadas en Chile	15
Figura 4 Recorrido del agua en un sólido durante el secado.	18
Figura 5 Tasa de cambio de humedad en el tiempo para un proceso de secado con aire caliente	23
Figura 6 Configuraciones de túnel de aire para secado convencional.....	27
Figura 7 Esquema de ventana refractiva operada de forma batch.....	28
Figura 8 Esquema de ventana refractiva operada de forma continua.	29
Figura 9 Test de compresión de manzana Granny Smith.....	36
Figura 10 Comparación de textura (dureza) para kiwi deshidratado en VR y horno.....	37
Figura 11 Flujos másicos durante deshidratación osmótica.	40
Figura 12 Celda de deshidratación osmótica y baño termoregulado.	45
Figura 13 Equipo de calentamiento óhmico	46
Figura 14 Estructura con ventana refractiva montada.	46
Figura 15 Sistema completo de ventana refractiva.	47
Figura 16 Sistema de bandejas para secado de manzanas en túnel de aire.....	48
Figura 17 Sistema completo de túnel de aire caliente.....	49
Figura 18 Texturómetro.	50
Figura 19 Esquema de bloques para diseño de experimentos.	53
Figura 20 Secuencia de cortado de muestras de manzana.....	55
Figura 21 Cinética de secado en VR para fruta fresca.....	62
Figura 22 Cinética de secado en VR para fruta pretratada.	62
Figura 23 Cinética de secado de manzana en túnel de aire para fruta fresca y pretratada.	63
Figura 24 Actividad de agua para secado en VR de fruta fresca	64
Figura 25 Actividad de agua para secado en VR de fruta pretratada	65
Figura 26 Actividad de agua para secado en túnel de aire	65
Figura 27 Comparación de cinética de secado en VR y túnel de aire.	67
Figura 28 Dureza de fruta seca en VR para muestras frescas y pretratadas.	70
Figura 29 ΔE de fruta seca en VR para muestras frescas y pretratadas.....	71
Figura 30 Volumen de fruta seca en VR para muestras frescas y pretratadas.	71
Figura 31 Sólidos solubles de fruta seca en VR para muestras frescas y pretratadas.	72
Figura 32 Comparación actividad de agua VR 95 °C para fruta fresca y pretratada.....	86
Figura 33 Comparación actividad de agua VR 75 °C para fruta fresca y pretratada.....	86
Figura 34 Comparación actividad de agua VR 55 °C para fruta fresca y pretratada.....	87
Figura 35 Ajuste de cinética fruta fresca seca VR 95 °C.....	87
Figura 36 Ajuste de cinética fruta fresca seca VR 75 °C.....	88
Figura 37 Ajuste de cinética fruta fresca seca VR 55 °C.....	88
Figura 38 Ajuste de cinética fruta pretratada seca VR 95 °C	89
Figura 39 Ajuste de cinética fruta pretratada seca VR 75 °C	89
Figura 40 Ajuste de cinética fruta pretratada seca VR 55 °C	90
Figura 41 Ajuste de cinética fruta fresca seca en túnel de aire	90
Figura 42 Ajuste de cinética fruta pretratada seca en túnel de aire.....	91

Índice de tablas

Tabla 1 Comparación de eficiencias térmicas para distintos equipos de secado	33
Tabla 2 Parámetros de color L, a y b en diferentes alimentos frescos y deshidratados.....	35
Tabla 3 Reactivos usados en las experiencias.	44
Tabla 4 Replicas para los distintos experimentos realizados.	54
Tabla 5 Intervalos de tiempo en registro de peso de muestras en VR	58
Tabla 6 Propiedades para fruta fresca.	60
Tabla 7 propiedades para fruta con pretratamiento.	60
Tabla 8 Tiempos de secado según criterio de actividad de agua propuesto.	66
Tabla 9 Propiedades organolépticas mediadas para fruta fresca secada en VR 95 °C.....	68
Tabla 10 Propiedades organolépticas mediadas para fruta fresca secada en túnel de aire.	68
Tabla 11 Valores de Deff, y suma de errores cuadrados obtenidos usando modelo de 2ª Ley de Fick en VR	73
Tabla 12 Valores de Deff, y suma de errores cuadrados obtenidos usando modelo de difusión anómala en VR	73
Tabla 13 Valores de Deff, y suma de errores cuadrados obtenidos usando modelo de 2ª Ley de Fick en túnel de aire	73
Tabla 14 Valores de Deff, y suma de errores cuadrados obtenidos usando modelo de difusión anómala en túnel de aire	73
Tabla 15 Resumen humedad VR 95 °C Fruta fresca.....	80
Tabla 16 Resumen actividad de agua en VR 95°C Fruta fresca.....	80
Tabla 17 Resumen humedad VR 75 °C Fruta fresca.....	80
Tabla 18 Resumen actividad de agua en VR 75°C Fruta fresca.....	81
Tabla 19 Resumen humedad VR 55 °C Fruta fresca.....	81
Tabla 20 Resumen actividad de agua en VR 55°C Fruta fresca.....	81
Tabla 21 Resumen humedad VR 95 °C Fruta Pretratada.	82
Tabla 22 Resumen actividad de agua en VR 95°C Fruta Pretratada.	82
Tabla 23 Resumen humedad VR 75 °C Fruta Pretratada.	82
Tabla 24 Resumen actividad de agua en VR 75°C Fruta Pretratada.	83
Tabla 25 Resumen humedad VR 55 °C Fruta Pretratada.	83
Tabla 26 Resumen actividad de agua en VR 55°C Fruta Pretratada.	83
Tabla 27 Resumen humedad en túnel de aire para Fruta Fresca.	84
Tabla 28 Resumen actividad de agua en túnel de aire para fruta fresca.....	84
Tabla 29 Resumen humedad en túnel de aire para Fruta Pretratada.	85
Tabla 30 Resumen actividad de agua en túnel de aire para fruta pretratada.	85

Índice de ecuaciones

Ecuación 1 Segunda ley de Fick.....	18
Ecuación 2 Relación tipo Arrhenius para el coeficiente de difusión.....	19
Ecuación 3 Modelo de difusión anómala basada en enfoque fraccional simplificada para tiempos largos.....	20
Ecuación 4 Tiempo de periodo de deshidratación constante.....	24
Ecuación 5 Solución de segunda ley de Fick para geométrica de placa plana semi-infinita para tiempos largos.....	25
Ecuación 6 Calculo de cambio de color total	50
Ecuación 7 Determinación de solidos solubles	51
Ecuación 8 Calculo de contenido de humedad.....	52
Ecuación 9 Adimensionalización de humedad.....	52
Ecuación 10 dependencia del coeficiente difusivo con la temperatura según modelo tipo Arrhenius.....	59

1. INTRODUCCIÓN

La industria de alimentos tiene como misión entregar productos inocuos y nutritivos que no representen un riesgo a la salud de la población, por lo cual centra gran parte de su atención y recursos en generar procesos que aseguren esta calidad en cuanto a inocuidad. Sin embargo con el paso del tiempo los consumidores se vuelven cada vez más exigentes en cuanto a la calidad del producto, exigiendo alimentos ricos en nutrientes y que conserven las características iniciales del producto, lo cual viene a ser un gran desafío.

En la actualidad existen distintas técnicas, procesos y equipos diseñados para asegurar la inocuidad de los alimentos, sin embargo se hace necesario la mejora constante de estas técnicas y equipos para cumplir con los estándares de calidad impuestos por el mercado. Es por lo cual que se hace importante las investigaciones que apunten al desarrollo de nuevas técnicas o mejoramientos de las ya existentes.

La deshidratación a través de la historia es una de las técnicas más utilizadas para la conservación de alimentos. En la era paleolítica, hace unos 400.000 años, se secaban al sol alimentos como frutas, granos, vegetales, carnes y pescados, aprendiendo mediante ensayos y errores, para conseguir una posibilidad de subsistencia en épocas de escasez de alimentos (Barbosa-Cánovas, 2000). Esta técnica de conservación preserva la calidad de los alimentos reduciendo la actividad de agua (a_w) mediante la disminución del contenido de humedad, evitando así el deterioro y contaminación microbiana de los mismos durante el almacenamiento. Se utilizan varios métodos de deshidratación o combinación de los mismos, tales como secado solar, aire caliente, microondas, liofilización, atomización, deshidratación osmótica, entre otros. Para obtener alimentos deshidratados de buena calidad es necesario estudiar en detalle los fenómenos de transferencia de materia y energía involucrados en el proceso, como los cambios producidos a nivel estructural y las reacciones bioquímicas que se llevan a cabo en el momento del proceso (Marín, 2006).

Los equipos de deshidratación disponibles hoy en la industria cumplen con entregar un alimento inocuo. Sin embargo muchas veces la calidad de estos en cuanto a la conservación de sus propiedades organolépticas y nutricionales se puede ver mermada en cierto nivel debido por ejemplo a cambios rápidos en su estructura o degradación de ciertos componentes nutricionales como vitaminas y antioxidantes. La deshidratación osmótica tiene como desventaja los altos tiempos de proceso sin embargo en la actualidad se utilizan técnicas como la aplicación de campos eléctricos moderados para reducir los tiempos de operación y con esto reducir costos. Ciertas técnicas de secado logran productos deshidratados de mayor calidad como por ejemplo la liofilización, sin embargo esta técnica tiene como desventaja los altos costos de implementación y operación. Por lo tanto resulta interesante investigar en técnicas de secado no convencionales, como lo es la ventana refractiva.

El secado en ventana refractiva es un método relativamente nuevo y se ha señalado que tiene ventajas comparativas frente a otras técnicas de secado, ya que genera un producto que retiene en gran medida las propiedades iniciales del alimento como aroma natural, sabor y nutrientes. Además el secado en ventana refractiva es un proceso relativamente simple en cuanto a su fenomenología como también en su operación, posee también bajos costo de operación lo cual lo hace muy atractivo a la industria.

La investigación tiene como objetivo general la caracterización del proceso de secado de manzanas tipo Granny Smith mediante la técnica de ventana refractiva y secado convencional (Túnel de aire), además de evaluar la efectividad de un pretratamiento de deshidratación osmótica acoplada a la aplicación de campos eléctricos moderados. Junto con esto los objetivos específicos de la investigación son:

- Determinar cinéticas y tiempos de secado para secado en ventana refractiva y convencional.
- Comparar cambios en las propiedades del producto para ambas técnicas de secado.
- Evaluar el nivel de ajuste de los modelos de difusión anómala y segunda ley de Fick.
- Estimar dependencia del coeficiente difusivo con la temperatura.

2. ANTECEDENTES GENERALES

2.1. MATERIA PRIMA

Las manzanas Granny Smith fueron descubiertas en Australia en la década de 1860 en el huerto de María Ann Smith. Las manzanas Granny Smith se introdujeron por primera vez comercialmente en el Reino Unido en la década de 1930 y más tarde en los Estados Unidos en la década de 1970. Fue una de las primeras variedades de manzana ampliamente disponibles en los supermercados debido a que posee una piel gruesa lo cual le otorga excelentes cualidades de almacenamiento y despacho del fruto. Hoy las manzanas Granny Smith crecen en Australia, Europa, Nueva Zelanda, América del Sur y Estados Unidos. Tienden a madurar mejor en climas más cálidos donde reciben una cantidad significativa de sol.

La Materia prima corresponde a manzanas Granny Smith las cuales tienen una piel de color verde brillante que a menudo presentan además pequeñas manchas blancas en su superficie. Su tamaño en relación a los demás tipos de manzana es mediano a grande y su forma es redonda, la clase Granny Smith es considerada una manzana firme y jugosa con piel de considerable espesor. Su carne es de color blanco brillante y su sabor característico tiene cierto grado de acidez, pero con un sabor sutilmente dulce. Manzanas Granny Smith cultivadas en climas más fríos a menudo toman un color amarillo con cierta tonalidad rosa. La mayoría de las manzanas son verdes en su estado inmadura y luego cuando maduran toman los colores característicos de cada tipo en tonos de rojo, rosa y amarillo. Las manzanas Granny Smith, sin embargo mantienen su tono verde tanto cuando están inmaduras y maduras.

Este tipo de manzanas es miembro de la familia de las rosas (Rosaceae), familia de la cual preceden gran parte de las frutas de consumo más popular. El parentesco exacto de las manzanas Granny Smith es desconocido, pero se cree que es un pariente de la manzana sauvage de origen francés.

Las manzanas Granny Smith tienen propiedades antioxidantes, también son una buena fuente de fibra soluble, que se ha demostrado que puede ayudar a reducir el colesterol, controlar el peso y regular el azúcar en la sangre. Además contienen vitaminas A y C, así como una pequeña cantidad de hierro, la mayoría de los cuales se encuentra en su piel (Specialty produce, 2017).

2.2. CONTEXO DEL MERCADO MUNDIAL Y CHILENO

Para el año 2016 la producción mundial de todos los tipos de manzana alcanzaron los 77,6MMton siendo Los máximos productores China con 43MMton y La unión Europea con una producción para el año 2016 cercana a 12,2MMton. Otros productores importantes son Estados unidos, Turquía, Rusia, México, Sudáfrica, la unión europea y Chile. La exportaciones a nivel mundial han ido creciendo paulatinamente en los últimos años llegando a un crecimiento que bordea el 52% para los últimos 15 años (ver figura 1) (United states departament of agriculture, 2017).



Figura 1 Exportación mundial de manzanas en los últimos 15 años.

Fuente: adaptado de (United states departament of agriculture, 2017)

En cuanto al contexto nacional Chile es un país con una gran participación en la producción mundial llegando el año 2016 a una producción cercana a los 1,2MMton. Exporta la gran mayoría de su producción teniendo como destinos principales Estados Unidos, Europa, Latinoamérica y medio oriente. Para el año 2016 Chile exportó a estos destinos 748.000ton de las cuales 78.600ton corresponden a la variedad Granny Smith. La evolución de las exportaciones totales de manzanas y del tipo Granny Smith se detalla en la Figura 2 (Bown, 2016).



Figura 2 Exportación total de manzanas y Granny Smith en Chile.

Fuente: adaptación de (Bown, 2016).

En esta contextualización cabe destacar que Chile es el país con mayor participación en la exportación de manzanas deshidratadas en el mundo. Para un mercado global en el cual las exportaciones de este producto alcanzaron en 2014 los 33.000ton, Chile para ese mismo año exportó 6.439ton lo que equivale al 19,5% del mercado global. La producción de manzanas deshidratadas se concentra en las regiones de O'Higgins y el Maule con el 95% de la producción, la cual está a cargo de las empresas Agrocepia, Invertec y Surfrut. EL precio del producto deshidratado ha ido incrementando a una tasa anual del 5,6% desde 1995 llegando a 36.000USD/ton para el año 2015. La evolución de los últimos 20 años en la exportación de manzanas deshidratadas y el precio de estas se muestra en la figura 3.

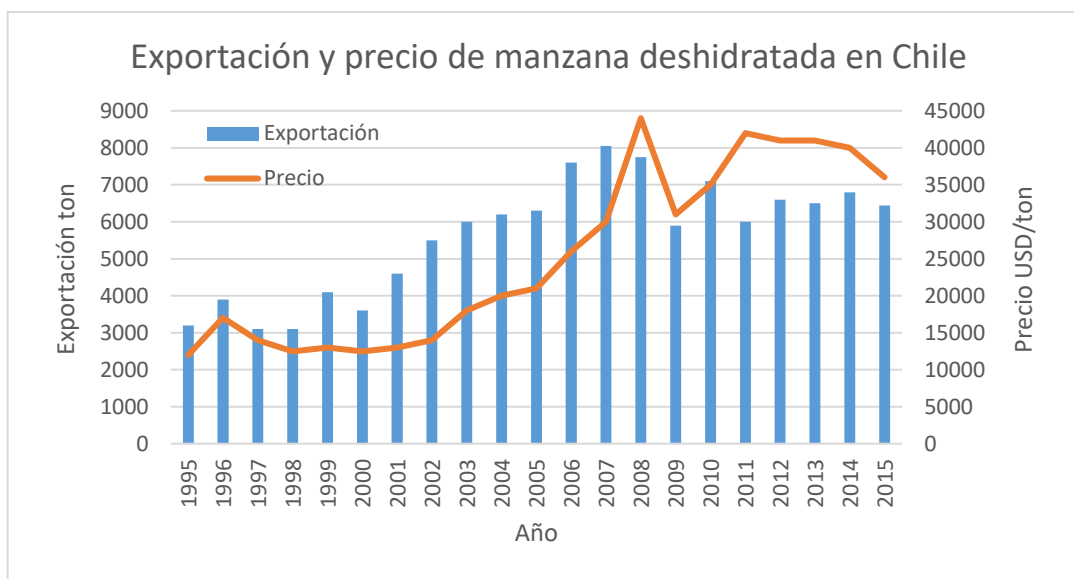


Figura 3 Exportación y precio de manzanas deshidratadas en Chile

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de TRADEMAP

2.3. DESHIDRATACIÓN DE ALIMENTOS

La deshidratación de alimentos en términos básicos se refiere a la remoción de agua del producto por evaporación o sublimación como es el caso particular de la liofilización. El secado de alimentos es uno de los procesos más antiguos usados para la conservación de alimentos, siendo hoy en día uno de los métodos más comunes y de mayor importancia en la industria de alimentos para la producción de productos sólidos (Fellows, 2000).

La deshidratación es el método más antiguo de conservación de alimentos practicado por el hombre. Durante miles de años ha secado distintos tipos de alimentos para mantenerlo durante períodos en los que el alimento no se produce o es de difícil acceso. Hoy en día la deshidratación representa una parte importante de la industria de alimentos y se extiende a todos los países del mundo. Las instalaciones de secado van desde simples secadores solares o de aire caliente hasta instalaciones de alta capacidad, sofisticados secadores por pulverización o liofilización. En la actualidad existe una gama muy grande de alimentos deshidratados y hace una contribución significativa al mercado de alimentos de conserva. Los términos deshidratación y secado se usan indistintamente para describir la eliminación de la mayor parte del agua, normalmente presente en un producto alimenticio, por evaporación o sublimación, como resultado de la aplicación de calor. La principal razón para secar un alimento es extender su vida útil más allá de la del material fresco, sin necesidad de transporte refrigerado y permitir tiempos largos de almacenamiento. Este objetivo se

logra al reducir la humedad disponible o la actividad del agua a un nivel que inhibe el crecimiento y desarrollo de microorganismos deteriorativos y/o patógenos, reduciendo la actividad de las enzimas y la velocidad a la que ocurren ciertos cambios físicos no deseados. Cabe destacar que hace necesario un envasado adecuado para mantener los bajos niveles de actividad de agua durante el almacenamiento y la distribución.

El secado también reduce el peso del producto alimenticio. El encogimiento, que ocurre con frecuencia durante el secado, reduce el volumen del producto. Estos cambios de peso y volumen pueden conducir a ahorros sustanciales en los costos de transporte y almacenamiento y, en algunos casos, a los costes de envasado. Sin embargo, la deshidratación es un proceso intensivo en energía y el costo de suministrar esta energía puede ser relativamente alto, en comparación con otros métodos de conservación.

También pueden producirse cambios perjudiciales para la calidad del alimento durante el secado. En el caso de piezas de alimentos sólidos, la contracción de su estructura puede alterar el tamaño y la forma de las muestras como también pueden producirse cambios en el color, textura y contenidos nutricionales de ciertos compuestos. Al momento de rehidratar el producto este puede presentar grandes diferencias con respecto a las propiedades del alimento inicial. Los cambios en el sabor pueden ocurrir durante el secado de alimentos sólidos o líquidos, como resultado de la pérdida de compuestos volátiles de sabor y/o el desarrollo de sabores por una cocción parcial.

Además de parámetros organolépticos un alimento puede sufrir reducciones en el valor nutritivo producto de la deshidratación. En particular, la pérdida de vitaminas C y A puede ser mayor durante el secado que en el enlatado o la congelación. La deshidratación se describe usualmente como una operación simultánea de transferencia de calor y masa. Se debe transferir calor sensible y latente al alimento para que el agua se evapore. Colocar los alimentos en una corriente de aire caliente es el método más utilizado de suministro de calor. El calor se transfiere por convección desde el aire hasta la superficie del alimento y por conducción dentro del alimento. Alternativamente, el alimento puede ponerse en contacto con una superficie caliente, el calor se transfiere por conducción a la superficie del alimento en contacto con la superficie y luego dentro del alimento. Hay un uso limitado de energía radiante, microondas y energía de radiofrecuencia en la deshidratación. La liofilización implica la congelación de los alimentos y la eliminación del hielo por sublimación. Esto se logra generalmente mediante la aplicación de calor, por conducción o radiación, en un entorno de presión muy baja. En el secado osmótico, las piezas alimenticias se sumergen en una solución hipertónica. El agua se mueve del alimento a la solución, bajo la influencia de la presión osmótica (Fellows, 2000).

2.4. TRANSFERENCIA DE MASA EN EL PROCESO DE SECADO

La transferencia de masa, en este caso el contenido de humedad, tiene lugar de una fase a otra, implicando transiciones entre los estados sólido, líquido y gaseoso. En la mayoría de los casos, el secado se realiza a por evaporación del agua del estado líquido al estado vapor mediante la adición del calor latente de vaporización. El calor suministrado por el medio de secado se utiliza para suministrar el calor latente de evaporación considerablemente grande para el agua (2200 kJ/kg). Al suministrar este calor latente se mantiene el producto a una temperatura relativamente baja, más precisamente a la temperatura de bulbo húmedo. La temperatura del bulbo de humedad (T_{bh}) es la temperatura del aire cuando alcanza el 100% de humedad relativa, ya que el agua se evapora en el medio debido al suministro de calor latente por el medio de secado. Esta temperatura es la más baja que se puede alcanzar bajo condiciones ambientales. En ciertos casos excepcionales, el secado se produce por sublimación de la fase sólida directamente en la fase vapor, mediante la adición de calor latente de fusión (Mujumdar, 2007).

La eliminación del agua líquida o del vapor de agua desde el interior del producto al medio circundante sigue un escarpado recorrido (Figura 4) que es único para cada producto como resultado de los cambios estructurales que ocurren durante el secado. Los procesos de transporte se producen tanto dentro del producto como también entre el producto y el medio de secado. Mientras que el primero es controlado por difusión, el último es una función del contenido de humedad en la superficie. El parámetro limitante para el secado es la actividad del agua (a_w), que viene a representar la fuerza gradiente para el movimiento del agua y establece una condición de equilibrio que marca el punto final del proceso de secado. La actividad de agua se puede definir como la relación de la presión de vapor de la solución con la del disolvente (agua). En palabras precisas, a_w es la humedad relativa de equilibrio dividida por 100. Esto justifica el uso de altas temperaturas en la mayoría de los métodos de secado, ya que las temperaturas más altas resultan en un menor contenido de humedad de equilibrio y por lo tanto presentan un mayor gradiente de concentración para la eliminación de humedad (Singh, 2014). 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. Según esto existen diferentes mecanismos

de transporte para el transporte de líquidos y vapores. Siendo los más importantes la difusión y el transporte por capilaridad.

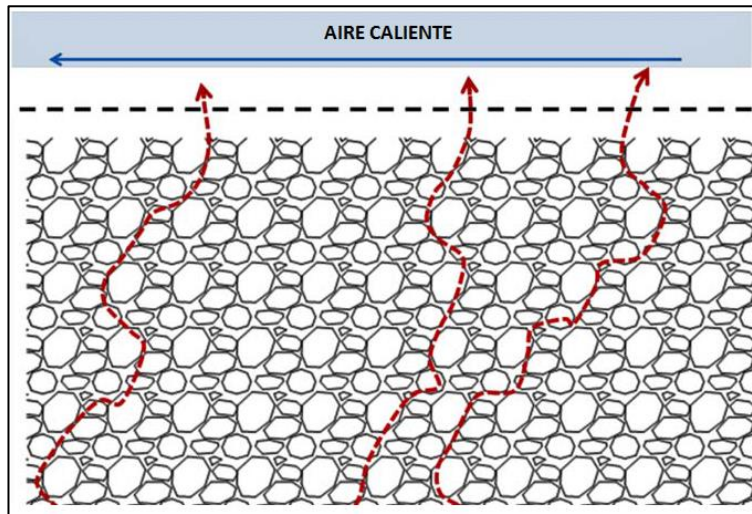


Figura 4 Recorrido del agua en un sólido durante el secado.

Fuente: *Handbook of drying for dairy products* (Indian Institute of crop processing technology, 2017)

2.4.1. MECANISMO DE DIFUSIÓN

La fuerza motriz para la transferencia de masa por difusión se obtiene por la diferencia de presión parcial o concentración que prevalece entre la superficie del producto y la fase gaseosa no saturada circundante. Además de la presión o gradiente de concentración, la transferencia de masa también depende de las propiedades del sistema, representadas por el coeficiente de transferencia de masa. La ecuación gobernante para la transferencia de masa por difusión viene dada por la segunda ley de Fick (Ecuación 1):

$$\frac{dx}{dt} = D_{eff} \frac{\partial^2 x}{\partial^2 l} \quad (1)$$

Donde x es el contenido de humedad del producto kg agua / kg producto, t es el tiempo s, l es la distancia en la dirección de transferencia de masa y D_{eff} es el coeficiente de difusión m^2/s .

La difusividad aumenta con un aumento en la temperatura del aire de secado una relación tipo Arrhenius como la mostrada en la ecuación 2.

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(\frac{-E_0}{RT}\right) \quad (2)$$

Donde D_0 es el factor pre-exponente m^2/s , E_0 es la energía de activación kJ/mol , R es la constante de gas ideal $kJ/mol\ K$ y T es la temperatura K .

La difusión puede ser la de agua líquida o vapor de agua, con presión osmótica y presión parcial como fuerzas motrices, respectivamente. La difusión de líquidos está limitada por el contenido de humedad de equilibrio. La diferencia en la presión total producida por la presión y la temperatura externas también ayuda en el transporte de líquido o vapor. Esto se rige por la ley de Poiseuille, que explica el flujo laminar de un fluido incompresible y newtoniano que fluye a través de un largo tubo cilíndrico de sección transversal constante, mediante la diferencia de presión. Es por esto que además de la concentración y el gradiente de presión, la microestructura interna del producto también juega un papel importante en el transporte de difusión (Geankoplis, 2006).

2.4.2. MECANISMO DE CAPILARIDAD

Las fuerzas capilares actúan en conjunto con el mecanismo de difusión para facilitar el secado de productos alimenticios. En este mecanismo, el movimiento de la humedad es controlado por la tensión superficial más que por la difusión. La microestructura porosa del producto juega un papel dominante aquí. Los poros interconectados se comunican con la superficie externa por medio de canales a través de los cuales se retira la humedad. La eliminación del agua se acompaña de la formación de un menisco a través de cada poro y posterior ajuste de la tensión interfacial en el límite sólido-agua. Estas fuerzas capilares actúan como la fuerza motriz para el movimiento de humedad desde dentro de la estructura porosa del producto a la superficie. Cabe destacar que el tamaño de poro juega un papel influyente, a menor tamaño de los poros se tiene una fuerza capilar mayor (Geankoplis, 2006). Las fuerzas capilares pueden ser mejoradas por el uso de los llamados tensioactivos que son compuestos que reducen la tensión superficial del agua (Rahman, 2007).

2.4.3. DIFUSIÓN ANOMALA

Muchos procesos de secado son modelados bajo los postulados de la segunda ley de Fick, para algunos procesos de secado esta ley representa de buena forma el proceso de difusión del agua en el alimento, sin embargo muchas veces también las cinéticas de secado presentada por algunos alimentos muestran desviaciones a lo predicho por Fick. Sin embargo, la complejidad del proceso de transferencia de masa debido a la naturaleza de los tejidos vegetales, su estructura celular fuertemente heterogénea, la contracción y los cambios de volumen durante el proceso de deshidratación debido a la eliminación de la humedad hace que la predicción realizada por la segunda ley de Fick no sea exacta, porque varias de las suposiciones realizadas para la aplicación de esta ley no encajan con tejidos heterogéneos como la manzana (Simpson, 2015).

Es por lo anterior que se propone usar el enfoque de cálculo fraccional para poder representar el proceso de difusión en el secado de manzanas en ventana refractiva, esta es una herramienta que permite modelar matemáticamente los casos donde existe una difusión anómala que tenga velocidades mayores o menores a las predichas por la segunda ley de Fick. Este modelo de difusión anómala basada en el enfoque de cálculo fraccional simplificado para tiempos largos de secado se presenta en la ecuación 3.

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

Donde MR_t se define como una humedad adimensional, W_t es el contenido de humedad del sólido para el tiempo t , W_e es el contenido de humedad de equilibrio, W_c es el contenido de humedad inicial, l el espesor del sólido, D_{eff} es el coeficiente de difusión con dimensiones de $\frac{m^2}{s^\alpha}$ y t es el tiempo en segundos. El valor del parámetro α es un valor que depende del material y define el proceso de difusión como sub difusivo para $0 < \alpha < 1$, como súper difusivo para $\alpha > 1$ y con comportamiento según lo predicho por la segunda ley de Fick para $\alpha = 1$.

2.5. TÉCNICAS DE DESHIDRATACIÓN

La clasificación de las técnicas de secado o los equipos utilizados para este fin se puede realizar según las características y propiedades físicas del producto húmedo o el mecanismo de transferencia de calor asociado al proceso. Es este último el más utilizado ya que resulta más interesante industrialmente y revela diferencias en el diseño y funcionamiento de los

equipos. De acuerdo al segundo criterio (mecanismos de transferencia) se distingue la siguiente clasificación (Maupoey, 2001):

- Secadores directos: utilizan gases calientes en contacto directo con el alimento húmedo para suministrar el calor y además arrastrar el agua vaporizada. Para este tipo de secadores predomina la convección como mecanismo de transferencia de calor y son los más ampliamente utilizados en la industria. Ejemplos de este tipo de secadores son: Secador de bandejas, secador de túnel, secador rotatorio, secador de horno o estufa y secador por aspersion.
- Secadores indirectos: El calor se transmite al sólido húmedo a través de la pared que lo contiene, eliminándose el líquido vaporizado de forma independiente del medio calefactor. En este caso el mecanismo de calor predominante es la conducción, sin embargo también están presente en ciertos niveles la convección y radiación. Ejemplos para secadores indirectos son: Secador de tambor, secador indirecto al vacío con anaqueles y ventana refractiva.
- Secadores por radiación: Se basan en la transferencia de energía radiante para evaporar la humedad del producto. Esta energía se produce eléctricamente (infrarrojos) o por medio de refractarios únicamente calentados con gas. Cuando la radiación térmica es dirigida a un cuerpo, puede ser absorbida y su energía convertida en calor, o reflejada desde la superficie del cuerpo, o transmitida a través del material. Es la energía absorbida que puede proporcionar calor para los propósitos de secado. Generalmente, en materiales sólidos toda la energía radiante se absorbe en una capa muy poco profunda debajo de la superficie. Por lo tanto, el secado radiante es más adecuado para secar capas delgadas o láminas de material o recubrimientos. En el caso de los alimentos, existen relaciones complejas entre sus propiedades físicas, térmicas y ópticas. Estos, a su vez, influyen en la medida en que la energía radiante es absorbida por los alimentos. Los componentes de proteínas, grasas y carbohidratos de los alimentos tienen sus propios patrones de absorción. El agua en forma líquida, vapor o sólida también tiene patrones de absorción característicos que influyen sobre la absorción de energía radiante. Es muy difícil lograr un calentamiento uniforme de los alimentos mediante calor radiante. El control de la velocidad de calentamiento también es un problema (Brennan, 2006). Ejemplos para este tipo de secadores son: Secador solar y ventana refractiva.
- Secadores dieléctricos y microondas: Se consideran dentro de esta clasificación todos los equipos que usan las frecuencias electromagnéticas superiores o iguales al espectro de infrarrojos. Generalmente se dice que el calentamiento dieléctrico se realiza a frecuencias entre 1 y 100 MHz, mientras que el calentamiento por

microondas funciona entre 300MHz y 300GHz. Aunque los principios básicos de calentamiento y secado en frecuencias dieléctricas y microondas son los mismos, los métodos de generación y equipos son diferentes. Un hecho crucial que debe tenerse siempre presente es que “microondas y dieléctricos” no son formas de calor sino formas de energía que se manifiesta como calor a través de su interacción con la materia. Es como si esta energía hiciese que los materiales se calentasen por ellos mismos. Calentar y secar con energía de microondas y dieléctrica es claramente diferente al calentamiento y secado convencionales. Mientras los métodos convencionales dependen sobretodo de la lentitud del calentamiento desde la superficie del material al interior debido a un gradiente de temperatura, el calentamiento con energía dieléctrica y microondas es un calentamiento global debido a la interacción del campo electromagnético con el material como uno todo. El calentamiento sucede casi instantáneamente y puede ser muy rápido. La rapidez de calentamiento puede ser una ventaja y puede realizarse en segundos o minutos lo que podría tardar minutos, horas e incluso días con un método de calefacción convencional (Maupoey, 2001).

La clasificación realizada anteriormente se hizo en función del mecanismo de transferencia de energía utilizado para deshidratar el alimento. Se detalló además algunos ejemplos para cada clasificación, sin embargo esta clasificación deja fuera a la liofilización la cual si bien es usada bajo condiciones específicas en la industria también es la técnica que entrega mejores resultados. Cabe destacar que algunos autores reconocen esta técnica como un secador del tipo indirecto (Maupoey, 2001). Usualmente para alimentos que no deben calentarse ni siquiera a temperaturas moderadas para un secado común, se secan por liofilización. Por lo general, la sustancia que va a secarse se congela exponiéndola a aire muy frío. En la liofilización por congelación, el agua se elimina como vapor por sublimación del material congelado en una cámara al vacío. Después de que la humedad se sublima como vapor, éste se extrae con bombas de vacío mecánicas o eyectores de chorro de vapor. (Geankoplis, 2006)

Si bien existen muchas técnicas de deshidratación como también equipos diseñados para esta tarea en lo que sigue se hará un pequeño énfasis para el secado convectivo y más aún para el secado en ventana refractiva ya que son los métodos de secado que fueron evaluados y comparados en la presente investigación.

2.6. SECADO POR AIRE CALIENTE O CONVENCIONAL

Cuando se coloca un material húmedo en una corriente de aire caliente, el calor se transfiere a su superficie, principalmente por convección. El vapor de agua formado es arrastrado lejos de la superficie de secado en la corriente de aire. Si se considera un sistema en el que un material húmedo, que consiste en un sólido inerte humedecido con agua pura, en forma de una placa delgada, se coloca en una corriente de aire caliente, que fluye de forma paralela a una de sus caras. La temperatura, la humedad y la velocidad del aire se mantienen constantes, se supone además que todo el calor se transfiere al sólido desde el aire por convección y que el secado tiene lugar sólo desde una dirección (superficie). Si representamos la tasa de cambio (dH/dt) del contenido de humedad en función del tiempo se debería obtener un comportamiento como el representado en la figura 5.

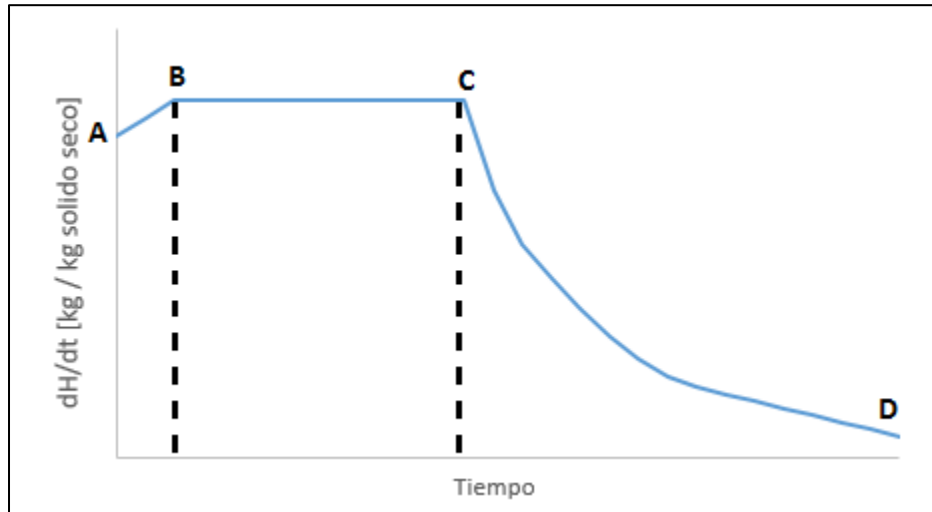


Figura 5 Tasa de cambio de humedad en el tiempo para un proceso de secado con aire caliente

Fuente: adaptado desde (Brennan, 2006)

El periodo A-B es comúnmente conocido como periodo de sedimentación o equilibrio. La superficie del sólido húmedo entra en equilibrio con el aire. Este período suele ser corto comparado con el tiempo total de secado. El período B-C se conoce como período de tasa deshidratación constante. Durante este periodo la superficie del sólido se satura con agua. A medida que el agua se evapora de la superficie, el agua del interior del sólido se desplaza a la superficie, manteniéndola en estado saturado. La tasa de secado durante este periodo permanece constante. También lo hace la temperatura superficial, a un valor correspondiente a la temperatura del bulbo húmedo del aire. Para este periodo mediante la realización de los balances energéticos y de masa en la superficie del alimento se ha deducido una ecuación que predice el tiempo del periodo de deshidratación constante la cual se muestra a continuación:

$$t_c = \frac{(W_0 - W_c)\rho_s L_s l}{h_c(T_{bh} - T_{bs})} \quad (4)$$

Donde t_c es el tiempo del periodo de deshidratación constante, W_0 es el contenido de humedad inicial del sólido (base en peso seco), W_c es el contenido de humedad al finalizar el periodo de deshidratación constante, ρ_s corresponde a la densidad del sólido, L_s es el calor latente de evaporación del agua a una temperatura T_{bs} la cual corresponde a la temperatura de bulbo seco del aire, T_{bh} es la temperatura de bulbo húmedo en el aire, l es el espesor de la placa y h_c es el coeficiente de transferencia de calor correspondiente a la convección del sistema.

En la ecuación 3 se observa que los principales factores que influyen en la velocidad de secado durante el periodo de velocidad constante son la temperatura, la humedad del aire y el área de la superficie de secado. La velocidad del aire también tiene una influencia, ya que el coeficiente de transferencia de calor depende de la turbulencia del sistema. Mientras exista este estado de equilibrio, se pueden mantener altas tasas de evaporación, sin peligro de sobrecalentamiento del sólido. Esta es una consideración importante al secar los alimentos sensibles al calor. Muchos alimentos presentan este periodo de secado constante. Sin embargo, generalmente este periodo es corto en comparación con el tiempo de secado total. Muchos alimentos por el contrario no muestran un período medible de tasa constante. A medida que el secado procede, en algún punto (representado por C) el movimiento del agua hacia la superficie no es suficiente para mantener la superficie en una condición saturada. El estado de equilibrio en la superficie ya no se mantiene y la velocidad de secado comienza a disminuir. El punto C es conocido como el punto crítico y el período C-D es el período de la tasa decreciente. A partir del punto C, la temperatura en la superficie del sólido se eleva y se aproxima a la temperatura del bulbo seco del aire cuando el secado se acerca a su término. Por lo tanto, es hacia el final del ciclo de secado donde existe mayor probabilidad que ocurra cualquier daño al alimento producto del aumento de temperatura. Para algunos alimentos se identifican dos o más periodos de caída en los puntos de inflexión en la curva. No existe una explicación generalmente aceptada para este fenómeno. Durante el periodo de velocidad decreciente, la velocidad de secado se rige por factores que afectan al movimiento del agua dentro del sólido. La influencia de factores externos, como la velocidad del aire, se reduce en comparación con el período de deshidratación constante. En la deshidratación de alimentos sólidos, la mayor parte del secado tiene lugar bajo condiciones de velocidad decreciente.

Numerosos modelos matemáticos han sido propuestos para representar el secado en el período de velocidad descendente. Algunos son empíricos y se desarrollaron ajustando las

relaciones a los datos obtenidos experimentalmente. Otros se basan en el supuesto de que prevalece un mecanismo particular de movimiento de humedad dentro del sólido.

El más conocido de estos se basa en el supuesto de que la humedad migra dentro del sólido por difusión como resultado de la diferencia de concentración entre la superficie y el centro del sólido. Se cree que la segunda ley de Fick de difusión se aplica a este movimiento. Una solución bien conocida a esta ley está representada en la siguiente ecuación (Crank, 1975):

$$M_{Rt} = \frac{W_t - W_e}{W_c - W_e} = \frac{8}{\pi^2} \left[\exp \left(-D_{eff} t \left(\frac{\pi}{2l} \right)^2 \right) \right] \quad (5)$$

Donde M_{Rt} se define como una humedad adimensional, W_t es el contenido de humedad del sólido para el tiempo t , W_e es el contenido de humedad de equilibrio, W_c es el contenido de humedad inicial al inicio del periodo de velocidad decreciente, este último por lo general es aproximado al contenido de humedad inicial del alimento (W_0), D_{eff} es el coeficiente de difusión y l el espesor del sólido.

En la Ecuación 5 se asume que el valor de D_{eff} es constante a lo largo del período de velocidad decreciente. Sin embargo, muchos autores han informado que este parámetro disminuye a medida que disminuye el contenido de humedad. Algunos autores que reportaron existencia de dos o más periodos de velocidad decreciente aplicaron con éxito la ecuación 5 a los periodos individuales, pero se debe utilizar para ese caso particular un valor diferente para el coeficiente difusión en cada período. Muchos otros factores pueden cambiar el patrón de secado de los alimentos. El encogimiento altera las dimensiones del alimento, la presencia de paredes celulares puede dificultar el movimiento del agua dentro de los sólidos, la densidad y porosidad del alimento pueden cambiar durante el secado, las propiedades térmicas del alimento, tales como calor específico y conductividad térmica, cambian ya que estos parámetros dependen del contenido de humedad. A medida que el agua se mueve hacia la superficie, lleva consigo cualquier material soluble, como azúcares y sales. Cuando el agua se evapora en la superficie, las sustancias solubles se acumulan en la superficie. Esto puede contribuir a la formación de una capa seca impermeable, lo que puede dificultar el secado. La teoría de la difusión no tiene en cuenta estos factores y por lo tanto ha tenido un éxito limitado en el modelado de la tasa de caída de secado. Se han propuesto muchos modelos más complejos, que intentan tener en cuenta algunas de estos cambios, como por ejemplo el cálculo proximal el cual se analizará más adelante.

Como se mencionó anteriormente el secado convectivo se caracterizan por utilizar gases calientes que entran en contacto directo con el sólido húmedo al que transmiten calor por convección fundamentalmente y que arrastran fuera del secador los vapores producidos.

Los gases calientes pueden ser:

- Aire calentado por resistencias eléctricas.
- Aire calentado por vapor de agua.
- Productos de la combustión.
- Gases inertes.
- Vapor recalentado.
- Aire calentado por radiación solar.

Este tipo de secadores pueden ser continuos o batch, siendo el costo de funcionamiento menor en los primeros y utilizándose los segundos para bajas capacidades de producción y para el tratamiento de productos que exigen manipulación especial (Maupoey, 2001).

2.6.1. SECADOR DE TÚNEL

En palabras simples este tipo de secador consiste en un largo túnel aislado térmicamente en donde el alimento a secar es cargado en carros con bandejas. Estos carros entran por uno de los extremos del túnel avanzando a una velocidad determinada, avanzan por toda la extensión del túnel para luego ser removidos por el extremo opuesto. Por otra parte el aire caliente fluye también por el túnel a través de las bandejas, estas pueden estar perforadas permitiendo el flujo del aire en dirección perpendicular al flujo de los carros y el aire. Existen configuraciones particulares para este tipo de secador las cuales dependen de la dirección del aire con respecto a los carros, teniéndose operación co-corriente y contracorriente, para ambas con flujo de un paso de aire y además con recirculación de este (Brennan, 2006). Estas configuraciones se pueden ver en la figura 6.

Cuando se desea secar partículas sólidas granulares, pueden utilizarse transportadores perforados o de fondo de tamiz. Los sólidos granulares húmedos se transportan en forma de una capa delgada, sobre una superficie de tamiz o perforada a través de la cual se fuerza el paso de aire caliente, ya sea hacia arriba o hacia abajo. El secador consta de diversas secciones en serie, cada una con un ventilador y serpentines de calentamiento. Un ventilador adicional extrae cierta cantidad de aire hacia la atmósfera. En algunos casos, los materiales en forma de pasta pueden preformarse en cilindros y colocarse sobre el transportador para secarse (Geankoplis, 2006).

Para el secado de alimentos en túnel se tienen las siguientes ventajas y desventajas:

Ventajas

- Funcionamiento continuo, lo que permite grandes flujos de procesamiento.
- Se pueden secar gran variedad de alimentos.
- Operación sencilla.

Desventajas

- Alto costo de mano de obra para carga y descarga.
- Tiempos de secado relativamente altos.
- No es rentable a baja escala de producción.
- Solo puede secar productos sólidos.

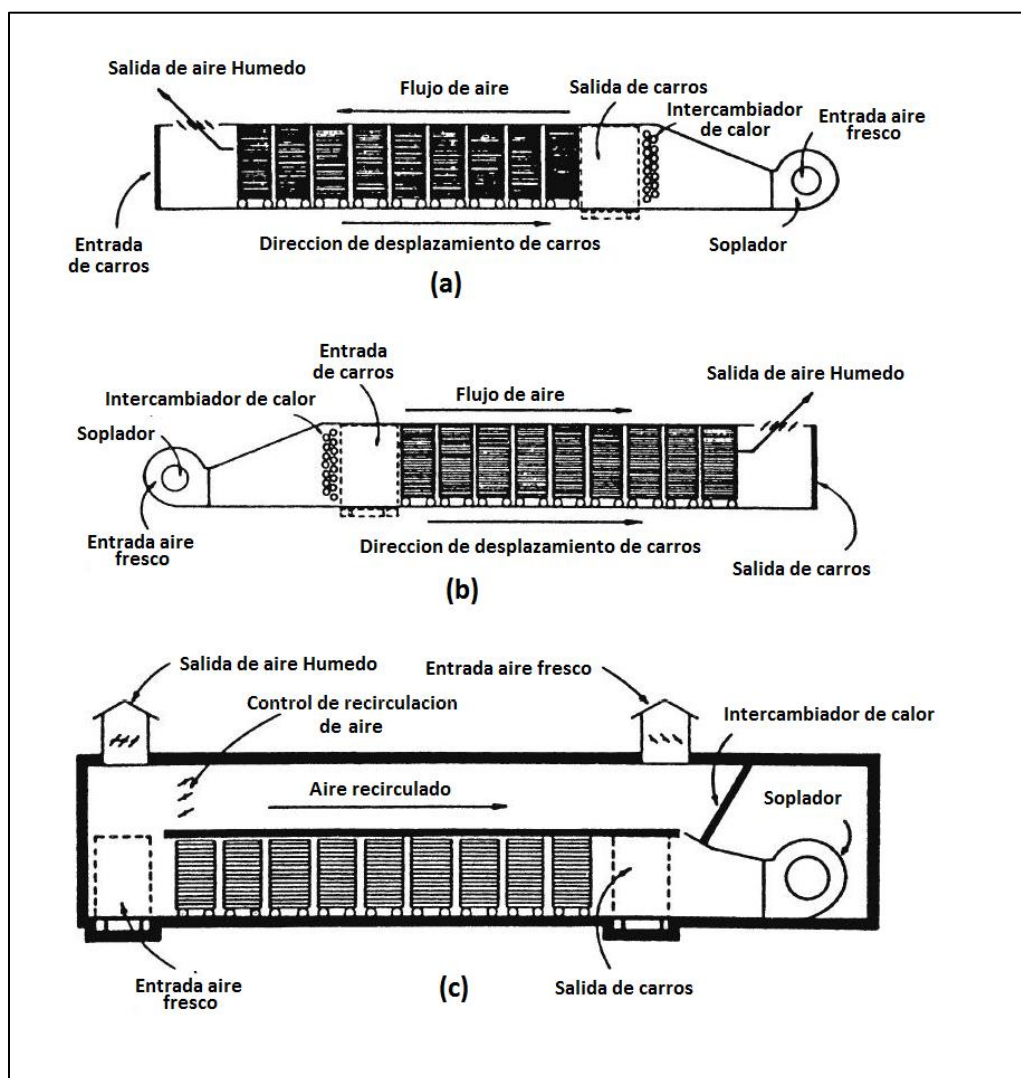


Figura 6 Configuraciones de túnel de aire para secado convencional.

Fuente: Adaptado de (Mujundar, 2015)

2.7. TECNOLOGÍA DE VENTANA REFRACTIVA PARA LA DESHIDRATACIÓN DE ALIMENTOS

La técnica de secado en ventana refractiva es un método relativamente nuevo para la deshidratación de alimentos. Los principios de su funcionamiento son bastante simples, utiliza agua a 95°C como medio de transferencia de calor para transferir la energía principalmente mediante el mecanismo de radiación y conducción. El sistema de VR está diseñado para permitir el paso de la radiación proveniente desde el agua caliente a través de una película que está flotando en el agua, de esta forma, la radiación térmica incide en el producto, lo cual provoca la evaporación del agua contenida en este. Con lo anterior se logra una rápida deshidratación del alimento a presión atmosférica.

En cuanto a la operación de la ventana refractiva esta se puede llevar a cabo de forma batch y tan elemental como la mostrada en el esquema de la figura 7 en donde solamente se tiene un baño termostático de acero inoxidable con su respectivo controlador de temperatura lo cual permitirá llevar a cabo el proceso a la temperatura deseada. El baño anterior está cubierto con la película en la cual se dispondrá el alimento a secar. (Ochoa-Martinez, 2012)

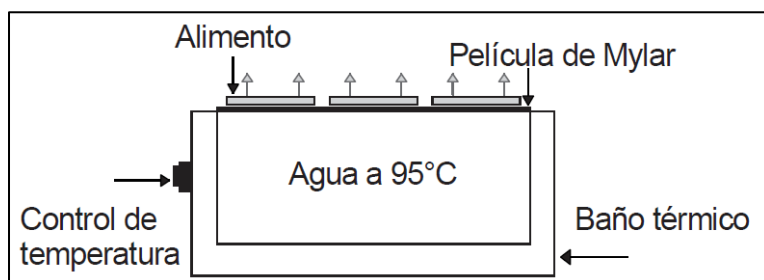


Figura 7 Esquema de ventana refractiva operada de forma batch.

Fuente: Adaptado de Ochoa-Martínez, 2012

Además de esta configuración el secado en ventana refractiva también se puede realizar de forma continua, esto se logra con una configuración en serie de varias cámaras de secado como la mostrada en la figura 8. Para esta operación el alimento húmedo es dispuesto en una película, la cual transporta el alimento por cada una de las cámaras dispuestas logrando de esta forma la deshidratación requerida. (MCD TECHNOLOGIES INC, 2000).

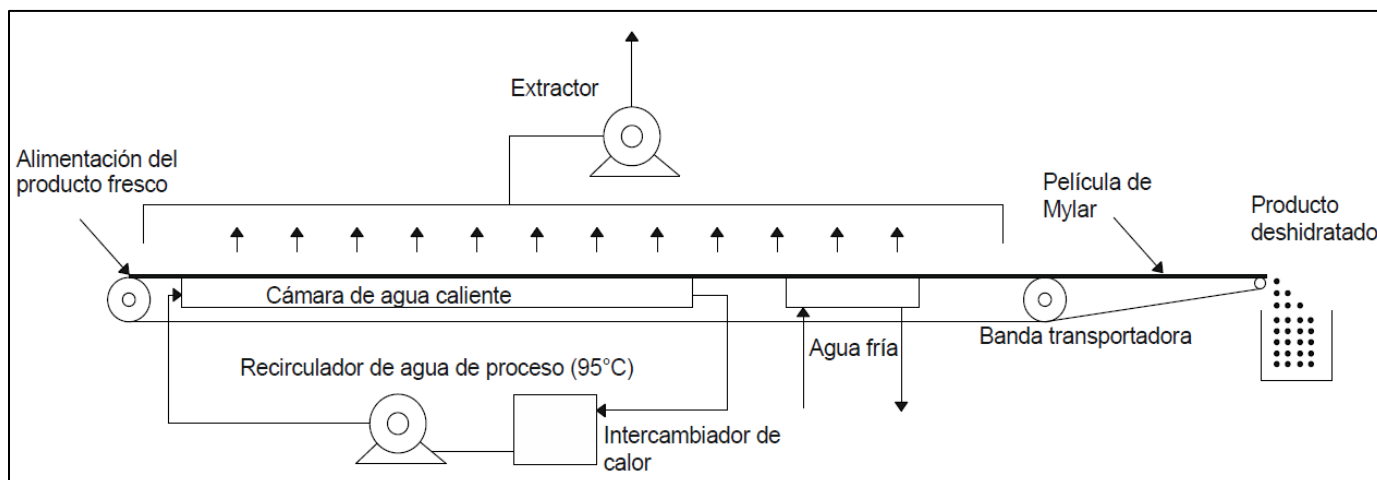


Figura 8 Esquema de ventana refractiva operada de forma continua.

Fuente: Adaptado de Morales, J. 2013

La película mencionada anteriormente es usada para separar el alimento del agua caliente y está hecha de un material comercializado con el nombre de MylarTM que básicamente es Tereftalato de polietileno (por sus siglas en inglés PET) el cual es un tipo de plástico ampliamente utilizado en envases de bebidas y textiles (Mujundar, 2015). Para las propiedades físicas de este tipo de plástico destacan: alta flexibilidad, transparencia del material para espesores entre 12 y 23 μ m, alta resistencia a la tracción (210MPa), resistencia a la humedad y a agentes químicos, además, puede soportar temperaturas extremas que van de -70 a 150°C, además de esto como se mencionó anteriormente este material permite el paso de energía infrarroja (DUPONT, 2012).

Para el secado de un alimento en ventana refractiva es necesario que este se encuentre en forma de pulpa, jugo o rodaja. Se recomienda que el alimento tenga un espesor de 0,2 a 1,0mm de espesor, esto para tener tiempos cortos de secado además de que algunas investigaciones señalan que la eficiencia energética del proceso de secado en ventana refractiva aumenta con la disminución del espesor (Ochoa-Martinez, 2012).

Múltiples trabajos de investigación con respecto al secado en ventana refractiva han cuantificado y evaluado los cambios en las propiedades organolépticas y fisicoquímicas provocados en el proceso, encontrando que la deshidratación en ventana refractiva retiene el color, sabor y aroma natural del alimento, además de una buena retención en los contenidos de vitamina C y compuestos activos. Además gracias a los niveles de remoción de agua que logra esta técnica de secado se generan alimentos deshidratados microbiológicamente estables.

En los últimos años la tecnología de ventana refractiva ha venido a ser una interesante alternativa a la industria de alimentos debido a lo simple de la técnica y bajos costos de operación en comparación a otras técnicas de secado. La tecnología VR ha sido utilizada en el desarrollo de secadores y evaporadores a nivel industrial garantizando una alta eficiencia

térmica, operación limpia y bajos costos de mantenimiento (MCD TECHNOLOGIES INC, 2000).

La tecnología de ventana refractiva ha demostrado ser una eficiente alternativa en la deshidratación de alimentos. En los últimos años ha sido expuesta su efectividad en múltiples investigaciones en donde se ha aplicado el productos vegetales incluyendo frutas (arándano, frambuesa, extractos de uva, mango, fresa, etc.), hortalizas (espárragos, zanahorias y calabaza), productos a base de hojas (especias, té y Aloe vera), productos marinos (algas, pescado y mariscos) (Clarke, 2004).

Son múltiples las ventajas asociadas a las operaciones de secado en VR, destacan una alta velocidad de deshidratación, conservación de contribuyentes nutricionales y propiedades organolépticas (Color, vitaminas y antioxidantes), además los costos asociados a la operación son reducidos al poseer una fuerte eficiencia energética en comparación a otros métodos de deshidratación. De la misma forma es considerado un proceso ambientalmente amigable debido a los bajos consumos de agua y conservación de la calidad del aire al retener en el alimento una alta cantidad de componentes volátiles (MCD TECHNOLOGIES INC, 2000).

En cuanto a un poco de la historia esta técnica de secado fue patentada por Magoon en 1986 para posteriormente en el año 1998 MCD Technologies Inc. Retomo esta tecnología para aplicarla en el desarrollo de un secador y un evaporador de alimentos VR (MCD TECHNOLOGIES INC, 2000).

En cuanto a la fenomenología y operación de la tecnología de VR intervienen dos materiales sólidos (película y alimento) y dos fluidos (agua y aire). Cuando el agua es calentada, la energía es transferida a través de ésta por convección, el calor viaja hacia los alrededores, perdiéndose en su mayoría a causa de la evaporación. Pero, al cubrir el agua con una película de plástico transparente la evaporación es bloqueada, de esta forma, la película de plástico “refracta” parte del calor y lo regresa al agua impidiendo la transferencia de calor por convección y permitiendo el paso de energía hacia el alimento únicamente por conducción y radiación. Debido a la transparencia de la película a la radiación infrarroja se forma una “ventana” que permite el paso de la energía por radiación en su mayoría. Finalmente, la energía llega al alimento y genera la evaporación del agua que lo constituye (Clarke, 2004).

Cualitativamente podemos ver la fenomenología del proceso pensando que cuando no hay producto en el equipo la diferencia del índice de refracción entre el agua y el aire es tan grande que la energía radiante incidente en la interfaz plástico-agua se refleja en su gran mayoría y es muy poco lo que efectivamente se transmite al aire (o se pierde). Cuando la ventana está cargada con algún producto ya sea en forma de puré o rodajas el cual tiene contenidos de aguas cercanos al 90% en peso, la diferencia entre los índices de refracción entre el agua y los alimentos en la interfaz agua plástico se reduce considerablemente

(Capariño, 2012). Al tener índices de refracción más cercanos se reduce la reflexión en esta interfaz lo cual aumenta la energía transmitida en forma de radiación hacia el alimento. El material plástico se considera un buen transmisor de radiación térmica (se considera casi transparente a la radiación térmica en las longitudes de onda pertinentes). La "ventana" refractiva se refiere a esta tolerancia de radiación térmica para pasar a través del material plástico cuando un material húmedo está en contacto con él, es decir, como si el material plástico no estuviera presente, correspondiente a que la ventana esté abierta. Esta "ventana" refractiva mencionada no permanece abierta durante toda la duración del proceso de secado. A medida que el material húmedo se seca, su índice de refracción aumenta creando un desajuste y después de eso, la mayor parte de la radiación térmica se refleja en agua que deja de secarse. Según esto último se tiene que la cinética de secado es más rápida para los tiempos iniciales cuando se tienen los contenidos de humedad más grandes, reduciéndose así la tasa de remoción de agua a medida que se avanza en el secado.

Como se ha mencionado anteriormente el fluido térmico utilizado en el secado VR es el agua, esto se explica por varias razones. El agua desionizada es comparativamente uno de los compuestos de más bajo costo y además posee un alto punto de ebullición (Leung, 1981). Por otra parte el agua tiene una gran facilidad para absorber energía a bajas temperaturas, el agua líquida presenta los máximos valores de absorción para longitudes de onda de: 3.0, 4.7, 6.0 y 15.3 μm (Sandu, 1986). Otra característica favorable que presenta el agua es su alta emisividad ($\epsilon = 0.95$) incluso para temperaturas bajas (Holman, 1998). Lo anterior le da ventajas al agua en cuanto a la energía que puede transferir mediante radiación por sobre otros fluidos.

Como se ha podido ver la tecnología de VR es simple siendo su principal ventaja la alta tasa de transferencia de energía que logra lo cual la hace una técnica adecuada para procesos con altos requerimientos energéticos como lo es la deshidratación y secado de alimentos.

El secador de ventana refractiva tiene cuatro componentes principales: una película transparente del plástico Mylar, una cámara de agua caliente, una cámara de agua fría y un sistema de extracción de aire tal como se muestra en la Figura 8 (MCD TECHNOLOGIES INC, 2000). El mylar para sistemas que funcionan de forma continua trabaja como una cinta que transporta al alimento al momento que este se deshidrata a lo largo del equipo. El agua contenido en la cámara termoregulada se encuentra generalmente a 95°C. Al estar el agua cubierta por la película plástica se evita la evaporación y el agua es recirculada haciéndose pasar por un intercambiador de calor eléctrico. La efectividad en la transmisión de energía vía radiación es máxima cuando la película plástica esta en total contacto con el agua, con lo anterior se evitan la formación de burbujas de aire (Nindo, 2007). La cámara de agua fría tiene como función enfriar el alimento, y el extractor ubicado en la parte superior extrae el aire húmedo producido durante el secado.

En tamaños de operación industrial un secador de VR mide aproximadamente 6m de longitud y 2,4m de ancho. Teniendo un área efectiva de secado que varía entre 3,1 a 4,6m².

Dependiendo de los niveles de producción deseados se pueden implementar módulos en serie (Nindo, 2003). Los módulos en serie cuentan con una sección en la parte frontal para introducir el alimento y una parte final para removerlo de la película plástica para poder ser retirado (Clarke, 2004).

En cuanto a la velocidad de deshidratación por VR esta es considerada alta en comparación a otros procesos de secado, como por ejemplo el secado convectivo que vendría a ser en la actualidad la técnica más popular en deshidratación de alimentos (Ochoa-Martinez, 2012). Además de otras menos convencionales como lo es la liofilización (Abonyi, 2002). La temperatura del agua caliente como se mencionó anteriormente por lo general se mantiene a 95°C con lo cual se logra que la temperatura interna del alimento regularmente sea menor a 70°C para espesores pequeños del alimento (Nindo, 2007). La velocidad del sistema VR queda en evidencia en la investigación de Ochoa-Martínez (Ochoa-Martinez, 2012) en donde se logró para rebanadas de mango de 1 y 2 mm de espesor reducir la humedad desde 4,9 – 6,14 kg de agua/Kg sólidos secos hasta una humedad final del orden de 0,05 kg de agua/Kg sólidos secos en tiempos de 30 y 60 min respectivamente para cada espesor a una temperatura de $92,5 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Por otra parte para rodajas de espárragos se necesitaron 4,5 min para lograr una deshidratación desde un contenido inicial de 11,5 kg de agua/Kg sólidos secos hasta una humedad final de 0,04 kg de agua/Kg sólidos secos para una temperatura que fluctuó entre 95-97°C (Nindo, 2003). De la misma forma para puré de zanahorias y puré de fresas que iniciaban con una humedad de 8,43 y 14,63 kg de agua/Kg sólidos secos respectivamente, la humedad final lograda fue del orden de 0,1 kg de agua/Kg sólidos secos para el puré de fresas y 0,06 kg de agua/Kg sólidos secos para el puré de zanahorias, empleando para ambos casos una temperatura de operación del agua de 90°C (Abonyi, 2002).

Una de las principales ventajas comparativas del secado en VR frente a los demás métodos de secado es como se mencionó anteriormente su alta eficiencia energética la cual se ha registrado puede llegar a un 70%. En la tabla 1 se puede ver una comparación entre los consumos y eficiencias presentes en distintos métodos de secado de alimentos. La eficiencia mostrada se define como la energía necesaria para evaporar 1 kg de agua en el alimento sobre la energía requerida durante la operación del equipo en cuestión.

Tabla 1 Comparación de eficiencias térmicas para distintos equipos de secado

Equipo	Consumo típico de energía kJ/kg de agua	Energía de evaporación kJ/kg de agua	Eficiencia térmica %
Túnel de aire	5.000 – 6000	2.300	38 – 42
Secador de banda	4.000 – 6.000	2.400	38 – 58
Inyección de vapor	5.000 – 7.000	2.370	33 – 46
Secador rotatorio	4.600 – 9200	2.588	25 – 50
Lecho Fluidizado	4.000 – 6.000	2.400	38 – 58
Secador Spray	4.500 – 11.500	2.840	20 – 51
VR (escala piloto)	-	-	28 – 48
VR (escala industrial)	4.700 – 8.100	3904	52 – 70

Fuente: Adaptado de (Nindo C. F., 2003)

2.7.1. CARACTERÍSTICAS DE LOS ALIMENTOS SECADOS EN VR

Como se ha mencionado con anterioridad el secado de alimentos en ventana refractiva posee la capacidad de conservar propiedades como el color, sabor, vitaminas y antioxidantes (Abonyi, 2002), de la misma forma se genera un producto que es microbiológicamente estable (Feng, 2001) además de obtenerse un producto con una buena capacidad de reconstitución al rehidratarlo, esto último como consecuencia de la alta porosidad del producto (Ochoa-Martinez, 2012).

2.7.1.1. CARACTERÍSTICAS MICROBIOLÓGICAS DE LOS ALIMENTOS SECADOS EN VR

La ventana refractiva al igual que los demás equipos de secado existentes no posee la característica de destrucción microbiana, sin embargo se ha demostrado la obtención de productos microbiológicamente estable al ser procesados en VR (Feng, 2001) obteniendo inclusive mejores resultados en este ámbito que otras técnicas de secado. En particular se ha demostrado que el secado en VR reduce las poblaciones de bacterias aerobias, coliformes, *Escherichia coli* ATCC 23724 y *Listeria innocua* en el producto deshidratado. Por ejemplo en una investigación al respecto se inocularon una mezcla de los microorganismos mencionados anteriormente en proporciones iguales, la inoculación se llevó a cabo en puré de calabaza de una humedad inicial de 5.76 kg de agua/kg sólidos secos obteniéndose una concentración inicial de 10^6 UFC/ml antes de someterlo al secado en ventana refractiva. Los resultados obtenidos son bastante buenos ya que para todas las especies de microorganismos inoculados en las muestras se observó al finalizar el proceso de secado que todas las cuentas se redujeron al mínimo nivel de detección (< 5 UFC/ml), en particular para las bacterias aerobias el conteo fue de 4,6 UFC/ml para coliformes, para *Escherichia*

coli ATCC 23724 valores cercanos a 6 UFC/ml, y 5,5 UFC/ml para *Listeria innocua* (Nindo, 2003). Estos valores presentados son buenos resultados de inactivación bacteriana en comparación a otras técnicas de secado como el secado por aspersión (Secado spray) en donde la reducción de microorganismos no es tan notoria, por ejemplo en el secado de leche de vaca por aspersión inoculada con *B. bifidum* se obtuvo en el producto final hasta un 25,6% de sobrevivencia del microorganismo (Selvamuthukumaran, 2006).

2.7.1.2. MODIFICACIÓN EN PROPIEDADES FÍSICAS DE ALIMENTOS SECADOS POR VENTANA REFRACTIVA

Dentro de las propiedades físicas más importantes en alimentos destacan el color, porosidad y el cambio en el volumen. Estas propiedades se verán modificadas en un alimento al ser deshidratado, la magnitud de estos cambios dependerá de la técnica de secado utilizada y los parámetros operacionales con los cuales se lleve a cabo el secado.

Color

Para el color de los alimentos lo más común para una determinación objetiva de este parámetro es el uso de distintas escalas de color, siendo una de la más popular la llamada escala de Hunter que determina el color en función de los parámetros L^* , a^* y b^* (Kromida, 2001).

Para tener una noción del orden de cambio del color de un alimento al ser deshidratado en la tabla 2 se pueden ver los valores de los parámetros de la escala de Hunter para distintos alimentos secados mediante ventana refractiva, Liofilización y aire caliente. Cabe destacar que las temperaturas de operación para cada método de secado son 95°C para el agua de la ventana refractiva, 20°C para las placas en liofilización y 50°C para el aire en el secado convencional.

En cuanto a la deshidratación del puré de zanahoria (*Daucus carota* L), se dio un incremento del parámetro a^* lo cual implica que el color se desplazó hacia los tonos rojos, esto se podría explicar por una posible oxidación de los carotenoides, ya que estos compuestos suelen ser susceptibles a la oxidación durante la deshidratación debido al alto grado de insaturación de su estructura química (Abonyi B. F., 2002). En puré de fresa (*Fragaria annanasa*) se observa un incremento en la luminosidad. En el caso de espárrago (*Asparagus officinalis*, L) se puede observar un incremento en la coloración amarilla, además, se observa una disminución en la luminosidad, pudiendo atribuirse al oscurecimiento no enzimático en presencia de glucosa, fructosa y ácido málico.

Tabla 2 Parámetros de color L, a y b en diferentes alimentos frescos y deshidratados

Producto	Método de secado	Condición de T °C	Parámetro de color			
			L	a	b	ΔE
Rodajas de espárragos	Fresco		40,3	-3,2	11,8	-
	VR	95	18,3	-4,5	15,6	22,4
	Liofilización	20	37,7	-4,9	20,7	9,4
	Aire caliente	50	24,8	-2,6	20,6	17,8
Puré de zanahoria	Fresco		54,3	28,7	44,0	47,4
	VR	95	72,0	34,1	45,1	59,2
	Liofilización	20	77,6	27,1	44,1	57,9
Puré de fresa	Fresco		36,1	25,6	19,8	30,2
	VR	95	53,8	27,9	16,9	34,3
	Liofilización	20	53,8	30,0	18,8	36,5
Rodajas de papa roja	Fresco		19,3	-	-	-
	VR	95	55,3	-	-	-
	Liofilización	20	54,0	-	-	-

Fuente: Adaptado de Morales, 2013

Por otra parte en un estudio realizado con rodajas de mango Tommy (*Mangifera indica* L) de 1 y 2mm de espesor, se observó que los parámetros a y L fueron afectados solamente por el espesor mientras que el parámetro b resultó ser dependiente del tiempo de secado (Ochoa-Martinez, 2012). De la misma forma pero para aloe vera se compararon el tono y el croma para este producto deshidratado en secado por aspersión, ventana refractiva y liofilización. Los resultados mostraron que el aloe vera secado en ventana refractiva presentó el mismo tono que el producto liofilizado pero se dio una mayor saturación del color (croma) (Nindo, 2007).

Densidad y encogimiento

Para la deshidratación de frutas y verduras en general el encogimiento y cambios en la densidad del producto es bastante habitual y considerable (Nindo, 2003). En el año 2011 se realizó un estudio el cual buscaba evaluar los cambios en la densidad y solubilidad de polvo de tomate (*Lycopersicon esculentum*). En esta investigación se encontró que la densidad volumétrica del producto obtenido por secado con aire caliente es menor (0,63g/cm³) que la obtenida por deshidratación en ventana refractiva (0,74 a 0,82 g/cm³) para diferentes temperaturas de operación (60, 75 y 90°C). Además reportaron que para el secado en VR, la densidad aumentó ligeramente al reducir la temperatura del agua caliente en un rango de 60 a 90°C. De la misma forma al evaluar la solubilidad del polvo de tomate obtenido en

agua, se muestra que esta propiedad es menor para secados del producto por aire caliente que por VR para el rango de temperatura de 60 a 90°C (Abul-fadl, 2011).

En el mismo contexto en la investigación de Ocho-Martínez (Ochoa-Martinez, 2012), observaron que para mango, la porosidad es independiente del espesor y que esta propiedad es mayor en el producto deshidratado por VR que los deshidratados por secado convencional (convectivo o aire caliente). En cuanto al encogimiento de las muestras, los investigadores muestran que el secado por VR genera un producto con menor encogimiento que el logrado por el secado convectivo.

Textura

En la actualidad existe una gama muy alta de pruebas para evaluar la textura de un alimento, el tipo de prueba dependerá del alimento en cuestión y las propiedades mecánicas que esté presente, por ejemplo para alimentos con alto contenido en agua y que poseen estructura rígida, principalmente frutas y verduras, se usan pruebas de compresión o extrusión para evaluar la dureza del alimento que consisten básicamente en comprimir el alimento a una velocidad constante y registrando el esfuerzo, teniéndose luego el valor de dureza como el máximo valor de fuerza registrado (Robbers, 2015). En la figura 9 se muestra el comportamiento de la fuerza aplicada en el tiempo para este tipo de test (50% de deformación) para manzanas frescas.

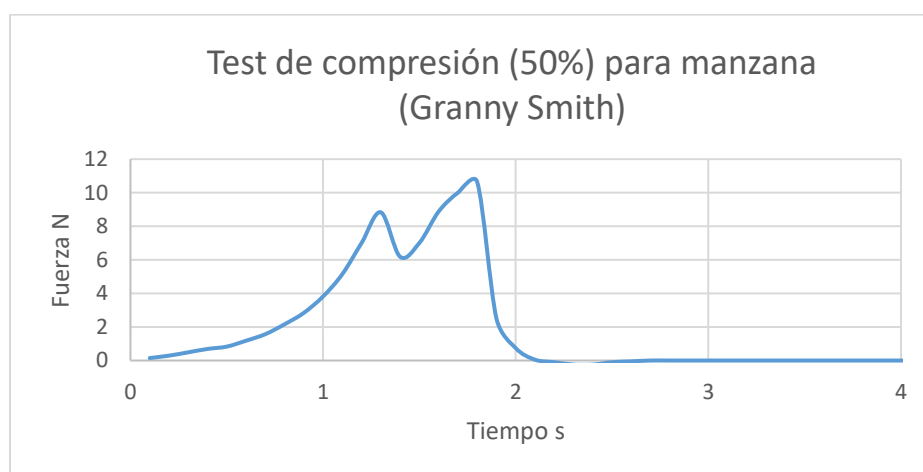


Figura 9 Test de compresión de manzana Granny Smith.

Fuente: elaboración propia.

Como se mencionó recientemente la textura del alimento deshidratado dependerá del método de secado aplicado. Por ejemplo para el secado de kiwi en ventana refractiva y en

horno se compararon las durezas alcanzadas a diferentes temperaturas de operación (80, 90 y 100°C). Los resultados muestran que el secado en ventana refractiva generó un producto con una menor dureza para las tres temperaturas de operación evaluadas (ver figura 10). Para todas las temperaturas investigadas, la fuerza requerida para romper la estructura de las muestras secas fue menores para muestras dispuestas en VR comparadas con las secadas en horno lo cual sugiere una mejor calidad de en el secado VR. Lo anterior se explica debido a que en el secado VR parte de la energía traspasada se hace vía radiación entre el agua y el producto, la estructura y textura de dichos productos se dañan menos y el endurecimiento superficial ocurre menos que para el método de secado en horno. En particular, esta diferencia de calidad provocada para los diferentes métodos de secado fue más importante a temperaturas más altas. (Robbers, 2015)

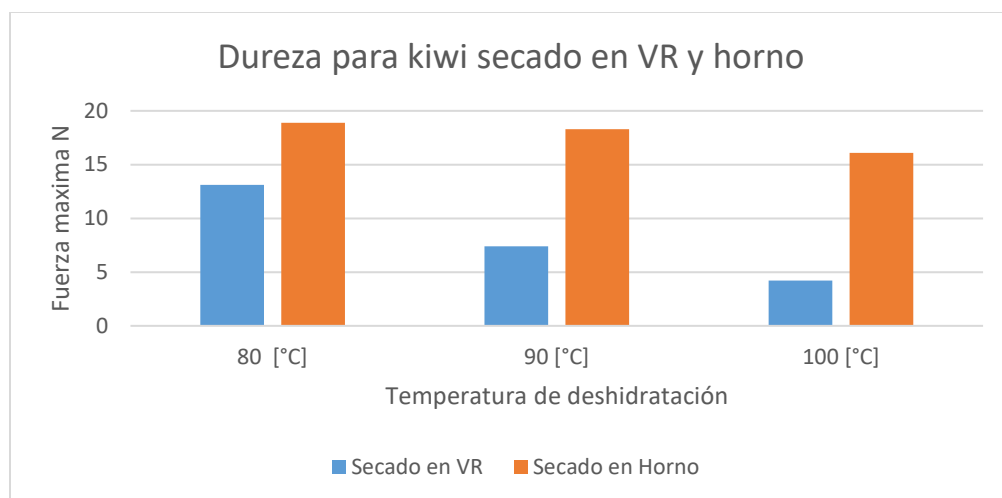


Figura 10 Comparación de textura (dureza) para kiwi deshidratado en VR y horno.

Fuente: Adaptado de (Robbers, 2015)

El aumento en la temperatura de operación disminuyó la fuerza máxima ofrecida por las muestras. En ambos métodos, la temperatura fue un contribuyente significativo a la textura final de las muestras secas. En otras palabras, la dureza máxima, obtenida en cualquiera de los dos métodos, resulta de la temperatura a 80°C. La razón principal, aquí, es que la textura de la fruta se vuelve probablemente menos plástica en temperaturas más altas y se convierte en hojas crujientes y exhibe menos resistencia contra las fuerzas recibidas (Robbers, 2015). Sin embargo estas aseveraciones se contraponen a resultados de otras investigaciones en donde se declara que temperaturas más altas generaron un producto de mayor dureza (Maskan, 2000). De hecho, parece bastante razonable que la superficie más dura de la muestra corresponda a la mayor tasa de secado de los kiwis (temperatura más alta) (Orikasa, 2008). En otras palabras, el endurecimiento de la superficie ocurre

principalmente como resultado de una temperatura superficial muy alta, migración de sólidos solubles a la superficie de la muestra y acumulación de tales materiales solubles en la superficie a medida que el agua se evapora. Este fenómeno resulta en complejos cambios físicos y químicos en la capa superficial del producto (Maskan, 2001)

A medida que el producto pierde su humedad por evaporación, la "Ventana" se cierra lentamente (diferencia cada vez más grande en el índice de refracción del agua y el producto), transfiriendo el calor principalmente mediante conducción para terminar el proceso de secado. Esta reducción de la transferencia de calor en la etapa final del secado ayuda a prevenir la degradación de la calidad del producto (Topuz, 2009). La correa que lleva el producto seco se mueve entonces sobre un baño de agua fría antes de ser desechada de la cinta. De hecho, la dureza de los frutos secos se ve afectada por las condiciones de secado que influyen en los componentes y características de las paredes celulares.

2.7.1.3. CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS, ORGANOLEPTICAS Y NUTRICIONALES DE ALIMENTOS SECADOS POR VENTANA REFRACTIVA

Uno de los desafíos más importante en la industria de alimentos es la conservación de las propiedades nutricionales y organolépticas del alimento para generar un alimento de calidad. Sin embargo los alimentos contienen nutrientes que se pierden o degradan fácilmente durante el proceso de deshidratación (Rodríguez, 2004). Los cambios nutricionales que sufra el alimento dependen del alimento en cuestión como también del proceso de secado empleado. En este contexto, parámetros como sólidos solubles, contenido de vitaminas y color son utilizados comúnmente para cuantificar la calidad de los jugos y frutas que son llevados a procesos térmicos en general (Stewart, 2004).

Es bastante común el uso de la vitamina C como parámetro de referencia para determinar la calidad nutricional de un alimento que ha sido llevado a un proceso térmico ya sea de esterilización o deshidratación. En cuanto a este parámetro la ventana refractiva posee una alta retención de vitamina C que puede llegar a valores del 94% (MCD TECHNOLOGIES INC, 2000). Por ejemplo al deshidratar puré de fresas por VR se encontró que solo se pierde un 6% de la vitamina C (ácido ascórbico) inicial (Abonyi, 1999). Sin embargo otras investigaciones señalan por ejemplo que para el secado de polvo de tomate en VR se da una disminución de L-ácido ascórbico del 69,3%, aunque este valor es alto, es menor al obtenido por secado con aire caliente (75%) en relación al producto fresco (Abul-fadl, 2011). En este mismo contexto en la deshidratación de rodajas de espárragos se reporta que la concentración de ácido ascórbico del producto final fue 2,4 mg/g sólidos para secado en VR, lo cual fue similar a lo logrado por liofilización (2,2 mg/g sólidos) y superior a la de

espárragos deshidratados mediante aire caliente (1 mg/g sólidos), lecho fluizado (1,3 mg/g sólidos) y microondas (1,6 mg/g sólidos).

Otro parámetro nutricional comúnmente usado para establecer la calidad de un alimento es el contenido de carotenoides. Algunos carotenoides son precursores de la vitamina A por lo que se los clasifica en carotenoides provitamina A y carotenoides no provitamina A. El carotenoide provitamina A más abundante en la dieta humana es el β -caroteno. En general la temperatura alcanzada por los alimentos dentro del equipo de deshidratación como también su tiempo de residencia determinan en gran medida el deterioro de los carotenoides (Desobry, 1997). En concreto con respecto a este tema Abonyi *et al.* (1999) Señalan que para el secado de puré de zanahoria (*Daucus carota* Lcv. Navajo) que los carotenoides totales sufrieron una pérdida del 8,7% para el secado en VR con tiempos de residencia de 3 a 5 min y una temperatura de operación de 90 °C lo cual viene a ser un valor muy cercano al logrado por liofilización de 4,0% (Abonyi, 2002). En el caso del licopeno (especie de carotenoide) se han logrado retenciones del 64,5% en polvo de tomate secado en VR, valor el cual fue menor en el secado por aire caliente (44,8%). De la misma forma en cuanto a la retención de flavonoides contenidos en polvo de tomate secado por VR se logró una retención del 86,4 % en contraste al 50,9% logrado por el secado por aire (Abul-fadl, 2011). En otra investigación en la cual se deshidrató açai (*Euterpe oleracea*) se evaluó la concentración final de antocianinas obteniéndose un contenido final de 5,5 mg antocianina/g muestra seca con liofilización y 5 mg antocianina/g muestra seca para VR, estos valores son bastante cercanos a los de la muestra fresca (5,8 mg antocianina/g muestra seca). Por otra parte el secado con aire presenta la mayor reducción del contenido del compuesto con 3 mg antocianina/g muestra seca (Pavan, 2010).

Una investigación llevada a cabo por MCD Technologies INC sostiene que el secado de alimentos en ventana refractiva conserva el aroma natural del producto. Sin embargo otras investigaciones (Abonyi, 2002) señalan lo contrario, sosteniendo que la deshidratación en VR y en el secado por aspersión altera el aroma del producto deshidratado en general, esto debido a que ambos procesos aumentaron la concentración de compuestos del grupo aldehído, en la muestra fresca se determinó que esta posee un contenido de 33 ng/ml incrementando este valor a 162 ng/ml para el secado en VR y 360 ng/ml para el secado por aspersión.

2.8. PRETRATAMIENTOS PARA LA DESHIDRATACIÓN DE ALIMENTOS

2.8.1. DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA

Cuando trozos de frutas o verduras frescas se sumergen en una solución de azúcar o de sal, que tiene una concentración de este soluto mayor a la de los alimentos, el agua pasa del alimento a la solución bajo la influencia del gradiente de presión osmótica generando con esto una reducción en la actividad del agua del alimento. Este método para eliminar la humedad de los alimentos se conoce como deshidratación osmótica, este término puede ser engañoso ya que el producto final es rara vez estable y el procesamiento adicional es necesario para extender su vida útil. Concentración osmótica sería una descripción más exacta de este proceso, durante la ósmosis, las paredes celulares actúan como membranas semipermeables, liberando el agua y reteniendo sólidos. Sin embargo, estas membranas no son completamente selectivas y algunas sustancias solubles, tales como azúcares, sales, ácidos orgánicos y vitaminas, se pueden perder de las células, mientras que los solutos de la solución pueden penetrar en el alimento. Durante la preparación del alimento se produce daño a las células, por cortar en rodajas o en cubos, lo cual aumentará el movimiento de los sólidos solubles hacia la solución osmótica. Los solutos, que entran en el alimento desde la solución, pueden ayudar en la reducción de la actividad del agua del alimento. Sin embargo, pueden tener un efecto adverso sobre el sabor del producto final. En la figura 11 se puede ver los flujos asociados a la transferencia de masa ocurrida durante la deshidratación osmótica destacando que el agua que abandona el alimento es mucho mayor a la entrada de solutos desde la solución y más aún que la migración de sólidos solubles desde el alimento a la solución osmótica.

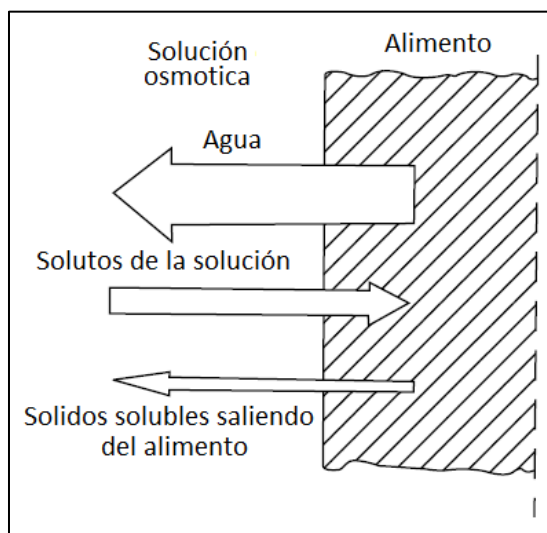


Figura 11 Flujos másicos durante deshidratación osmótica.

Fuente: Adaptado de (Mujundar, 2015)

En el caso de las frutas, los azúcares con o sin la adición de sal, se utilizan para componer la solución osmótica, también conocida como la solución hipertónica. La sacarosa se utiliza comúnmente, pero la fructosa, la glucosa y polisacárido se han utilizado como mezclas con diversos grados de éxito. La inclusión de 0,5-2,0% de sal en la solución de azúcar puede aumentar la tasa de ósmosis. Se ha demostrado que algunos otros compuestos de bajo peso molecular tales como ácido málico y ácido láctico tienen un efecto similar. Se usan soluciones de azúcar con concentraciones iniciales en el rango de 40-70%. En general, cuanto mayor es la concentración de soluto, mayor es la velocidad y el grado de secado. Cuanto mayor sea la concentración de azúcar más azúcar entrará en el alimento, esto puede resultar en que el producto sea inaceptablemente dulce. La tasa de pérdida de agua es alta inicialmente, pero después de 1-2 horas se reduce significativamente, pueden pasar días antes de alcanzar el equilibrio. Un tiempo de procesamiento típico para reducir los alimentos al 50% de su peso fresco es 4-6 horas (Brennan, 2006).

En general, cuanto mayor sea la temperatura de la solución osmótica, mayor será la velocidad de eliminación del agua. Se han utilizado temperaturas en el intervalo de 20-70 °C. En las temperaturas más altas, existe el peligro de que las paredes de las células puedan resultar dañadas, este daño puede resultar en una pérdida excesiva de material soluble, como por ejemplo las vitaminas de los alimentos. Además a altas temperaturas puede existir una mayor probabilidad de decoloración de los alimentos.

Un parámetro que incide directamente en el proceso de deshidratación osmótica es la relación másica entre la solución y el alimento, cuanto menor sea la relación de peso de los alimentos a la solución, mayor será la pérdida de agua y la ganancia de sólidos. Normalmente se emplean relaciones de 1: 4 a 1: 5. Cuanto más pequeño sea el alimento, más rápido será el proceso. Sin embargo, cuanto más pequeñas sean las muestras, más probable es que se produzca el daño celular al cortarlas y, por lo tanto, mayor será la cantidad de sólidos solubles que se pierden del alimento. Promover el movimiento de la solución en relación con las muestras de alimentos debe resultar en una ósmosis más rápida. Sin embargo, una mezcla vigorosa es probable que conduzca a daño celular. Los trozos delicados del alimento pueden permanecer inmóviles en un tanque de la solución, Se puede obtener alguna mejora en la velocidad de secado mediante la recirculación de la solución a través del tanque mediante una bomba. En instalaciones a gran escala, los alimentos pueden estar contenidos dentro de una canasta, que está sumergida en el tanque de solución. La cesta se hace vibrar por medio de un accionamiento excéntrico.

La reutilización de la solución hipertónica es deseable para hacer que el secado osmótico sea un proceso económico. Los sólidos insolubles se pueden eliminar por filtración y el contenido de sólidos concentrados por evaporación al vacío. La decoloración puede limitar el número de veces que la solución puede ser reutilizada. Un tratamiento térmico leve puede ser necesario para inactivar los microorganismos, principalmente las levaduras, que pueden acumularse en la solución. Como se ha indicado anteriormente, los productos de

secado osmótico normalmente no son estables. En el caso de frutas y verduras, los productos deshidratados osmóticamente tienen actividades de agua en el rango 0.90-0.95. Esto quiere decir que la deshidratación osmótica no reduce suficientemente la actividad del agua para evitar la proliferación de microorganismos. El proceso extiende, hasta cierto punto, la vida útil del material, pero no lo conserva. Por lo tanto, son necesarios otros métodos de conservación, tales como congelación, pasteurización o secado. Sin embargo, el procesamiento de semi-productos deshidratados osmóticamente es mucho menos costoso y conserva la mayoría de las características adquiridas durante la ósmosis.

2.8.2. CAMPOS ELÉCTRICOS MODERADOS

Como se vio anteriormente La deshidratación osmótica es un proceso en el que los alimentos se deshidratan parcialmente mediante inmersión en una solución acuosa hipertónica. La deshidratación osmótica reduce la actividad del agua de los alimentos, minimizando así el crecimiento potencial de los microorganismos y prolongando la vida útil de los productos alimenticios. La principal desventaja del proceso de deshidratación osmótica es el largo tiempo requerido para reducir la actividad del agua, lo que hace su implementación industrial poco práctica (Simpson, 2015).

La aplicación de campos eléctricos moderados (MEF por sus siglas en ingles de moderate electric field) es un proceso térmico avanzado donde un campo eléctrico pasa a través de un alimento, provocando la elevación de la temperatura en su interior como resultado de la resistencia que ofrece al paso de la corriente eléctrica. La aplicación de estos campos eléctricos puede causar cambios en la permeabilidad de las membranas celulares del tejido vegetal a temperaturas más bajas a las que estas membranas están permeabilizadas por los efectos térmicos, fenómeno conocido como electroporación. Las consecuencias de la aplicación de MEF en un alimento es que consigue un aumento en los procesos difusivos, la conductividad eléctrica cambia y el agua difunde con mayor facilidad desde las células vegetales en los procesos de secado. En general efectos como la electroporación que generan cambios o daños en la estructura celular tienden a mejorar la velocidad de difusión debido a que el movimiento del agua a través de la membrana y pared celular se ve facilitado (Simpson, 2015).

Diferentes investigaciones han avalado la efectividad del uso de campos eléctricos moderados. Por ejemplo Wang et 1998 al comparó la facilidad de extracción del jugo de manzana para la producción de zumo, encontrando que la aplicación de campos eléctricos mejoró el rendimiento de zumo de manzana las cuales presentaron menor resistencia a la extracción, además este efecto crece en proporcionalidad con el aumento en la temperatura. Por otra parte Simpson *et al.* (2007) al comparar la efectividad de la aplicación de campos eléctricos moderados ($< 100 \text{ V/cm}$) en el proceso de deshidratación osmótica de

frambuesas afirma que la aplicación de campos eléctricos fue muy efectivo para reducir el tiempo de proceso. Los resultados experimentales muestran que esta reducción de tiempo alcanzó hasta un 50% con relación al tratamiento convencional. Resultados similares son entregados por el mismo autor para el caso de deshidratación osmótica de manzanas Granny Smith en donde reporta que La difusión está muy influenciada por la aplicación de MEF, lo que significa que a medida que aumenta la aplicación del campo eléctrico, mayor es el coeficiente de difusión efectiva (D_{eff}). Además destaca que el efecto combinado de la deshidratación osmótica más la aplicación de MEF en rebanadas de manzana Granny Smith produce una aceleración de la transferencia de masa que permite una reducción significativa en el tiempo de procesamiento, dando como resultado un aumento de la productividad y una disminución de los costes operativos (Simpson, 2015).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

En esta sección se detallaran los procedimientos realizados como también los equipos involucrados durante el desarrollo de esta investigación.

3.1. MATERIA PRIMA Y REACTIVOS

La materia prima corresponde a manzanas de variedad Granny Smith las cuales fueron obtenidas en el comercio local en la ciudad de Valparaíso. Las manzanas luego fueron refrigeradas a 2 °C y guardadas hasta su utilización, cabe destacar que se tomó como criterio de trabajo que las manzanas no estuvieran más de tres días en refrigeración desde la compra hasta su utilización.

Los distintos reactivos utilizados durante la investigación junto con su función se detallan a continuación en la tabla 3.

Tabla 3 Reactivos usados en las experiencias.

Reactivo	Proveedor	Detalle
Ácido ascórbico	G.A. Ventas	Preparación solución anti-pardeo
Ácido cítrico	G.A. Ventas	Preparación solución anti-pardeo
Sacarosa	G.A. Ventas	Preparación solución osmótica
Sorbato de potasio	G.A. Ventas	Preparación solución osmótica
Cloruro de Calcio	G.A. Ventas	Preparación solución osmótica

3.2. EQUIPOS UTILIZADOS Y MEDICIÓN DE PROPIEDADES

3.2.1. EQUIPO DE DESHIDRATCIÓN OSMÓTICA Y APLICACIÓN DE CAMPOS ELÉCTRICOS MODERADOS

Para el proceso de deshidratación osmótica y la aplicación de campos eléctricos moderados se hace la diferencia entre los dos equipos utilizados. Para la deshidratación osmótica se tiene una celda de acero formada por dos tubos cilíndricos concéntricos en donde cada cilindro se usa como punto de conexión de los electrodos. Las dimensiones de la celda son 15cm de alto, 3 y 18cm respectivamente para los diámetros de los dos cilindros, lo cual deja una separación entre los cilindros concéntricos de 7,5cm. La celda junto con la solución osmótica y las muestras son calentadas mediante una resistencia eléctrica en un baño termoregulado (Lab companion BS-21) el cual cuenta con una precisión de 0,1°C, este baño además cuenta con un sistema de agitación (30 RPM) que permite mover la celda de

deshidratación de forma excéntrica y con velocidad regulable. Tanto la celda de deshidratación (cargada con solución osmótica y muestras) como el baño termoregulado con la celda instalada se muestran en la la figura 12.



Figura 12 Celda de deshidratación osmótica y baño termoregulado.

Para la aplicación de MEF se usó el equipo de calentamiento óhmico mostrado en la figura 13. Este equipo se compone de un registrador de datos (Omega engineering inc. Modelo OM-320, EEUU) acoplado a transformador de voltaje variable (variacSlideup, modelo SB-10, EEUU). El registrador de datos se conecta a un computador lo que hace posible registrar datos de temperatura tipo T (cobre-constantán) a través de termopares y voltaje.

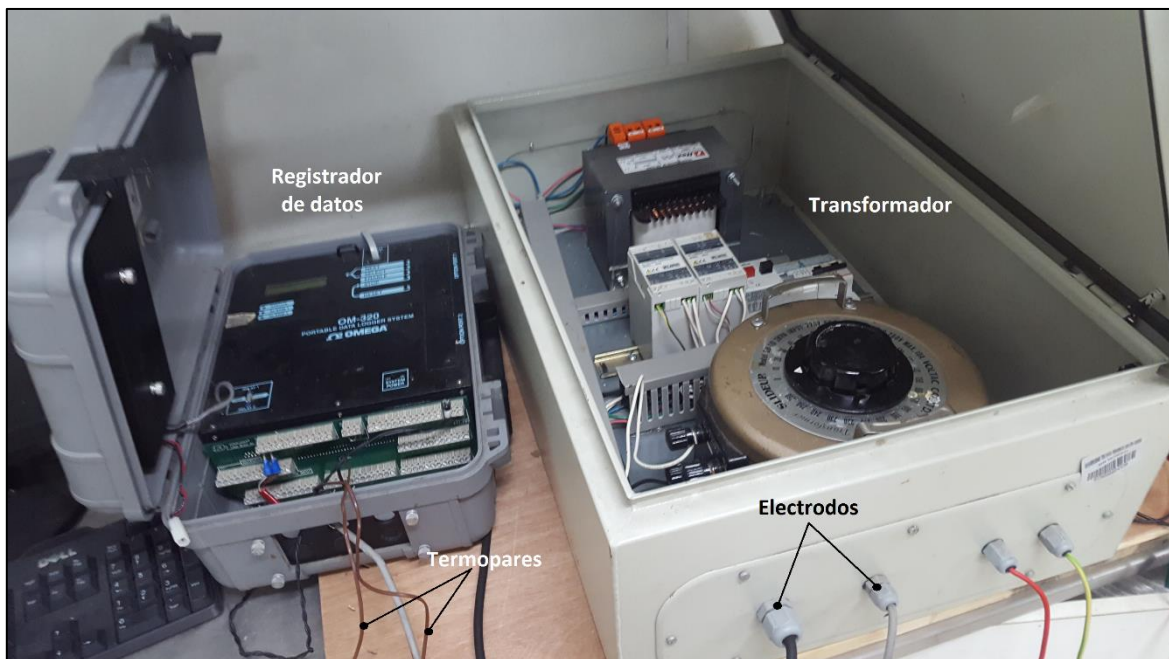


Figura 13 Equipo de calentamiento óhmico

3.2.2. VENTANA REFRACTIVA

El equipo utilizado para secado de manzana en ventana refractiva es del tipo discontinuo como el mostrado en la figura 7. Se construyó una estructura de aluminio que va sumergida en un baño termoregulado (Mermmet, modelo WNB, Alemania). A esta estructura se acopla un marco también de aluminio que vendría a ser la ventana refractiva. El Mylar es puesto en el marco y sellado mediante cintas adhesivas de alta resistencia (ver figura 14). Las dimensiones efectivas del Mylar utilizable como ventana refractiva son de 13cm de ancho y 40cm de alto.

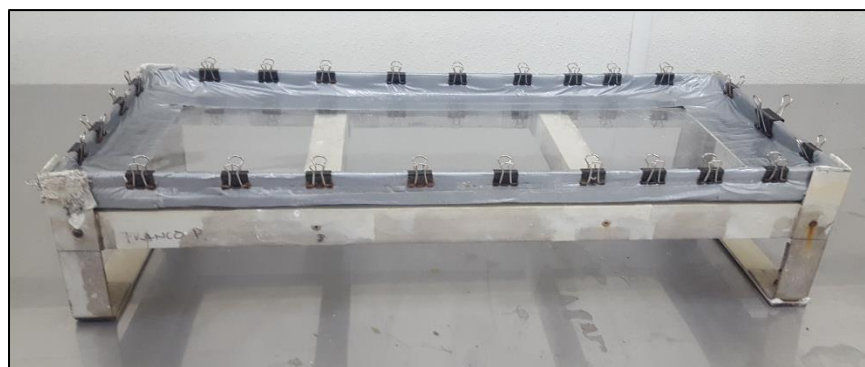


Figura 14 Estructura con ventana refractiva montada.

El baño termoregulado cuenta con una precisión de $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ en el control de temperatura, además se instaló un controlador de nivel conectado a una bomba peristáltica (Masterflex modelo 7521-25, EEUU) para poder asegurar el correcto nivel del baño. Lo anterior es importante ya que una baja en el nivel de agua del baño significaría la formación de burbujas de aire en la interfaz agua-Mylar lo que distorsionaría el proceso de secado en forma significativa. La bomba peristáltica está conectada a un estanque con agua destilada la alimentación de agua del sistema VR. El sistema de control de nivel es importante para la operación de la ventana refractiva a temperaturas altas, ya que el sistema montado no es hermético con respecto al agua. Al darse un nivel menor al nivel de la ventana refractiva el controlador energiza la bomba peristáltica restableciendo el nivel óptimo.

El sistema completo para la ventana refractiva se puede ver en la figura 15.



Figura 15 Sistema completo de ventana refractiva.

3.2.3. TÚNEL DE AIRE CALIENTE

El equipo para el secado de manzanas de forma convencional es un túnel de aire de acero de 1,83m de largo y 11cm de diámetro. En un extremo está dispuesta una resistencia eléctrica acoplada a un controlador de temperatura además de un ventilador eléctrico. Estos dos últimos equipos producen una corriente de aire de 2,23m/s a 55°C. En el centro del túnel está ubicado un compartimiento en donde se colocan las muestras a secar. Este compartimiento da la posibilidad de enlazar un vástago móvil a una balanza (Precisa modelo XB 620M) de 0,001g de precisión, la cual está conectada a un programa para un registro continuo del peso de la muestra. Además en este compartimiento para los experimentos de obtención de tiempo de secado y medición de propiedades se colocan bandejas especialmente dimensionadas para el secado de las muestras de manzana. Se diseñaron 3 bandejas que van montadas entre sí con dimensiones de 8 cm de ancho, 9 cm de largo y 4 cm de alto (ver figura 16). Cada bandeja tiene capacidad para 4 muestras lo cual da una capacidad de carga al túnel de aire de 12 muestras.



Figura 16 Sistema de bandejas para secado de manzanas en túnel de aire.

El control de temperatura usa un termopar tipo T (cobre-constantán) ubicado en el compartimiento mencionado anteriormente, así se asegura que la temperatura del aire que está secando las manzanas tenga la temperatura programada al pasar en este tramo del túnel.

El sistema completo para el túnel de aire se muestra en la figura 17. Para este caso se tiene la configuración en donde está conectada la balanza.

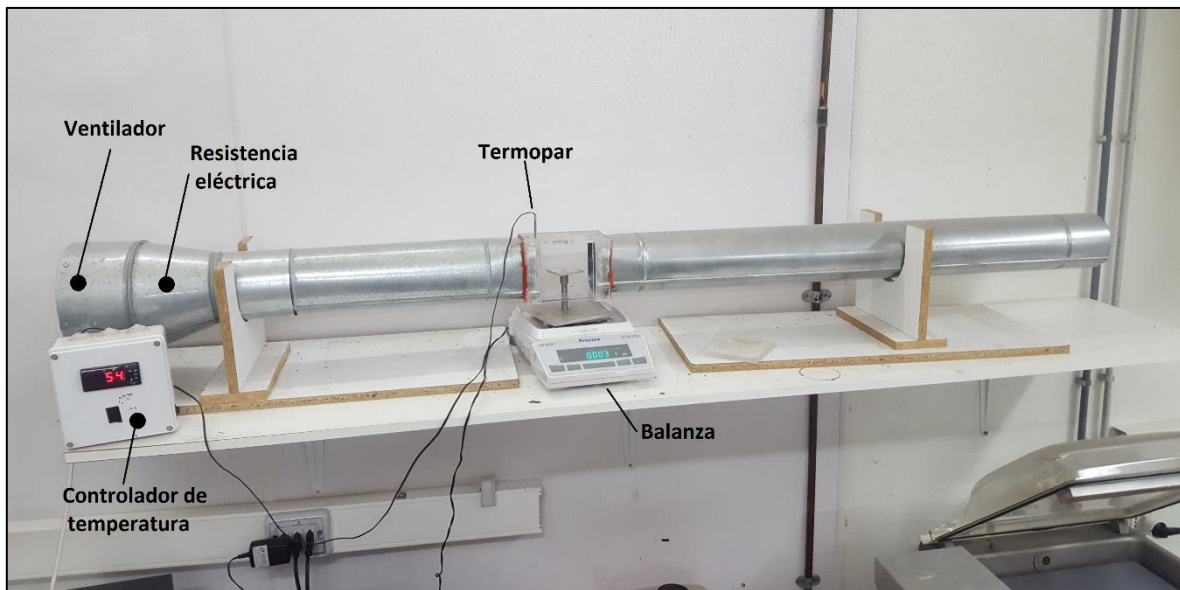


Figura 17 Sistema completo de túnel de aire caliente.

3.2.4. MEDICIÓN DE PROPIEDADES

Para la realización de las mediciones de propiedades en primer lugar se llevaron a cabo las mediciones de color y dimensiones las cuales no son destructivas y permite obviamente usar estas muestras para las posteriores pruebas de textura y sólidos solubles que si son destructivas.

3.2.4.1. TEXTURA

Se realizó un ensayo de compresión al 50%. Este ensayo tiene como objetivo determinar la dureza de las muestras.

Para la realización del ensayo se usó un texturómetro (Brookfield engineering, modelo CT3-50K,UK) en donde se apilaron 5 muestras. Se usó un cabezal plástico de geometría cilíndrica de diámetro 50mm con una velocidad de descenso de 5cm/s y una carga de activación de 0,1N. La dureza de la muestra es cuantificada como la máxima fuerza (N) registrada por el texturómetro durante la compresión. Para cada experiencia de medición de textura se realizaron 5 réplicas.

El equipo usado en las mediciones de textura se muestra a continuación en la figura 18.



Figura 18 Texturómetro.

3.2.4.2. COLOR

Para la medición del color se utilizó un colorímetro (Konica Minolta modelo CR-410, Japón) con el cual se registraron los parámetros de la escala de color de Hunter. Para esta escala “L” denota la luminosidad, “a” da la tonalidad rojo-verde y “b” la tonalidad verde-azul de la muestra.

Para las pruebas de color se tomaron 5 muestras al azar ya sean para fruta fresca, fruta con pretratamiento y frutas secas según fuese el caso. A estas se les midieron los parámetros L, a y b.

El cambio de color en las muestras se cuantifica en función de la distancia en el espacio tridimensional de la escala de color de hunter según la ecuación 6.

$$\Delta E = \sqrt{(L_o^* - L_i^*)^2 + (a_o^* - a_i^*)^2 + (b_o^* - b_i^*)^2} \quad (6)$$

Donde ΔE es la magnitud del cambio del color, L_0^* , a_0^* y b_0^* son los parámetros de la escala de Hunter de una muestra inicial y L_i^* , a_i^* y b_i^* los parámetros de la escala de Hunter para el momento determinado que se quiera dimensionar el cambio en el color total de la muestra.

Para determinar diferencias significativas de color en las muestras se utilizará el criterio descrito en la norma ISO 12647-2 la cual define los rangos de aceptabilidad para colores de impresión según la resolución del ojo humano a cambios en el color. Según lo anterior se considerará que una muestra presenta diferencias significativas de color para valores de ΔE mayores a 4 unidades.

3.2.4.3. SÓLIDOS SOLUBLES

La determinación de los sólidos solubles presentes en las muestras se realizó mediante un refractómetro (Hanna instruments modelo HI-96801, EEUU) de 0,1°Brix de resolución según la siguiente metodología:

- Pesar 2-3g (Balanza analítica) de muestras frescas o secas.
- Medir 25ml de agua destilada y registrar su peso (Balanza analítica).
- Generar solución homogénea mediante agitación en Minipimer (Ursus Trotter modelo URMIN-8219, Alemania). De esta forma los sólidos solubles pasan al agua para su posterior determinación.
- Una vez extraídos los sólidos solubles, se adicionan unas gotas de la solución en Refractómetro.
- Finalmente el contenido de solidos solubles se obtienen de la siguiente relación:

$$X^{ss} = \frac{(M X_t^w + w)A}{M(100 - A)} \quad (7)$$

Donde X^{ss} es la fracción de solidos solubles en la muestra g/g muestra, X_t^w es la fracción de agua o humedad de la muestra en el tiempo t g agua/g muestra, M es el peso de la muestra (g), w es la masa del agua destilada y A la lectura del refractómetro de la muestra diluida °Brix.

3.2.4.4. DIMENSIONES

Para medir el ancho y diámetro de las muestras se usó un pie de metro digital (OEM modelo QST-150) el cual posee una resolución de 0,01mm. Para la realización de esta prueba se tomaron 5 muestras al azar y se registró el espesor y diámetro de las mismas.

3.2.4.5. DETERMINACIÓN DE ACTIVIDAD DE AGUA Y HUMEDAD

La actividad de agua de las muestras se registró mediante un medidor de punto de rocío (Aqualab Series 4 TE) el cual tiene una resolución de $a_w \pm 0,001$.

La determinación del contenido de humedad de una muestra se realiza según la norma chilena NCh841 (Instituto nacional de normalización, 2003) la cual describe la siguiente metodología para esta determinación en estufa de aire caliente:

- Pesar aproximadamente 5g de muestra en balanza analítica (m_1).
- Colocar muestra en estufa a una temperatura de 105 °C durante 5h.
- Pesar muestra seca hasta registrar peso constante.
- Al tener peso constante registrar este valor como el peso seco de la muestra (m_2).
- Luego el contenido de humedad (%) se calcula según la siguiente relación:

$$H = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \cdot 100 \quad (8)$$

Donde H es la humedad de la muestra en porcentaje, m_1 el peso de la muestra antes de entrar en la estufa y m_2 es el peso seco de la muestra.

Los resultados presentados para el cambio de humedad de las muestras en el tiempo se realizarán bajo la Adimensionalización de la humedad según la ecuación 9.

$$M_{Rt} = \frac{H_t - H_e}{H_0 - H_e} \quad (9)$$

Donde M_{Rt} es la humedad adimensionalizada, H_t la humedad en el tiempo t , H_0 la humedad inicial y H_e la humedad de las muestras para la condición de equilibrio.

3.3. DISEÑO DE EXPERIMENTOS

El diseño de experimento busca mostrar las diferencias existentes entre el secado por VR y el secado convencional, además de dilucidar la influencia de los pretratamientos combinados de deshidratación osmótica y aplicación de campos eléctricos moderados en secado de manzana en ventana refractiva. Para esto fue necesaria la realización de 48 experimentos los cuales contemplan secado en ventana refractiva a tres temperaturas distintas (55,75 y 95°C) tanto para fruta fresca de control y fruta con pretratamiento previo de deshidratación osmótica acoplada a aplicación de campos eléctricos moderados, además de secado convencional en túnel de aire a 55°C. Lo anterior se puede ver representado en el esquema de bloques de la figura 19.

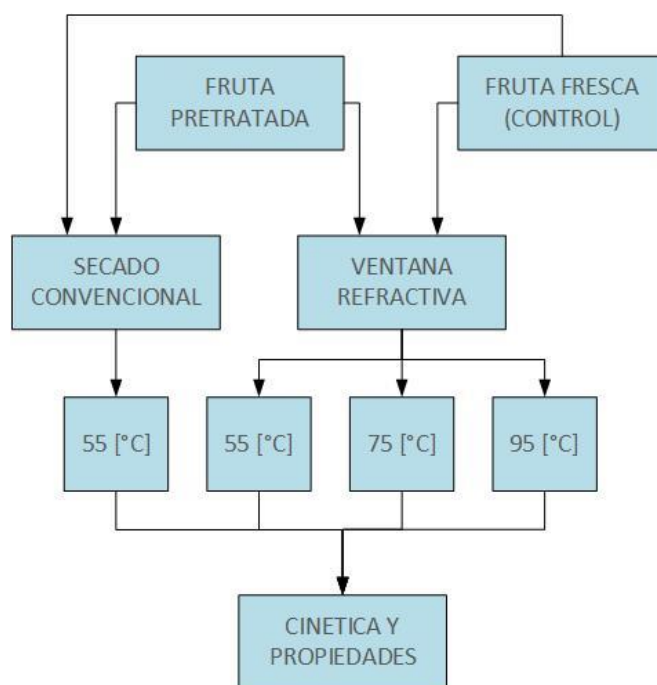


Figura 19 Esquema de bloques para diseño de experimentos.

Cada experiencia realizada se hizo en triplicado y se debe hacer la salvedad que por motivos de capacidad de los equipos utilizados, tanto para la ventana refractiva como el túnel de aire caliente, las experiencias se tuvieron que realizar en dos etapas. La primera etapa tenía como objetivo el encontrar la cinética de secado, para lo cual se registraba el cambio en peso de las muestras en el tiempo y además de la toma de muestras en determinados intervalos de tiempo para registrar el cambio en la actividad de agua durante el secado. Para la definición de estos intervalos de muestreo fue necesario para cada experimento realizar una experiencia de forma previa y tomar muestras cada 10 min, con esto se lograba

identificar la zona cercana a lograr actividad de agua 0,4. Luego en torno a este punto se muestreaba a intervalos de 5 min. Según lo anterior se definió el tiempo de secado como el tiempo necesario para que las muestras alcanzaran actividad de agua 0,4.

Ya conociendo la cinética de secado y habiendo definido el tiempo de secado para cada condición se procedió a realizar la segunda etapa de los experimentos. Esta segunda etapa tuvo como finalidad secar las muestras para el periodo de tiempo determinado según la cinética de secado y luego proceder a la medición de las propiedades que incluye mediciones de color, textura (dureza), encogimiento y contenido de sólidos solubles. Este criterio para determinar el tiempo de secado se justifica como una forma de tener un patrón de comparación para las distintas condiciones de secado generando un producto microbiológicamente estable.

Con el fin de poder dimensionar los cambios producidos durante el secado es que se realizó una estandarización de las propiedades de la manzana fresca y de muestras de manzana con pretratamiento. Para ambos casos se consideraron mediciones de color, textura, dimensiones (ancho y espesor) y contenido de sólidos solubles.

A continuación se detallan las réplicas realizadas para los diferentes experimentos ejecutados:

Tabla 4 Réplicas para los distintos experimentos realizados.

	55 °C FF	55 °C FPT	75 °C FF	75 °C FPT	95 °C FF	95 °C FPT
VR Cinética	3	3	3	3	3	3
VR Propiedades	3	3	3	3	3	3
SC Cinética	-	6	-	-	-	-
SC Propiedades	-	6	-	-	-	-

En donde VR es ventana refractiva, FF es fruta fresca, FPT es fruta con pretratamiento (deshidratación osmótica acoplada a campos eléctricos moderados) y SC es secado convencional (Secado en túnel de aire caliente).

Junto con los experimentos recién descritos, se consideró además otro experimento para la determinación del tiempo de aplicación del pretratamiento combinado. Para esto se realizó el proceso de deshidratación osmótica y aplicación de campos eléctricos moderados registrando el valor de actividad de agua de las muestras en el tiempo. Al igual que los demás experimentos para este caso también se realizaron tres réplicas.

Los detalles de la realización de cada uno de los experimentos se detallan en la sección siguiente de metodología.

3.4. METODOLOGÍA

3.4.1. PREPARACIÓN MATERIA PRIMA

Las manzanas que como se mencionó anteriormente se encontraban bajo refrigeración fueron cortadas en discos de 4mm de espesor con una mandolina y luego a partir de estos discos se realizaba un corte circular con un saca bocados de 4cm de diámetro lo cual deja una rodaja cilíndrica de la materia prima con dimensiones de 4mm de espesor y 40 mm de diámetro. Lo anterior se puede ver en la secuencias de imágenes de la figura 20.



Figura 20 Secuencia de cortado de muestras de manzana.

Una vez obtenida la muestra y con el objetivo de evitar su oxidación excesiva, las muestras fueron sumergidas en una solución anti-pardeo preparada a partir de 1,5L de agua destilada, 30g de ácido ascórbico y 15g de ácido cítrico. Las muestras son colocadas en esta solución durante 3min antes de la deshidratación osmótica o directamente a secado en VR o en el túnel de aire. Estas rodajas obtenidas son las muestras iniciales que se usaron en todos los experimentos y en la estandarización de las propiedades de la manzana.

3.4.2. PRETRATAMIENTO

En primera instancia se prepara la solución osmótica a utilizar, para todos los experimentos que necesitaron deshidratación osmótica se preparó una solución en base a sacarosa con una concentración de 45°Brix. La solución se preparó en un vaso precipitado de 2L la cual

contiene 825g de agua destilada, 675g de sacarosa, 0,5g de Sorbato de potasio y 1,27g de cloruro de calcio. Luego esta solución es llevada a una placa calefactora donde mediante el calentamiento y la ayuda de un agitador magnético se disuelven todos los reactivos formando una solución homogénea. Se tiene la solución en la placa calefactora hasta que esta alcanzara los 40°C que es la temperatura a la cual se lleva a cabo la deshidratación osmótica.

En paralelo a la preparación de la solución osmótica se prepara el equipo de deshidratación, el baño termoregulado en primera instancia se fija su temperatura a 40°C y agitación de 30 RPM. A continuación se carga la celda de deshidratación con la solución osmótica junto con las muestras de manzana a deshidratar. Se definió que la relación másica entre la solución y las muestras fuera 11/1 por lo cual cada carga consta de 1,5kg de solución y 136,4g de muestras las cuales fueron previamente cortadas y sumergidas en la solución anti-pardeo.

Ya teniendo la celda de deshidratación cargada con la solución osmótica y las muestras se procede a conectar los electrodos y energizar el sistema para una diferencia de potencial en los electrodos de 70V lo cual para una separación de los electrodos de 7,5cm genera una intensidad de campo eléctrico de 9,3V/cm. La temperatura del agua del baño durante el proceso de deshidratación osmótica se controló en función de mantener constante la temperatura de la solución osmótica, ya que esta tendía a aumentar producto de la aplicación del campo eléctrico, este control se realizó de forma manual con la adición de agua fría al baño termoregulado, con lo cual se logró una estabilidad en la temperatura de la solución osmótica de $40 \pm 2^\circ\text{C}$.

El tiempo del pretratamiento se definió de 80min que es el tiempo necesario para que las muestras alcanzaran una actividad de agua de 0,95. Luego de transcurrido este tiempo las muestras son retiradas de la celda de deshidratación y son dispuestas sobre papel absorbente para quitar el exceso de solución en la superficie.

3.4.3. SECADO EN VENTANA REFRACTIVA

Como se comentó anteriormente los experimentos de secado fueron divididos en dos modalidades que tienen objetivos específicos. La primera modalidad tiene como objetivo la obtención de la cinética de secado además de definir el tiempo de proceso en cuanto se alcance una actividad de agua de 0,4 en las muestras. Por otra parte la segunda modalidad tiene como objetivo secar las muestras el tiempo determinado en la primera modalidad y luego medir las distintas propiedades de la manzana (Color, Textura, encogimiento y sólidos solubles).

Para ambas modalidades primero se prepara el equipo VR llevando la temperatura de operación del agua a la temperatura requerida según sea el caso (55,75 o 95 °C). Luego se acopla la ventana refractiva y se asegura que no queden burbujas de aire en la interfaz agua-Mylar. Las muestras son colocadas a lo largo de todo el área de la ventana refractiva dejando una separación entre las muestras de aproximadamente 0,5cm iniciándose de esta forma el proceso de secado. El área de la ventana refractiva utilizada permitió secar 30 muestras por carga.

Para la primera modalidad de experiencia se hacía la diferencia para 6 muestras, a las cuales se le registra el peso en balanza analítica en el tiempo con una precisión de 0,01g. Los intervalos de tiempo para este registro son diferentes para cada temperatura de operación ya que los tiempos de secado son considerablemente distintos. Se tomaron mayor cantidad de puntos para tiempos bajos mientras que para la parte final se tomaban puntos a mayor intervalo de tiempo para poder reconocer la humedad de equilibrio para cada condición. En la tabla 5 se pueden ver estos intervalos de muestreo para cada condición de temperatura, esto se cumple tanto para las muestras frescas y con pretratamiento.

Junto a lo anterior se toman 3 muestras en determinados intervalos de tiempos con el fin de identificar los cambios en la actividad de agua. Como se mencionó anteriormente se definió que el tiempo de secado para cada condición fuera el tiempo al cual se alcanza actividad de agua 0,4. Nuevamente los intervalos de tiempo dependen de la condición de operación. Para este caso los cambios en la actividad de agua son bastante rápidos y considerablemente distintos según la condición de operación. Luego de terminado el secado y teniendo pesos constantes en las 6 muestras se procesa a la determinación de su peso seco y humedad en estufa de aire según lo descrito en la sección 3.2.4.5.

Tabla 5 Intervalos de tiempo en registro de peso de muestras en VR

Tiempo min	T = 55 °C	T = 75 °C	T = 95 °C
0	✓	✓	✓
20	✓	✓	✓
40	✓	✓	✓
60	✓	✓	✓
80	✓	✓	✓
100	✓	✓	✗
120	✓	✓	✓
150	✓	✓	✗
180	✓	✓	✓
240	✓	✓	✓
300	✓	✗	✗
360	✓	✗	✗
390	✓	✗	✗

Para la segunda modalidad de experiencia nuevamente se carga la ventana refractiva pero esta vez se dejan secar todas las muestras el tiempo determinado con anterioridad. Luego de terminado el proceso de secado las muestras son reservadas en papel aluminio para su posterior medición de propiedades. El detalle del procedimiento de medición de las distintas propiedades fue detallado en la sección 3.2.4.

3.4.4. SECADO EN TÚNEL DE AIRE

A diferencia del secado en ventana refractiva para el túnel de aire por motivos de capacidad del equipo la primera modalidad de experiencias se dividió en dos experiencias, primero se obtiene la cinética y tiempo de secado, luego en la segunda se registra el cambio de la actividad de agua determinando el tiempo de secado de la misma forma que lo realizado en ventana refractiva ($a_w = 0,4$). Y finalmente se miden las propiedades de las manzanas secas.

Para el secado en túnel se ajusta la temperatura del aire en 55°C y se conecta la balanza con el computador para el registro continuo de los datos. Para la obtención de la cinética se secó una muestra por experiencia y se registró el cambio en su peso hasta llegar a la condición de equilibrio.

Luego para el registro del cambio en la actividad de agua durante el secado se cargan las muestras en las bandejas las cuales cabe recordar tienen una capacidad total de 12

muestras. Para cada lectura de actividad de agua en el tiempo se tomaron dos muestras. Los intervalos de tiempo para el muestreo de actividad de agua se realizaron de la misma forma que lo hecho en ventana refractiva, realizando una experiencia previa tomando muestras cada 15min. Luego en cada experimento para las zonas identificadas cercanas a actividad de agua 0,4 se tomaron mediciones cada 5min.

Finalmente en la segunda modalidad de experiencia, ya teniendo identificado el tiempo de secado requerido para lograr actividad de agua 0,4 se dejan secar las muestras este tiempo para su posterior medición de propiedades.

3.5. OBTENCIÓN DE COEFICIENTE DIFUSIVO Y DEPENDENCIA CON LA TEMPERATURA

Para la obtención de los coeficientes de difusión efectivos para el proceso de secado se evaluará el ajuste presentado por la segunda ley de Fick resuelta para una geometría de placa semi-infinita según lo presentado en la ecuación 4. Esta resolución solo es válida para tiempos largos de secado ($Mrt < 0,6$).

El coeficiente difusivo se obtendrá del ajuste de las cinéticas de secado para las distintas temperaturas de operación de ventana refractiva y túnel de aire tanto para fruta fresca como fruta pretratada. Este ajuste se realizará mediante la utilización del complemento Solver de Microsoft Excel teniendo como función objetivo la minimización de la suma de los cuadrados de la diferencia entre los datos experimentales y el modelo propuesto, teniendo como variables el coeficiente difusivo para el caso de difusión según la segunda ley de Fick, mientras que para la modelación según difusión anómala se tendrán como variables el coeficiente difusivo y el parámetro α . Además para el ajuste se considerará el espesor promedio de las muestras.

Para el valor del coeficiente difusivo en el secado de manzana en VR se determinó la dependencia de este coeficiente para distintas temperaturas de operación para lo cual se usó el modelo de Arrhenius linealizado presentado en la ecuación 10.

$$\ln(D_{eff}) = \ln(D_0) - \frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T} \right) \quad (10)$$

Donde D_0 es el factor de ajuste pre-exponencial $\left[\frac{m^2}{s} \right]$, E_a es la energía de activación $\left[\frac{kJ}{mol} \right]$, R es la constante universal de los gases $\left[\frac{kJ}{mol \cdot K} \right]$ y T es la temperatura K .

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. PROPIEDADES MATERIA PRIMA

Para la fruta fresca se determinaron parámetros de humedad, actividad de agua, color, textura, y contenido de sólidos solubles. De la misma forma estos parámetros fueron determinados para muestras con pretratamiento de deshidratación osmótica y aplicación de campos eléctricos moderados, esto con el fin de poder comparar principalmente propiedades como la textura y sólidos solubles ya que estas se ven modificadas de forma importante por el pretratamiento.

Los resultados de la determinación de propiedades para fruta fresca y con pretratamiento realizadas se detallan en las tablas 6 y 7 respectivamente.

Tabla 6 Propiedades para fruta fresca.

Propiedad		Valor*	IC (95%)
Humedad %		86,54 ± 0,35	86,15 – 86,94
Actividad de agua		0,9808 ± 0,0032	0,9772 – 0,9843
Dureza N		421,70 ± 7,90	411,89 – 474,59
Color	L	72,28 ± 2,93	68,65 – 75,92
	a	-9,10 ± 2,02	-11,61 – -6,59
	b	18,08 ± 0,80	17,09 – 19,07
Dimensiones	Espesor mm	4,07 ± 0,09	3,96 – 4,18
	Diámetro mm	40,02 ± 0,04	39,98 – 40,07
	Volumen cm ³	5,1 ± 0,12	4,95 – 5,29
Sólidos solubles %		10,7 ± 1,1	9,1 – 12,4

**Los valores presentados corresponden al promedio de tres replicas*

Tabla 7 propiedades para fruta con pretratamiento.

Propiedad		Valor*	IC (95%)
Humedad %		69,44 ± 4,06	62,98 – 75,90
Actividad de agua		0,9516 ± 0,0049	0,9438 – 0,9594
Dureza N		365,22 ± 7,55	355,84 – 3,74,59
Color	L	72,00 ± 2,04	69,46 – 74,54
	a	-9,86 ± 0,98	-11,08 – -8,64
	b	18,42 ± 2,13	15,77 – 21,06
	ΔE	2,9 ± 1,2	1,48 – 4,40
Dimensiones	Espesor mm	2,88 ± 0,36	2,30 – 3,45
	Diámetro mm	35,48 ± 0,50	23,00 – 34,50
	Volumen cm ³	2,7 ± 0,24	2,32 – 3,08
Solidos solubles %		31,9 ± 0,5	31,2 – 32,6

*Los valores presentados corresponden al promedio de tres replicas

El contenido de solidos solubles aumentó producto de la difusión de la sacarosa en las muestras durante la deshidratación osmótica, este valor se incrementó en promedio un 195%. Consecuencia de lo anterior es la disminución del contenido de humedad de las muestras que en promedio disminuyó un 19,8%. La salida de agua repercute directamente en las dimensiones de las muestras llegando a disminuir un 47,1% del volumen inicial. Caso distinto es el color para el cual no se encuentran diferencias significativas para ninguno de los tres parámetros de la escala de hunter evaluados. Esta conservación del color se da principalmente por el efecto de la solución antipardeo. Lo anterior se puede ver en el parámetro de cambio de color total ΔE el cual en promedio aumento 2,9 unidades lo cual no representa un cambio perceptible de color según la resolución del ojo humano.

4.2. CINÉTICAS DE DESHIDRATACIÓN Y DETERMINACIÓN DE TIEMPO DE SECADO

La determinación de las cinéticas de secado se realizó para las distintas condiciones de temperatura de operación en ventana refractiva tanto para muestras de fruta fresca (control) y muestras con aplicación del pretratamiento. Para el caso del secado con aire caliente se realizó para una misma temperatura (55°C) y nuevamente para frutas frescas y con pretratamiento.

4.2.1. CINÉTICA DE SECADO PARA VENTANA REFRACTIVA

A continuación en las figuras 21 y 22 se muestran las cinéticas de secado de manzana en ventana refractiva para las tres condiciones de temperatura propuestas tanto para fruta fresca como para fruta pretratada. El resumen de los datos de humedad se detalla en el anexo 7.1.

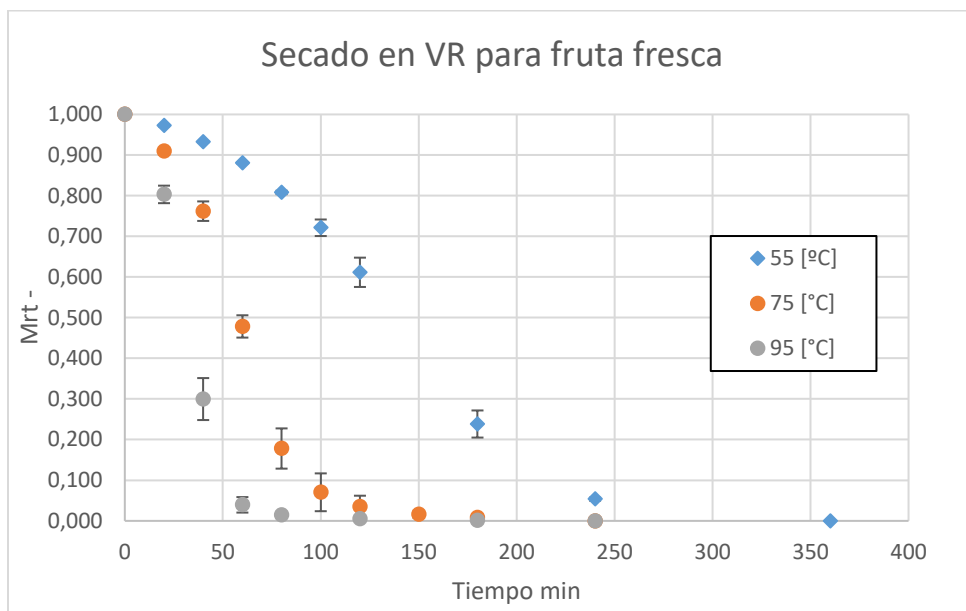


Figura 21 Cinética de secado en VR para fruta fresca.

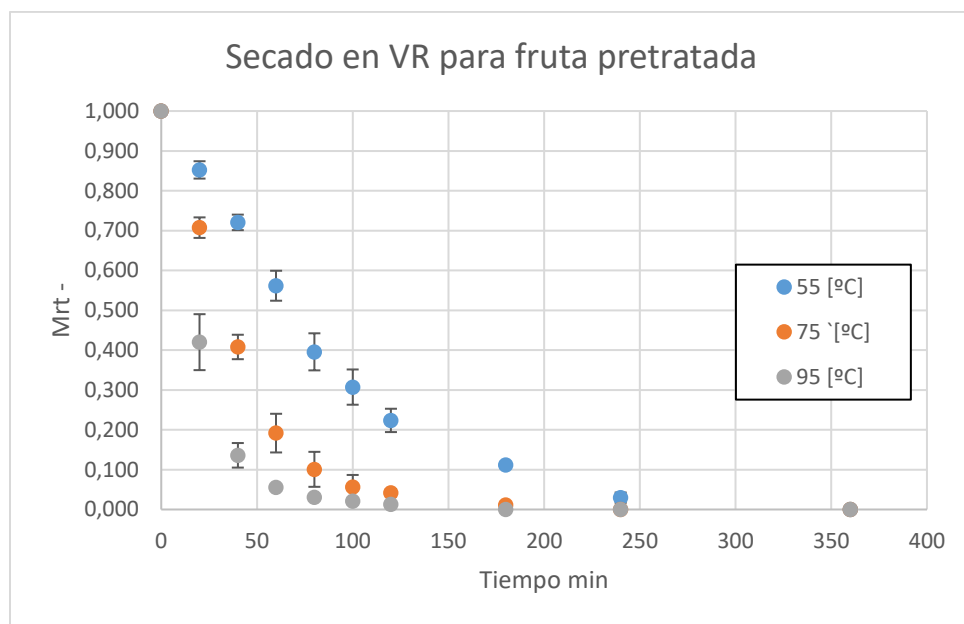


Figura 22 Cinética de secado en VR para fruta pretratada.

Para ambos casos la velocidad de secado es mayor en cuanto aumenta la temperatura. Para el caso de las manzanas pretratadas la cinética muestra una velocidad de secado relativamente constante al inicio del secado a diferencia de las muestras de fruta fresca que presentan un cierto nivel de inercia.

4.2.2. CINÉTICA DE SECADO PARA TÚNEL DE AIRE

De la misma forma en la figura 23 se muestra la cinética de secado de manzana en túnel de aire para fruta fresca y con pretratamiento. El resumen de los datos de humedad se muestra en el anexo 7.2.

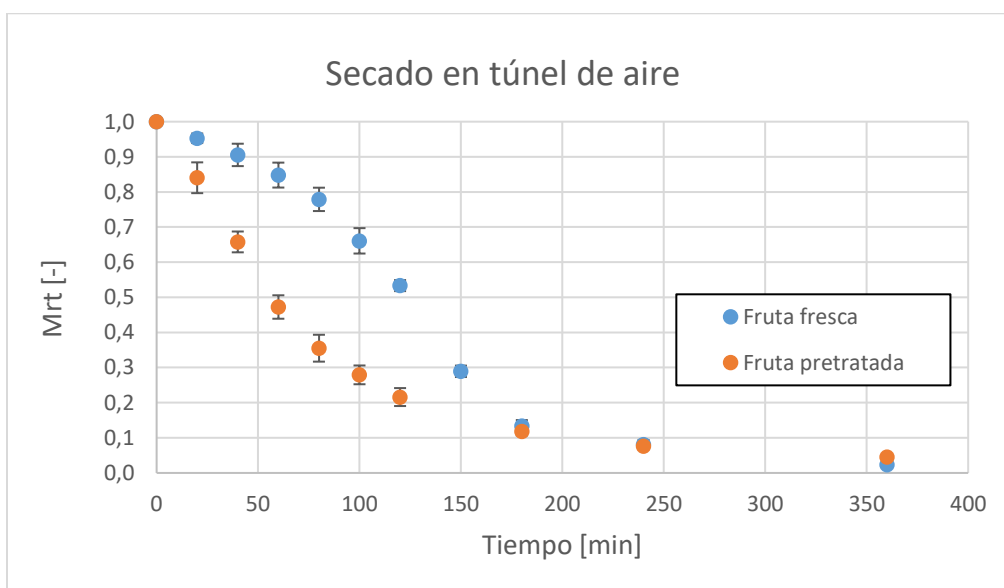


Figura 23 Cinética de secado de manzana en túnel de aire para fruta fresca y pretratada.

Para el secado en túnel la cinética se asemeja a lo ocurrido en ventana refractiva para 55 °C notándose el efecto del pretratamiento en el secado en donde para la primera mitad del tiempo la humedad lograda por las muestras con pretratamiento es considerablemente menor en las muestras pretratadas para luego a partir del minuto 180 ambas convergir a una misma curva de humedad.

4.2.3. DETERMINACIÓN DE TIEMPOS DE SECADO

Como se ha mencionado con anterioridad se estableció como criterio que el tiempo de secado para un tratamiento será el tiempo necesario para llevar a las muestras hasta una actividad de agua de 0,4. A continuación en las figuras 24, 25 y 26 se muestran las evoluciones en el tiempo de la actividad de agua en las muestras secadas en ventana refractiva para las tres condiciones de temperatura y en túnel de aire tanto para fruta fresca y con pretratamiento. La comparación en detalle del cambio en actividad de agua para cada tratamiento en ventana refractiva tanto para fruta fresca como pretratamiento se muestran en el anexo 7.3.

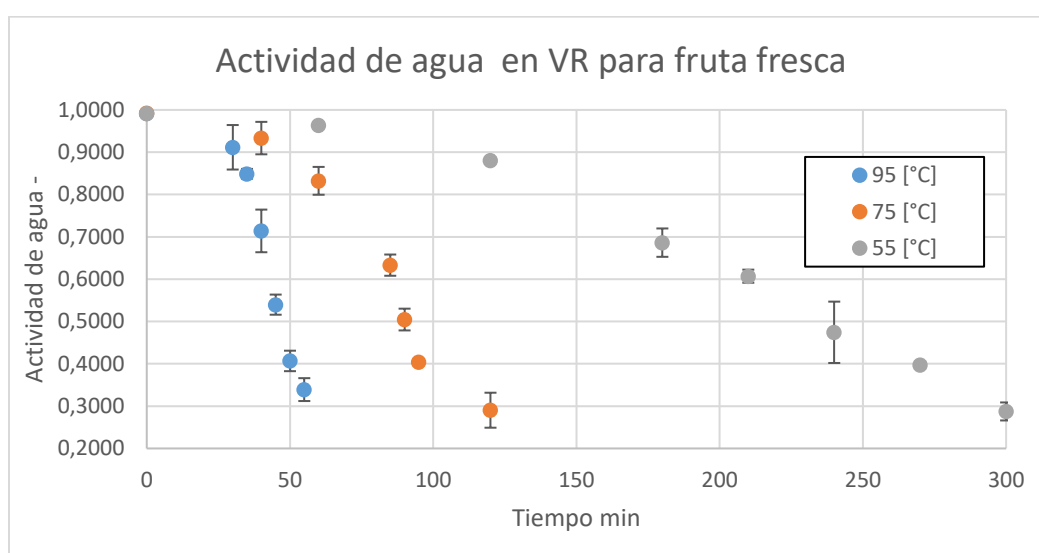


Figura 24 Actividad de agua para secado en VR de fruta fresca

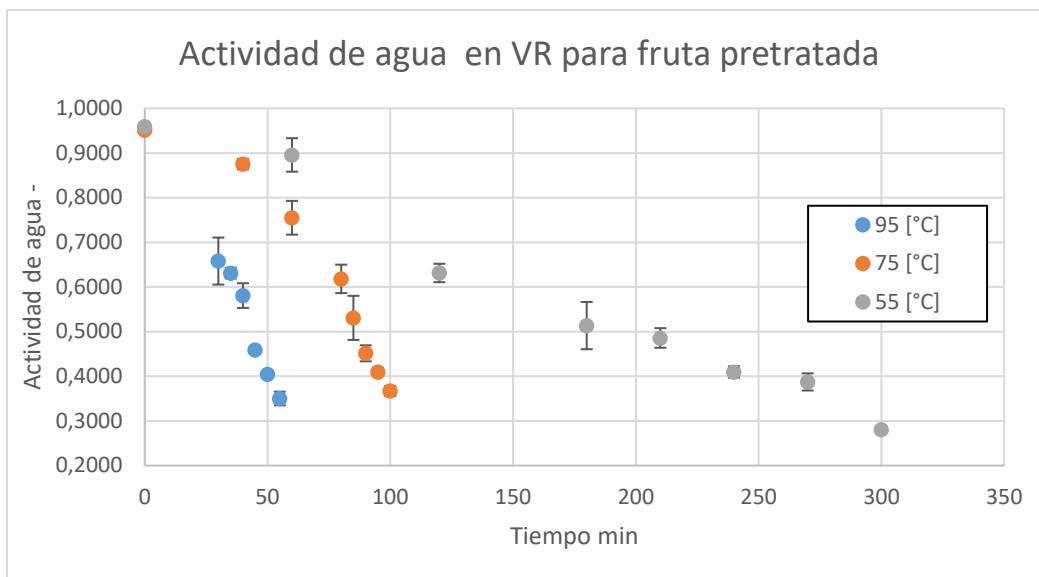


Figura 25 Actividad de agua para secado en VR de fruta pretratada

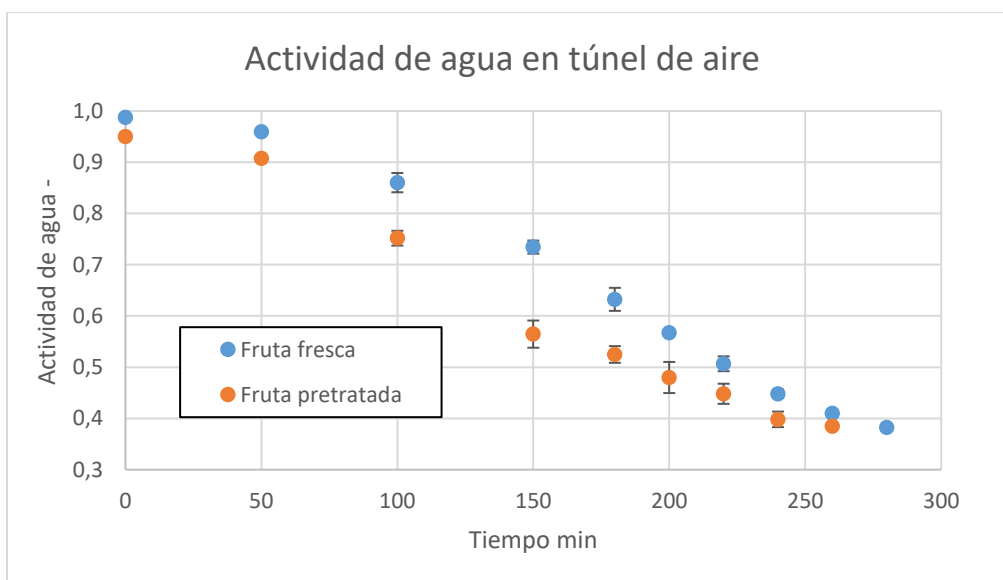


Figura 26 Actividad de agua para secado en túnel de aire

Según lo mostrado en los gráficos anteriores los tiempos definidos para el secado de cada condición para ventana refractiva y túnel de aire se detalla en la tabla 8.

Tabla 8 Tiempos de secado según criterio de actividad de agua propuesto.

Condición de secado	Tiempo secado Fruta fresca* min	Tiempo secado Fruta pretratada* min	Reducción de tiempo de secado min
Túnel de aire 55 °C	280	240	40
VR 55 °C	270	240	30
VR 75 °C	95	95	0
VR 95 °C	50	50	0

*Los tiempos de secado corresponden al necesario para llevar las muestras hasta actividad de agua 0,4 -.

Se puede apreciar que no existen diferencias para los tiempos de secado de los tratamientos en ventana refractiva a 95°C y 75°C lo cual vendría a significar una nula efectividad del pretratamiento de deshidratación osmótica acoplado a la aplicación de campos eléctricos moderados para el criterio dado de tiempo de secado. Por otra parte para la operación en ventana refractiva a 55 °C y secado en túnel de aire se genera una reducción en el tiempo de secado equivalente a 30 y 40 min respectivamente. Estos tiempos deben ser comparados con el tiempo invertido durante la realización del pretratamiento el cual tiene una duración de 80 min, por lo cual el pretratamiento aplicado a las muestras no representa una mejora en el proceso de secado en cuanto a tiempo de secado, sobre todo teniendo en cuenta que la operación normal de la ventana refractiva es a una temperatura de 95 °C en donde para esta condición no se registra disminución alguna en el tiempo de secado.

4.2.4. COMPARACIÓN DE CINÉTICA PARA SECADO EN VR Y TÚNEL DE AIRE

Para esta comparación se considerará la cinética de secado lograda por la ventana refractiva para una temperatura del agua de 95°C ya que es la condición normal de operación. Además solo se considera el caso para fruta fresca. Esta comparación se presenta en la figura 27.

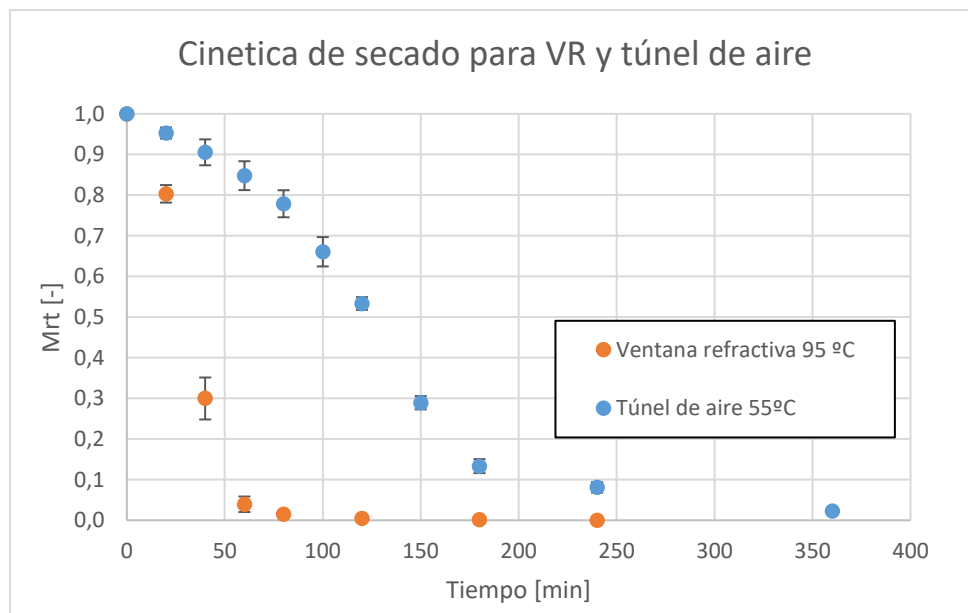


Figura 27 Comparación de cinética de secado en VR y túnel de aire.

Según lo mostrado en la figura 27 la velocidad de secado lograda en la ventana refractiva y el túnel de aire. La ventana refractiva logra el equilibrio prácticamente a los 60min de operación mientras que para el secado en túnel de aire este equilibrio solo se logra para tiempos superiores a 360min.

La gran diferencia en la velocidad de secado entre los dos métodos se puede ver también en el tiempo de secado necesario para lograr actividad de agua 0,4. Según lo mostrado en la tabla 8 la ventana refractiva logra esta condición a los 50 min mientras el secado convencional lo logra en 280min. Estas diferencias son similares con lo encontrado por Robbers *et al.* (2015) para el secado de kiwis en ventana refractiva y horno convectivo en donde el tiempo de operación de este último es prácticamente el triple del tiempo empleado por la ventana refractiva. De la misma forma Ochoa Martinez 2012 informa que para el secado de rebanadas mangos de 2mm de espesor en ventana refractiva y secador de bandejas fue necesario un tiempo de 60min y 240min respectivamente para llegar a un contenido de humedad del 5% de las muestras.

4.3. CAMBIOS DE LAS PROPIEDADES

Las propiedades evaluadas en la investigación fueron dureza, color, tamaño y solidos solubles. Se tiene como objetivo el cuantificar la diferencia en estos parámetros para las muestras secadas en ventana refractiva y en túnel de aire además de caracterizar como cambian estos parámetros con la temperatura de operación en ventana refractiva tanto para fruta fresca sin pretratamiento y fruta pretratada. La comparación de los dos métodos

de secado se hará para fruta fresca para poder quitar algún efecto que podría provocar el pretratamiento.

4.3.1. COMPARACIÓN DE PROPIEDADES DE MANZANAS SECADAS EN VR Y TÚNEL DE AIRE

A continuación en las tablas 9 y 10 se presentan los resúmenes de propiedades medidos para fruta secada en ventana refractiva y túnel de aire respectivamente. Para ambos casos las muestras son de fruta fresca y para tiempos de operación de 50min para la ventana refractiva y 240min para el secado en túnel de aire. Estos tiempos nacen del criterio propuesto de secar las muestras hasta lograr actividad de agua 0,4.

Tabla 9 Propiedades mediadas para fruta fresca secada en VR 95 °C

Propiedad		Valor*	IC 95%
Dureza N		77,71 ± 4,93	69,86– 85,56
Color	L*	80,64 ± 2,33	78,20 – 83,08
	a*	-8,54 ± 0,66	-9,24 – -7,85
	b*	23,91 ± 1,00	22,85 – 24,96
	ΔE	10,35 ± 0,94	8,33 – 12,36
Tamaño	Diámetro mm	27,72 ± 1,89	24,72 – 30,72
	Espesor mm	2,26 ± 0,19	1,96 – 2,57
	Volumen cm ³	1,37 ± 0,17	1,09 – 1,64
Solidos solubles %		69,10 ± 4,37	64,15 – 74,05

**Los valores presentados corresponden al promedio de tres replicas*

Tabla 10 Propiedades mediadas para fruta fresca secada en túnel de aire.

Propiedad		Valor*	IC 95%
Dureza N		143,33 ± 5,06	137,05 – 149,60
Color	L*	80,64 ± 1,24	79,33 – 81,95
	a*	-7,85 ± 0,34	-8,21 – -7,49
	b*	20,29 ± 0,83	19,42 – 21,15
	ΔE	8,78 ± 1,18	7,55 – 10,02
Tamaño	Diámetro mm	27,68 ± 0,82	26,66 – 28,70
	Espesor mm	2,39 ± 0,09	2,28 – 2,50
	Volumen cm ³	1,44 ± 0,11	1,30 – 1,58
Solidos solubles %		65,92 ± 6,63	58,41 – 73,43

**Los valores presentados corresponden al promedio de tres replicas*

Al comparar las propiedades de las manzanas secadas tanto en ventana refractiva como en túnel de aire se encontraron diferencias significativas en los parámetros de textura y b^* .

Para el parámetro de textura se tiene la diferencia más alta alcanzada en las propiedades evaluadas, las muestras secadas en túnel de aire presentan una dureza 86,0% mayor que la presentada por las muestras secadas en VR. Lo anterior es similar a lo mostrado por Robbers *et al.* (2015) para el secado de kiwi en donde reporta índices de dureza para el secado convectivo de más del doble comparados con las muestras secadas en VR. Este fenómeno podría ser explicado por la naturaleza de los dos métodos de secado, ya que en el secado VR parte de la energía es transportada mediante radiación, lo cual daña menos la estructura de las muestras.

En cuanto al color se encontraron diferencias significativas para el parámetros b^* , este aumentó para ambas técnicas de secado en 32,5% y 12,2% para ventana refractiva y túnel de aire respectivamente. El aumento en el parámetro b^* indica una tendencia de las muestras hacia los tonos amarillos. Para ambos casos estos cambios de color se resumen en el parámetro ΔE el cual presentó cambios significativos para cada método de secado, pero no diferenciables entre sí para la resolución de color humana, ya que la diferencia entre estos dos parámetros para cada tratamiento solo alcanza 1,57 unidades. Estos resultados se asemeja a lo informado por Topuz A. *et al.* (2009) para el secado de pimentón en donde el secado convectivo (secador de bandejas) logra un cambio de color total de 11,7 unidades mientras que las muestras secadas en ventana refractiva cambian en total 14,4 unidades.

4.3.2. EFECTO DEL PRETRATAMIENTO EN PROPIEDADES ORGANOLECPTICAS

Para dimensionar el efecto del pretratamiento en las propiedades de manzana secada en ventana refractiva se presentan las figuras 28 - 30 en donde se ve el cambio en el valor de estos parámetros para las tres temperaturas de operación de ventana refractiva utilizadas tanto para fruta fresca seca y fruta con pretratamiento.

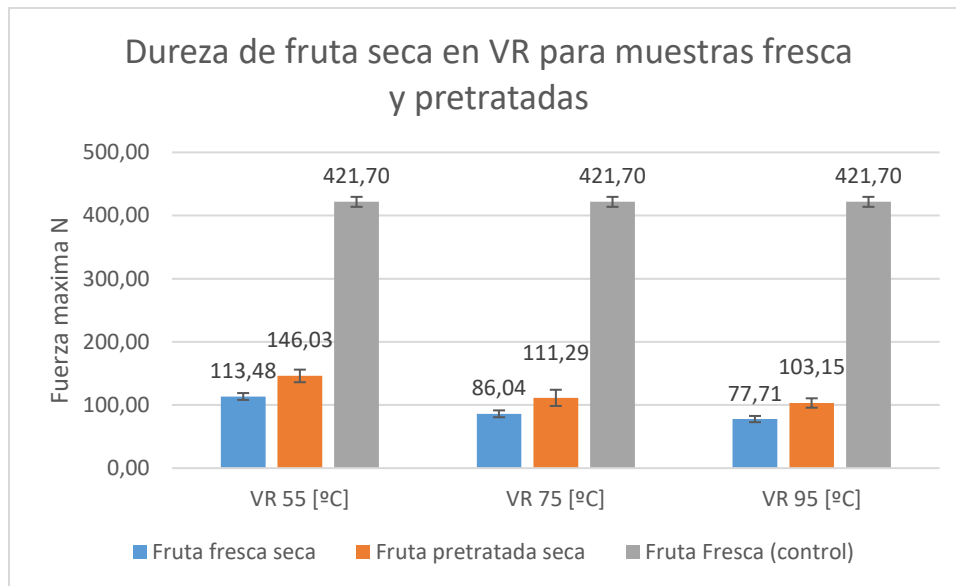


Figura 28 Dureza de fruta seca en VR para muestras frescas y pretratadas.

Como se puede apreciar en la figura 28 tanto para la fruta fresca seca y fruta pretratada seca se genera una disminución en la resistencia ofrecida por las muestras. En promedio la dureza disminuyó 78,1% y 71,5% para las muestras frescas y con pretratamiento respectivamente. Además se evidencia una tendencia a bajar la dureza de las muestra a medida que aumenta la temperatura de operación de la ventana refractiva. Lo anterior coincide con lo reportado por Robbers *et al.* (2015) para el secado de kiwi en ventana refractiva. La razón principal de esta tendencia es que la textura de la manzana se vuelve menos plástica para temperaturas más altas y se convierte en hojas crujientes, lo cual provoca que la fruta presente una menor resistencia contra las fuerzas recibidas.

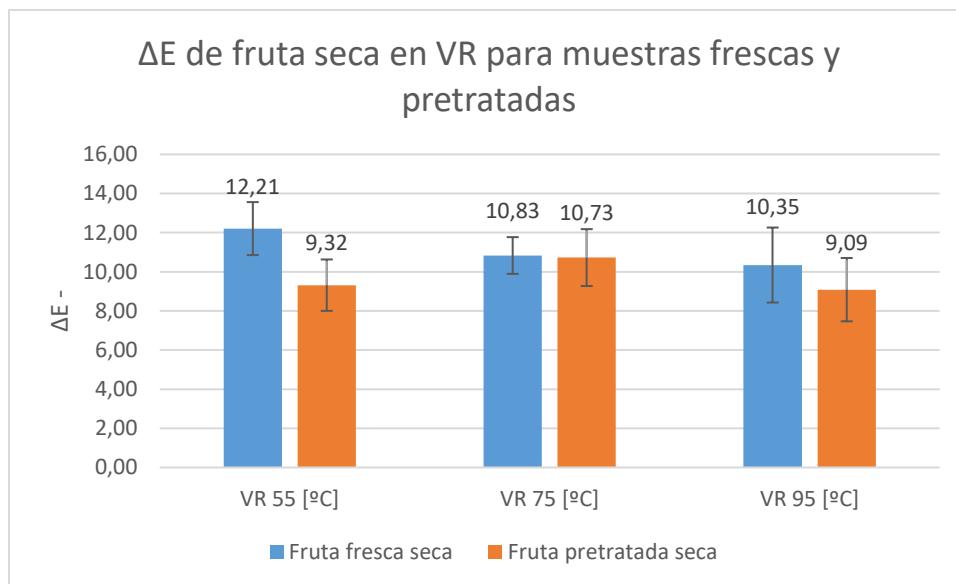


Figura 29 ΔE de fruta seca en VR para muestras frescas y pretratadas.

Para el cambio de color total mostrado en la figura 29 estadísticamente hablando solo se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos de frutas secados a 55 °C, sin embargo esta diferencia no es significativa a la resolución de color del ojo humano. Según lo anterior el pretratamiento no es influyente en el cambio de color general de las muestras, lo cual podría inferir un eficaz efecto de la solución antipardeo utilizada.

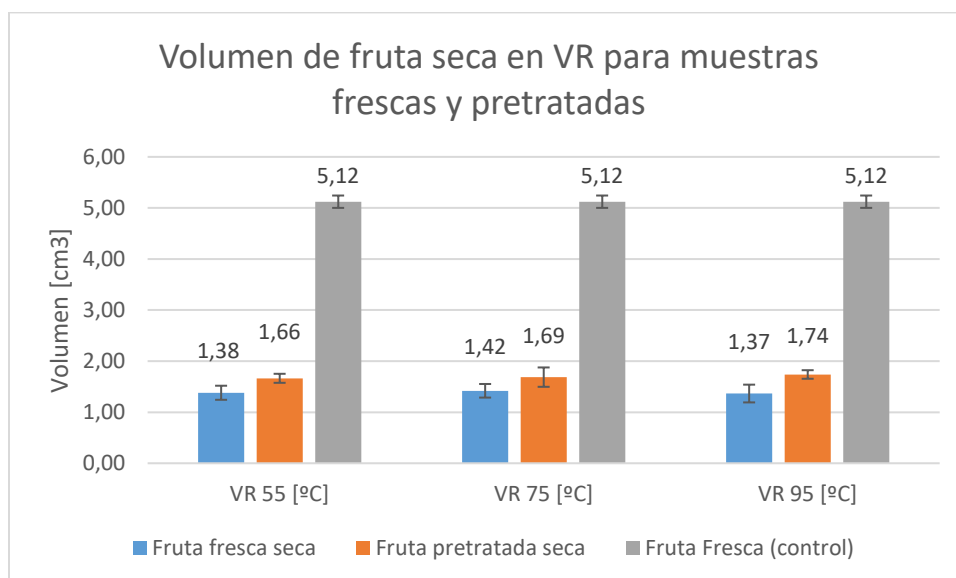


Figura 30 Volumen de fruta seca en VR para muestras frescas y pretratadas.

La deshidratación de las muestras repercute de gran forma en las dimensiones de esta, como se puede ver en la figura 30 el volumen de las muestras secas representa en promedio un 27,1% y 33,1% del volumen inicial para muestras sin pretratamiento y muestras con pretratamiento respectivamente. Para las tres condiciones de temperatura de operación se encontraron diferencias significativas para el volumen de frutas secas a partir de fruta fresca y fruta pretratada. En las tres condiciones como era de esperarse se encuentra que el volumen final de las muestras es mayor para aquellas que fueron pretratadas, esto se explica fundamentalmente debido a la difusión de sacarosa a las muestras durante la deshidratación osmótica.

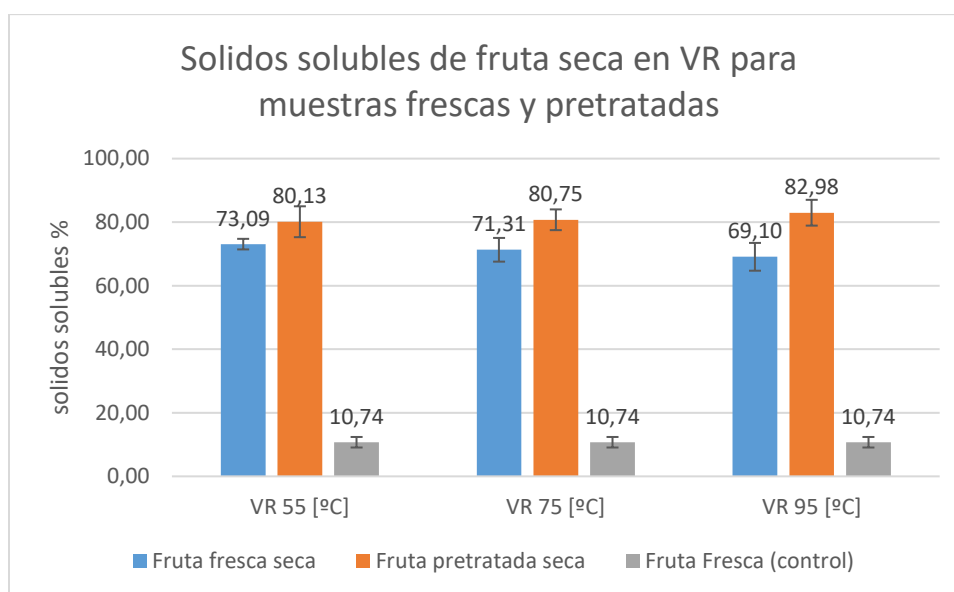


Figura 31 Solidos solubles de fruta seca en VR para muestras frescas y pretratadas.

Para el contenido de solidos solubles en las muestras secadas en VR se encuentra que este parámetro aumenta significativamente durante el secado. Esto principalmente se da ya que la relación de solidos solubles en las muestras va aumentando en función de la disminución de agua. En promedio este parámetro aumento respecto al valor de la fruta fresca en 662,6% y 756,7% para las muestras control y fruta pretratadas respectivamente. La diferencia que se da en el contenido de solidos solubles entre los tratamientos se explica por la sacarosa difundida en la fruta pretratada durante el proceso de deshidratación osmótica.

4.4. DETERMINACIÓN DE COEFICIENTE DE DIFUSIÓN

La determinación del coeficiente de difusión se realizó mediante el ajuste de la segunda ley de Fick y bajo el modelo de difusión anómalo presentado previamente. Desde la tabla 11 a la tabla 14 se detalla el valor del coeficiente de difusión para cada temperatura de operación en venta refractiva y para túnel de aire, para ambos casos para fruta fresca sin pretratamiento y fruta con pretratamiento. Cabe recordar que el ajuste de difusión anómalo se realizó buscando un mismo valor de α para las distintas temperaturas de operación ya que este parámetro solo depende del material.

En el anexo 7.4 se muestran los ajustes de forma gráfica para todas las condiciones.

Tabla 11 Valores de D_{eff} , y suma de errores cuadrados obtenidos usando modelo de 2ª Ley de Fick en VR

	Fruta fresca			Fruta pretratada		
	$D_{eff} \cdot 10^{10} \text{ m}^2/\text{s}$	R^2	SEE	$D_{eff} \cdot 10^{10} \text{ m}^2/\text{s}$	R^2	SEE
VR 55 °C	0,73	0,9038	0,332	1,45	0,9774	1,7E-02
VR 75 °C	2,15	0,8870	0,279	3,40	0,9565	8,8E-03
VR 95 °C	3,67	0,7540	0,127	5,82	0,9766	4,0E-03

Tabla 12 Valores de D_{eff} , y suma de errores cuadrados obtenidos usando modelo de difusión anómalo en VR

	Fruta fresca			Fruta pretratada		
	$\alpha = 2,231$			$\alpha = 1,452$		
	$D_{eff} \cdot 10^{14} \text{ m}^2/\text{s}^\alpha$	R^2	SEE	$D_{eff} \cdot 10^{11} \text{ m}^2/\text{s}^\alpha$	R^2	SEE
VR 55 °C	0,11	0,9877	1,2E-02	0,36	0,9891	2,9E-03
VR 75 °C	0,81	0,9811	7,5E-03	1,06	0,9878	8,8E-03
VR 95 °C	3,00	0,9927	8,0E-04	2,52	0,9927	8,0E-03

Tabla 13 Valores de D_{eff} , y suma de errores cuadrados obtenidos usando modelo de 2ª Ley de Fick en túnel de aire

	Fruta fresca			Fruta pretratada		
	$D_{eff} \cdot 10^{10} \text{ m}^2/\text{s}$	R^2	SEE	$D_{eff} \cdot 10^{10} \text{ m}^2/\text{s}$	R^2	SEE
Túnel de aire	1,20	0,9262	0,1086	2,24	0,9976	1,6E-02

Tabla 14 Valores de D_{eff} , y suma de errores cuadrados obtenidos usando modelo de difusión anómalo en túnel de aire

	Fruta fresca			Fruta pretratada		
	$\alpha = 2,243$			$\alpha = 1,458$		
	$D_{eff} \cdot 10^{14} \text{ m}^2/\text{s}^\alpha$	R^2	SEE	$D_{eff} \cdot 10^{12} \text{ m}^2/\text{s}^\alpha$	R^2	SEE
Túnel de aire	0,13	0,9428	2,4E-02	4,42	0,9989	3,3E-04

Como se puede ver en las tablas recién presentadas tanto para las muestras secadas en ventana refractiva como en túnel del aire se obtuvo un mejor ajuste de la cinética de secado para el modelo de difusión anómala. La fruta secada en ventana refractiva (95°C) que no fue llevada a pretratamiento presenta un valor de R^2 de 0,7540 mientras que este parámetro para el modelo de difusión anómala muestra un mejor ajuste con un valor de 0,9927. De la misma forma la fruta que fue llevada a pretratamiento presenta un mejor ajuste para el modelo de difusión anómala. Si bien el modelo de difusión anómala presenta en general un mejor ajuste, la segunda ley de Fick modela de buena forma la cinética de secado de las muestras pretratadas, esto se puede justificar con valor del parámetro α el cual muestra la desviación de la cinética respecto a lo predicho por Fick, para fruta fresca este parámetro alcanzó un valor de 2,231 mientras que la fruta pretratada logró un valor de 1,452. Estos valores del parámetro α se confirman en el ajuste de difusión anómala para el secado en túnel de aire donde se obtuvieron prácticamente los mismos valores teniendo diferencias para ambos métodos de secados menores al 0,6%.

En cuanto a los valores de los coeficientes de difusión encontrados estos son comparables con los valores reportados por otros autores. Ocoro *et al.* (2013) informa valores en un rango de $(0,4 - 3,1) \cdot 10^{-10}$ para papaya de 4 mm de espesor secada en ventana refractiva (70°C), de la misma forma Ochoa-Martínez *et al.* (2012) Presenta valores que van en el rango de $(9,8 - 18) \cdot 10^{-10}$ para mangos secados en VR, finalmente Beigi (2016) por su parte reporta valores que oscilan entre $(6,8 - 7,4) \cdot 10^{-10}$ para discos de manzana deshidratadas mediante secado convectivo (50 °C).

4.4.1. EFECTO DE LA TEMPERATURA EN COEFICIENTE DE DIFUSIÓN

Es de gran importancia verificar que el coeficiente de difusión tenga una dependencia tipo Arrhenius con la temperatura. El efecto de D_{eff} con la temperatura depende fuertemente de la estructura del alimento. Para alimentos en donde predomina la difusión líquida el coeficiente difusivo puede expresarse mediante un modelo de Arrhenius. En la tabla se muestra los resultados del ajuste de los valores de D_{eff} para las tres temperaturas de operación evaluadas en VR para el modelo de Arrhenius tanto para coeficientes obtenidos mediante el modelo de difusión anómala y para la segunda ley de Fick.

	Modelo de Fick			Difusión anómala $\alpha = 2,243$		
	Ea kJ/mol	D_0 -	R^2	Ea kJ/mol	D_0 -	R^2
VR fruta fresca	40,7	2,38 E-04	0,9751	88,0	2,05 E-02	0,9923
VR fruta pretratada	35,1	5,74 E-05	0,9903	86,2	1,99 E-02	0,9992

Para todos los casos evaluados se encuentra un buen ajuste de la dependencia del coeficiente difusivo con la temperatura para un modelo tipo Arrhenius teniéndose un mejor ajuste para los coeficientes obtenidos con el modelo de difusión anómala. Por lo cual se puede considerar que para todos los casos se tiene una dependencia de D_{eff} del tipo Arrhenius con la temperatura.

5. CONCLUSIONES

La deshidratación de manzana de variedad Granny Smith en VR presenta ventaja frente a la deshidratación convencional en túnel de aire. La cinética de secado en VR para una temperatura de operación de 95°C mostró una alta velocidad de deshidratación en comparación al secado convencional sin afectar de las propiedades del producto final. De hecho ambas técnicas de secado generan un producto deshidratado de similares características solo presentando diferencias significativas en textura.

El secado en ventana refractiva para las tres temperaturas de operación evaluadas generó un producto de similares características al túnel de aire pero para tiempos de operación considerablemente menores.

El pretratamiento evaluado de deshidratación osmótica acoplado a la aplicación de campos eléctricos moderados no produjo grandes alteraciones en las propiedades finales del producto, sin embargo se considera de nula efectividad en cuanto a que no generó diferencias en los tiempos de secado para el criterio propuesto de actividad de agua final igual a 0,4. No obstante si se evalúan los tiempos de operación para valores mayores de actividades de agua final el pretratamiento puede representar una diferencia significativa en los tiempos de secado.

El proceso de difusión del agua durante la deshidratación de manzana en VR al igual que muchos otros alimentos no se ajusta de buena manera a lo predicho en la segunda ley de Fick ya que presenta una cinética difusiva de mayor velocidad. En cambio este proceso de deshidratación es representado de muy buena forma mediante el modelo de difusión anómala presentado ajustándose para todas las condiciones de temperaturas evaluadas.

6. REFERENCIAS

- Abonyi, B. F. (2002). Quality Retention in Strawberry and Carrot Purees Dried with Refractance Window™ System. *Journal of food science*, 67(3), 1051-1056.
- Abonyi, B. T. (1999). Evaluation of Energy Efficiency and Quality Retention for the Refractance Window™ Drying System. *Journal of food Science*, 50-62.
- Abul-fadl, M. G. (2011). Effect of Refractance-Window (RW) drying method on quality criteria of produced tomato powder as compared to the convection drying method. *World applied sciences journal*, 15(2), 953-965.
- Barbosa-Cánovas, G. V.-M. (2000). *Deshidratación de alimentos*. Zaragoza, España: Acriba S.A.
- Beigi, M. (2016). Energy efficiency and moisture diffusivity of apple slices during convective drying. *Food science technology*, 145-150.
- Bown, R. (06 de abril de 2016). *Simfruit*. Obtenido de <http://www.simfruit.cl/noticias-destacadas/1587-temporada-de-manzanas-chilenas-2016-pronostico-preliminar-indica-recuperacion-de-volumen-de-exportaciones-en-relacion-a-campana-2015.html>
- Brennan, J. (2006). *Food Processing Handbook*. weinheim: wiley-vch.
- Capariño, O. T. (2012). Effect of drying methods. *Journal of Food Engineering*, 111, 135-148.
- Clarke, P. (2004). Refractance window TM - "down under". *14th international drying symposium*, (págs. 22-25). Sao Paulo, Brazil.
- Crank, J. (1975). *the mathematics of diffusion*. Oxford: Clarendon Press.
- Deid-Mahd, J. D. (2015). COMPARING QUALITY CHARACTERISTICS OF OVEN-DRIED. *Journal of food science*, 362-372.
- Desobry, S. N. (1997). Comparison of Spray-drying, Drum-drying and Freeze-drying for β -Carotene Encapsulation and Preservation. *Journal of food science*, 62(2), 1158-1162.
- DUPONT. (2012). Mylar polyester film: chemical proprieties. *Dupont teijin film*, pag. 4.
- Fellows, P. (2000). *Food processing technology, principles and practice*. new york: woodhead publishing limited.
- Feng, H. K.-X. (2001). Microbiological reduction in refractance window drying of pumpkin purees. *IFT Annual Meeting*.
- Geankoplis, C. (2006). *Procesos de transporte y operaciones unitarias* (Vol. 3). mexico: CECSA.
- Holman, J. (1998). *Transferencia de calor*. Madrid: McGraw - Hill.
- Indian Institute of crop processing technology. (2017). *Handbook of Drying for Dairy Products*. En Anandharamakrishnan (Ed.). Thanjavur, India: Wiley Blackwell.
- Instituto nacional de normalización. (2003). NCh 841.

- Kromida, M. M. (2001). The effect of drying method on the color dehydrated products. *International Journal of Food Science and Technology*, 36, 53-59.
- Leirzeson, S. S. (2005). Stability and sensory shelf life of orange juice pasteurized by continuous heating. *Journal of Agricultural Food Chemistry*, 40, 12-4018.
- Leung, H. (1981). Structure and properties of water.
- Marín, E. L. (diciembre de 2006). La rehidratación de alimentos deshidratados. *Revista chilena de nutrición*, 33(3).
- Maskan, M. (2000). Microwave/air and microwave finish drying. *Journal of Food Science*, 44, 71-78.
- Maskan, M. (2001.b). Drying, shrinkage and rehydration characteristics of kiwi fruits during hot air and microwave. *Journal of Food Science*, 48, 177-182.
- Maupoe, P. G. (2001). *Introducción al secado de alimentos por aire caliente*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- MCD TECHNOLOGIES INC. (2000). *Refractance window*. Tacoma, Washington.
- Mujumdar, A. (2007). Principles, classification and selection of dryers. En *Handbook of industrial drying* (págs. 4-31). Boca Raton, Florida: Taylor & Francis.
- Mujumdar, A. (2015). *Handbook of industrial drying*. New York: Marcel Dekker.
- Nayak, B. B. (2011). Colored potatoes (*Solanum tuberosum* L.) dried for antioxidant-rich value-added foods. *Journal of Food Processing and Preservation*, 35, 571-580.
- Nindo, C. F. (2003). *Energy utilization and microbial reduction in a new film drying system*.
- Nindo, C. S. (2003). Evaluation of drying technologies for retention of physical quality and antioxidants in asparagus (*Asparagus officinalis*, L.).
- Nindo, C. Y. (2007). Refractance window dehydration technology: A novel contact drying method. *Drying Technology*.
- 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 WINDOW TECHNOLOGY. *DYNA*, 80(183).
- Oríkasa, T. W. (2008). Drying characteristics of kiwifruit during hot air drying. *Journal of Food Science*, 85, 303-308.
- Pavan, M. (2010). *Effects of freeze drying, refractance window drying and hot-air drying on the quality parameters of açai*. Illinois, USA : Tesis. College of the University of Illinois at Urbana-Champaign.
- Pérez, J. M. (2013). Deshidratación de frutas y hortalizas en ventana refractiva. *Programa de Doctorado en Ciencia de Alimentos*.

- Rahman, M. P. (2007). Drying and food preservation. En *Handbook of Food preservation* (págs. 404-427). Boca Raton: Rahman M.S.
- Robbers, M. S. (2015). Osmotic convective dehydrofreezing process for drying kiwifruit. *Journal food science*, 62, 1039-1047.
- Rodrigues, R. M. (s.f.).
- Rodriguez, R. M. (2004). Evaluation of reverse osmosis and osmotic evaporation to concentrate camu-camu juice (*Myrciaria dubia*). *Journal of Food Engineering*, 63, 97-102.
- Sandu, C. (1986). Infrared radiative drying in food engineering: A process analysis. *Biotechnology Progress*,.
- Selvamuthukumaran, M. (2006). Optimization of spray drying conditions for production of bifidus milk powder from cow milk. *Journal of food quality*, 29, 305-318.
- Simpson, R. (2007). Aceleración de la deshidratación osmótica de frambuesas (*Rubus idaeus*) por medio de calentamiento óhmico. *Archivos latinoamericanos de nutrición*, 192-195.
- Simpson, R. J. (2013). Fractional calculus as a mathematical tool to improve the modeling of mass transfer phenomena in food processing. . *Food Engineering Reviews*, 45-55.
- Simpson, R. R. (2015). Difusion mechanisms during the osmotic dehydration of granny smith apples subjected to a moderate electric field. *Journal of food engineering*, 205-211.
- Singh, R. H. (2014). Deshydration. En *Introduction to Food Engineering* (págs. 675-708). Elsevier Inc.
- Specialty produce*. (06 de mayo de 2017). Obtenido de Specialty produce: www.specialtyproduce.com/produce/Granny_Smith_Apples_2021
- Stewar, K. (2004). Processing of Cranberry, Blueberry, Currant and Gooseberry. En D. M. Barrett (Ed.), *Processig Fruit* (Vol. 2, págs. 365-397). Science and technology.
- Topuz, A. F. (2009). The effect of drying method and storage on colour characteristics of paprika. *lebensm wiss technol journal*, 42, 1667-1673.
- United states departament of agriculture. (06 de abril de 2017). *Fresh Deciduous Fruit: World Markets World market and trade*. Obtenido de <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/fruit.pdf>
- Wang, W. S. (1998). Study of electro-thermal effects on juice yield from cellular tissues. *IFT anual meeting*.

7. ANEXOS

7.1. Resumen de datos de humedad en el tiempo para las tres replicadas realizadas para ventana refractiva en todas las condiciones.

Tabla 15 Resumen humedad VR 95 °C Fruta fresca

Humedad VR 95 °C fruta fresca								
tiempo	H 1	H 2	H 3	H prom	Mrt 1	Mrt 2	Mrt 3	Mrt Prom
0	89,31	89,79	89,69	89,6	1,000	1,000	1,000	1,000
20	75,31	75,64	72,00	74,3	0,813	0,818	0,779	0,803
40	39,16	37,54	29,00	35,2	0,331	0,329	0,241	0,300
60	18,57	13,37	13,15	15,0	0,057	0,019	0,043	0,039
80	15,51	12,62	11,26	13,1	0,016	0,010	0,019	0,015
120	14,69	11,85	10,55	12,4	0,005	0,000	0,010	0,005
180	14,42	12,00	9,82	12,1	0,002	0,002	0,001	0,001
240	14,30	11,87	9,73	12,0	0,000	0,000	0,000	0,000

Tabla 16 Resumen actividad de agua en VR 95°C Fruta fresca

Actividad de agua VR 95 °C Fruta fresca				
Tiempo	a_w 1	a_w 2	a_w 3	a_w promedio
0	0,9885	0,9925	0,9941	0,9917
30	0,9706	0,8948	0,8696	0,9117
35	0,8390	0,8617	0,8465	0,8491
40	0,7444	0,7418	0,6559	0,7140
45	0,5192	0,5658	0,5344	0,5398
50	0,3801	0,4273	0,4129	0,4068
55	0,3651	0,3410	0,3111	0,3391

Tabla 17 Resumen humedad VR 75 °C Fruta fresca

Humedad VR 75 °C fruta fresca								
tiempo	H 1	H 2	H 3	H prom	Mrt 1	Mrt 2	Mrt 3	Mrt Prom
0	88,6	89,1	89,0	88,9	1,000	1,000	1,000	1,000
20	82,2	82,1	81,4	81,9	0,917	0,909	0,902	0,909
40	72,4	70,3	69,0	70,6	0,788	0,756	0,741	0,762
60	50,5	49,4	46,4	48,8	0,501	0,486	0,448	0,478
80	30,1	24,7	22,3	25,7	0,232	0,167	0,136	0,178
100	21,8	15,9	14,6	17,4	0,123	0,053	0,036	0,070
120	17,4	13,7	13,0	14,7	0,066	0,024	0,015	0,035
150	14,2	13,1	12,4	13,2	0,025	0,017	0,007	0,016
180	13,2	12,7	12,0	12,6	0,012	0,011	0,002	0,008
240	12,4	11,8	11,8	12,0	0,000	0,000	0,000	0,000

Tabla 18 Resumen actividad de agua en VR 75°C Fruta fresca

Actividad de agua VR 75 °C Fruta fresca				
Tiempo	a_w 1	a_w 2	a_w 3	a_w promedio
0	0,9943	0,9928	0,9912	0,9927
40	0,9736	0,9295	0,8972	0,9334
60	0,8271	0,8024	0,8676	0,8324
85	0,6524	0,6048	0,6423	0,6332
90	0,4841	0,4963	0,5335	0,5046
95	0,4012	0,4008	0,4100	0,4040
120	0,2725	0,2609	0,3376	0,2903

Tabla 19 Resumen humedad VR 55 °C Fruta fresca

Humedad VR 55 °C fruta fresca								
tiempo	H 1	H 2	H 3	H prom	Mrt 1	Mrt 2	Mrt 3	Mrt Prom
0	90,2	88,8	89,4	89,5	1,000	1,000	1,000	1,000
20	88,2	86,8	87,4	87,5	0,970	0,974	0,973	0,972
40	85,6	83,7	84,5	84,6	0,931	0,934	0,933	0,933
60	82,4	79,6	80,5	80,8	0,883	0,881	0,879	0,881
80	77,7	73,9	75,0	75,5	0,812	0,808	0,804	0,808
100	73,3	66,4	68,0	69,2	0,745	0,711	0,708	0,721
120	67,2	57,3	59,1	61,2	0,653	0,593	0,588	0,612
180	42,2	28,7	31,7	34,2	0,277	0,224	0,215	0,238
240	27,6	15,6	19,5	20,9	0,057	0,054	0,050	0,054
360	23,9	11,4	15,8	17,1	0,000	0,000	0,000	0,000

Tabla 20 Resumen actividad de agua en VR 55°C Fruta fresca

Actividad de agua VR 55 °C Fruta fresca				
Tiempo	a_w 1	a_w 2	a_w 3	a_w promedio
0	0,9914	0,9927	0,9914	0,9919
60	0,9634	0,9644	0,9634	0,9638
120	0,8773	0,8875	0,8773	0,8807
180	0,6670	0,7251	0,6670	0,6864
210	0,5981	0,6249	0,5981	0,6070
240	0,4326	0,5581	0,4326	0,4744
270	0,4018	0,3887	0,4018	0,3974
300	0,2997	0,2628	0,2997	0,2874

Tabla 21 Resumen humedad VR 95 °C Fruta Pretratada.

Humedad VR 95 °C Fruta pretratada								
tiempo	H 1	H 2	H 3	H prom	Mrt 1	Mrt 2	Mrt 3	Mrt Prom
0	65,43	68,40	66,42	66,8	1,000	1,000	1,000	1,000
20	30,92	35,80	26,18	31,0	0,423	0,488	0,347	0,420
40	13,34	15,54	11,47	13,4	0,129	0,169	0,109	0,136
60	9,10	8,25	8,17	8,5	0,058	0,055	0,055	0,056
80	7,43	6,83	6,61	7,0	0,030	0,032	0,030	0,031
100	6,78	6,03	6,23	6,3	0,019	0,020	0,024	0,021
120	6,41	5,56	5,55	5,8	0,013	0,012	0,013	0,013
180	5,63	4,78	4,77	5,1	0,000	0,000	0,000	0,000
240	4,91	4,73	4,72	4,8	0,000	0,000	0,000	0,000
360	4,91	4,73	4,72	4,788	0,000	0,000	0,000	0,000

Tabla 22 Resumen actividad de agua en VR 95°C Fruta Pretratada.

Actividad de agua VR 95 °C Fruta pretratada				
Tiempo	a_w 1	a_w 2	a_w 3	a_w promedio
0	0,9523	0,9523	0,9512	0,9520
30	0,6899	0,6868	0,5972	0,6580
35	0,6249	0,6449	0,6235	0,6311
40	0,6085	0,5803	0,5532	0,5807
45	0,4530	0,4569	0,4660	0,4586
50	0,4111	0,4057	0,3972	0,4046
55	0,3659	0,3492	0,3354	0,3502

Tabla 23 Resumen humedad VR 75 °C Fruta Pretratada.

Humedad VR 75 °C Fruta pretratada								
tiempo	H 1	H 2	H 3	H prom	Mrt 1	Mrt 2	Mrt 3	Mrt Prom
0	67,90	72,67	68,49	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
20	51,23	55,28	50,96	0,678	0,719	0,725	0,707	0,707
40	34,66	35,02	32,95	0,379	0,440	0,405	0,408	0,408
60	22,37	18,17	19,88	0,204	0,233	0,138	0,192	0,192
80	16,58	12,68	14,43	0,115	0,135	0,051	0,101	0,101
100	13,06	10,79	11,78	0,072	0,076	0,022	0,056	0,056
120	11,20	11,43	10,96	0,050	0,045	0,032	0,042	0,042
180	9,47	9,70	9,14	0,015	0,016	0,004	0,012	0,012
240	8,54	9,43	8,45	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
360	8,54	9,43	8,45	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Tabla 24 Resumen actividad de agua en VR 75°C Fruta Pretratada.

Actividad de agua VR 75 °C Fruta pretratada				
Tiempo	a_w 1	a_w 2	a_w 3	a_w promedio
0	0,9517	0,9514	0,9527	0,9519
40	0,8639	0,8872	0,8741	0,8751
60	0,7603	0,7147	0,7898	0,7549
80	0,6446	0,5827	0,6270	0,6181
85	0,5503	0,4746	0,5675	0,5308
90	0,4661	0,4314	0,4567	0,4514
95	0,4196	0,4078	0,4020	0,4098
100	0,3544	0,3713	0,3751	0,3669

Tabla 25 Resumen humedad VR 55 °C Fruta Pretratada.

Humedad VR 55 °C Fruta pretratada								
tiempo	H 1	H 2	H 3	H prom	Mrt 1	Mrt 2	Mrt 3	Mrt Prom
0	68,36	67,54	70,24	68,72	1,000	1,000	1,000	1,000
20	59,42	60,06	62,60	60,69	0,827	0,865	0,865	0,852
40	53,09	51,70	55,69	53,49	0,705	0,714	0,742	0,720
60	43,91	42,88	47,76	44,85	0,527	0,556	0,602	0,562
80	34,32	35,38	37,75	35,82	0,342	0,420	0,425	0,396
100	30,34	28,88	33,72	30,98	0,265	0,303	0,353	0,307
120	26,96	23,97	28,24	26,39	0,200	0,215	0,256	0,224
180	22,36	17,90	20,46	20,24	0,111	0,105	0,118	0,112
240	17,43	13,84	16,09	15,79	0,016	0,032	0,041	0,030
360	16,63	12,06	13,77	14,15	0,000	0,000	0,000	0,000

Tabla 26 Resumen actividad de agua en VR 55°C Fruta Pretratada.

Actividad de agua VR 55 °C Fruta pretratada				
Tiempo	a_w 1	a_w 2	a_w 3	a_w promedio
0	0,9598	0,9584	0,9595	0,9592
60	0,9378	0,8828	0,8662	0,8956
120	0,6307	0,6522	0,6110	0,6313
180	0,5574	0,4547	0,5284	0,5135
210	0,4907	0,4618	0,5048	0,4858
240	0,4233	0,3985	0,4066	0,4095
270	0,4072	0,3856	0,3690	0,3873
300	0,2876	0,2765	0,2766	0,2802

7.2. Resumen de datos de humedad y actividad de agua para secado en túnel de aire para fruta fresca y pretratada.

Tabla 27 Resumen humedad en túnel de aire para Fruta Fresca.

Humedad en túnel de aire para Fruta Fresca								
tiempo	H1	H2	H3	H prom	Mr1	Mr2	Mr3	Mrt prom
0	88,67	89,91	88,89	89,16	1,000	1,000	1,000	1,000
20	85,61	86,76	83,94	85,44	0,961	0,960	0,937	0,953
40	81,68	84,72	78,75	81,72	0,911	0,934	0,871	0,905
60	76,78	80,71	74,12	77,20	0,849	0,883	0,812	0,848
80	70,47	75,44	69,40	71,77	0,768	0,816	0,752	0,779
100	62,29	65,92	59,27	62,49	0,664	0,695	0,623	0,661
120	51,59	54,60	51,25	52,48	0,528	0,551	0,521	0,533
150	32,02	35,49	32,40	33,30	0,279	0,308	0,281	0,289
180	20,01	23,30	19,83	21,05	0,126	0,153	0,121	0,133
240	15,92	18,82	16,06	16,93	0,074	0,096	0,073	0,081
360	10,110	11,270	10,320	10,57	0,021	0,029	0,020	0,023

Tabla 28 Resumen actividad de agua en túnel de aire para fruta fresca.

Actividad de agua en túnel de aire para Fruta Fresca				
Tiempo	a_w 1	a_w 2	a_w 3	a_w promedio
0	0,9859	0,9900	0,9825	0,9873
50	0,9597	0,9680	0,9601	0,9596
100	0,8545	0,8842	0,8493	0,8601
150	0,7266	0,7468	0,7231	0,7343
180	0,6210	0,6090	0,6525	0,6323
200	0,5733	0,5662	0,5720	0,5674
220	0,5143	0,5146	0,4894	0,5067
240	0,4435	0,4519	0,4352	0,4482
260	0,4036	0,4023	0,4194	0,4097
280	0,3789	0,3826	0,3974	0,3825

Tabla 29 Resumen humedad en túnel de aire para Fruta Pretratada.

Humedad en túnel de aire para Fruta Fresca								
tiempo	H1	H2	H3	H prom	Mr1	Mr2	Mr3	Mrt prom
0	67,43	70,16	71,02	69,54	1,000	1,000	1,000	1,000
20	56,12	60,33	64,41	60,29	0,804	0,828	0,889	0,840
40	46,21	50,18	58,26	51,55	0,632	0,651	0,690	0,658
60	38,33	40,84	52,48	43,88	0,495	0,488	0,434	0,472
80	32,16	33,75	47,04	37,65	0,388	0,364	0,313	0,355
100	27,46	28,84	42,02	32,77	0,306	0,279	0,253	0,279
120	23,71	25,30	37,29	28,76	0,241	0,217	0,190	0,216
180	17,16	19,84	25,05	20,68	0,127	0,122	0,105	0,118
240	14,43	17,34	19,00	16,93	0,080	0,078	0,070	0,076
360	12,54	15,53	14,68	14,25	0,047	0,046	0,043	0,046

Tabla 30 Resumen actividad de agua en túnel de aire para fruta pretratada.

Actividad de agua en túnel de aire para Fruta Pretratada				
Tiempo	a_w 1	a_w 2	a_w 3	a_w promedio
0	0,9500	0,9500	0,9500	0,9500
50	0,9125	0,9069	0,9191	0,9078
100	0,7379	0,7656	0,7586	0,7518
150	0,5364	0,5894	0,5610	0,5645
180	0,5392	0,5077	0,5305	0,5248
200	0,4913	0,4895	0,4378	0,4799
220	0,4520	0,4721	0,4329	0,4481
240	0,3895	0,4197	0,4070	0,3982
260	0,3846	0,3840	0,3928	0,3847

7.3. Comparación de cambios en actividad de agua para el secado en ventana refractiva para las distintas temperaturas con muestras frescas y pretratadas.

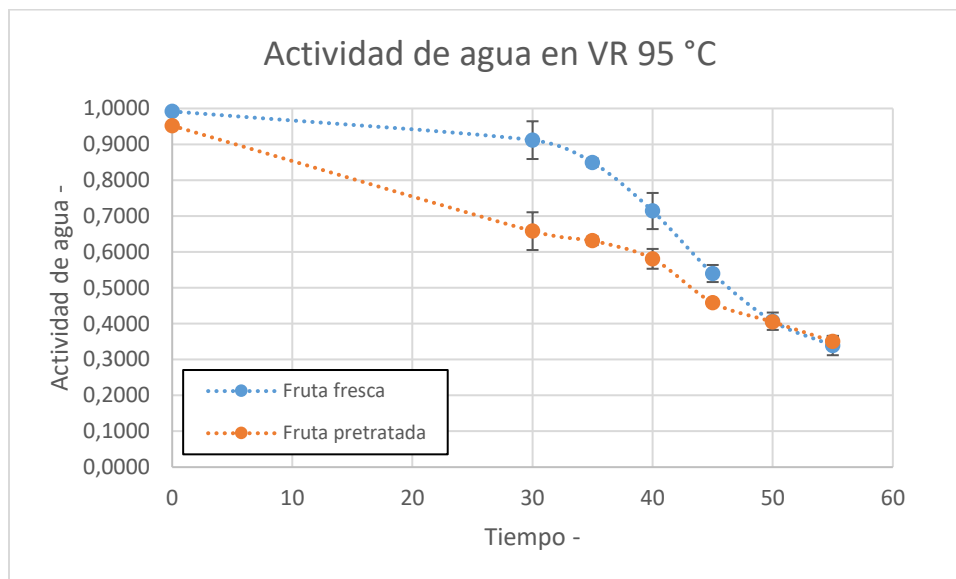


Figura 32 Comparación actividad de agua VR 95 °C para fruta fresca y pretratada.

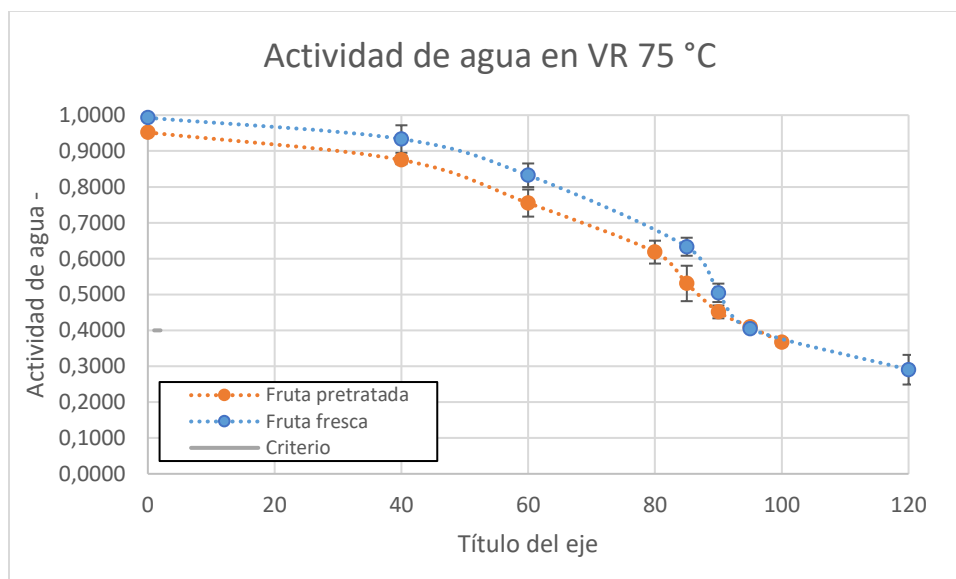


Figura 33 Comparación actividad de agua VR 75 °C para fruta fresca y pretratada.

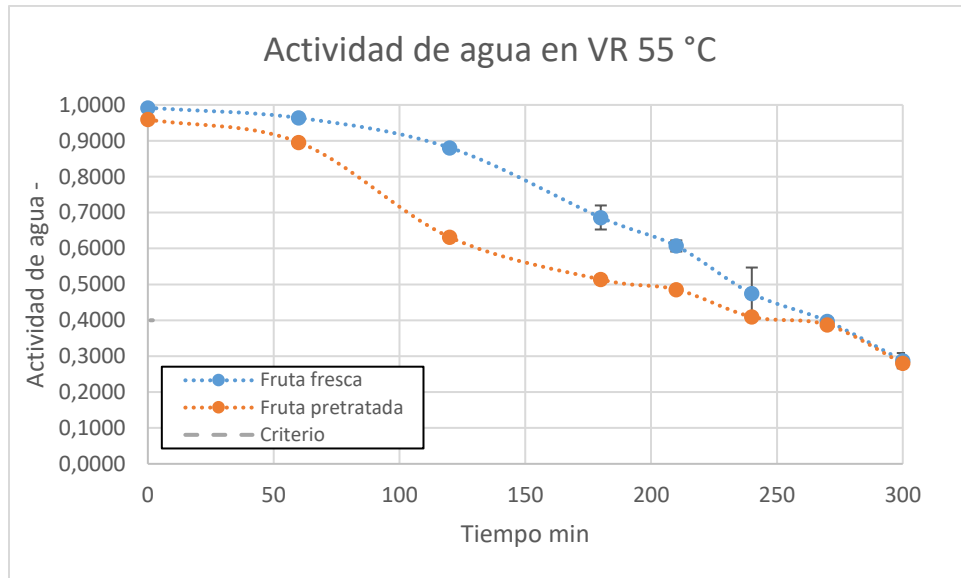


Figura 34 Comparación actividad de agua VR 55 °C para fruta fresca y pretratada.

7.4. Ajustes de cinética para segunda ley de Fick y modelo de difusión anómala

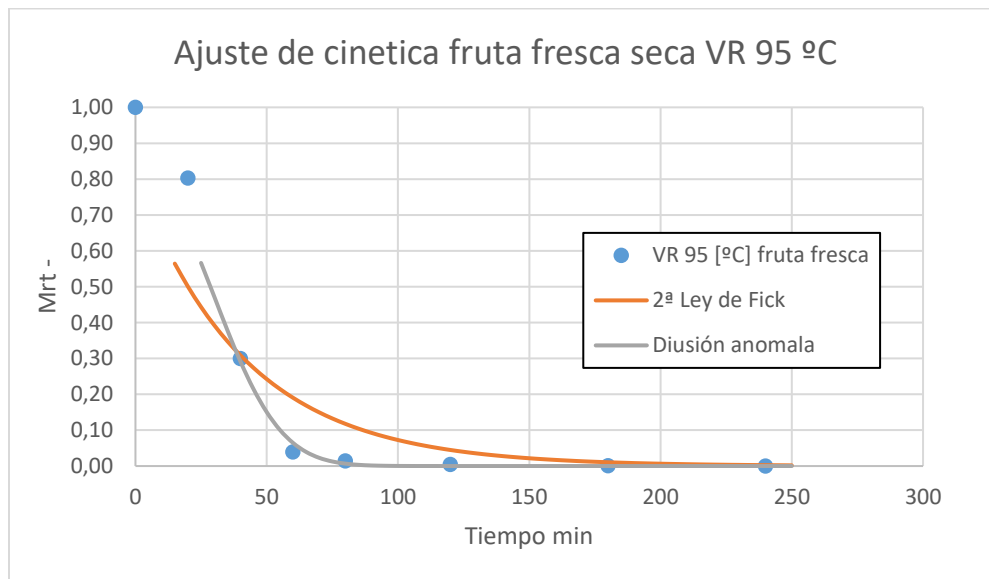


Figura 35 Ajuste de cinética fruta fresca seca VR 95 °C

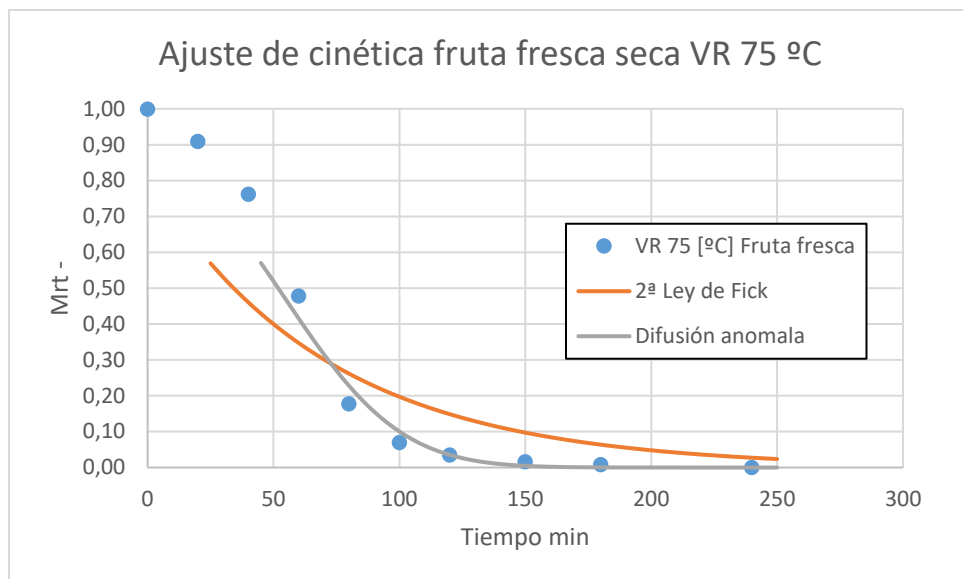


Figura 36 Ajuste de cinética fruta fresca seca VR 75 °C

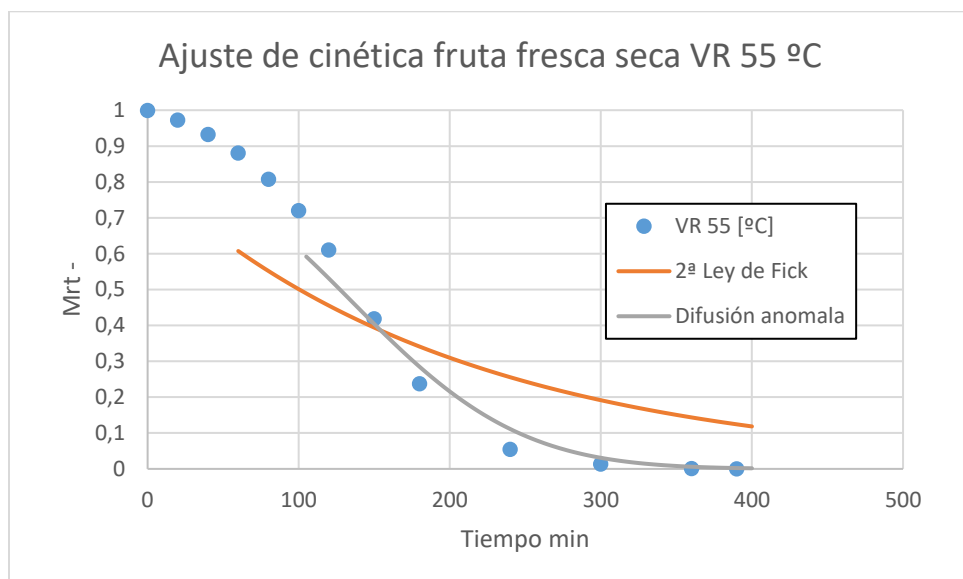


Figura 37 Ajuste de cinética fruta fresca seca VR 55 °C

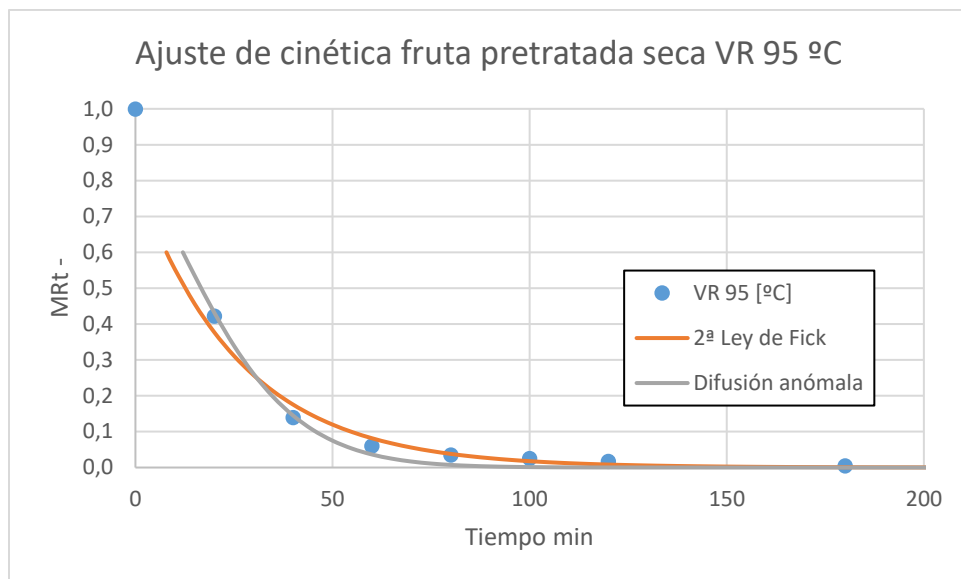


Figura 38 Ajuste de cinética fruta pretratada seca VR 95 °C

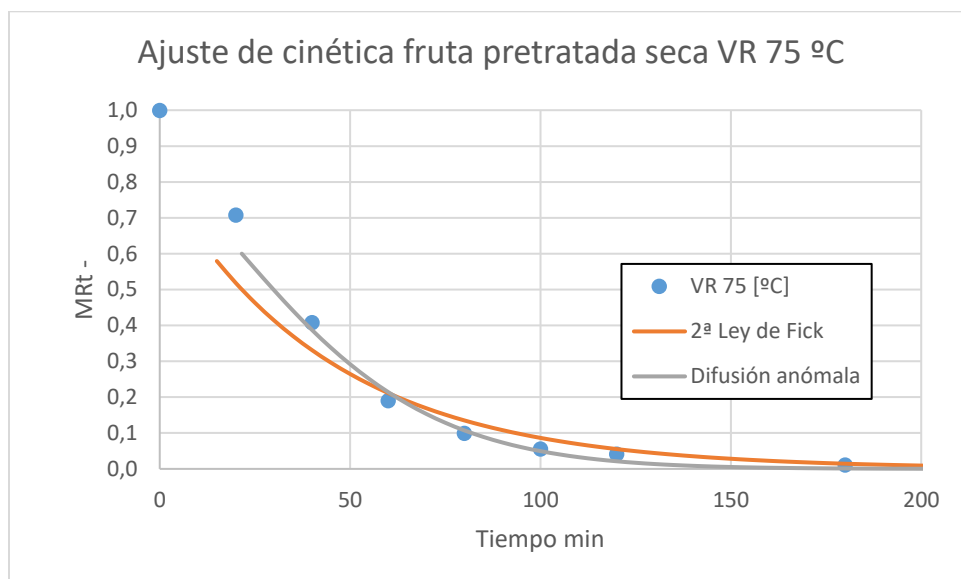


Figura 39 Ajuste de cinética fruta pretratada seca VR 75 °C

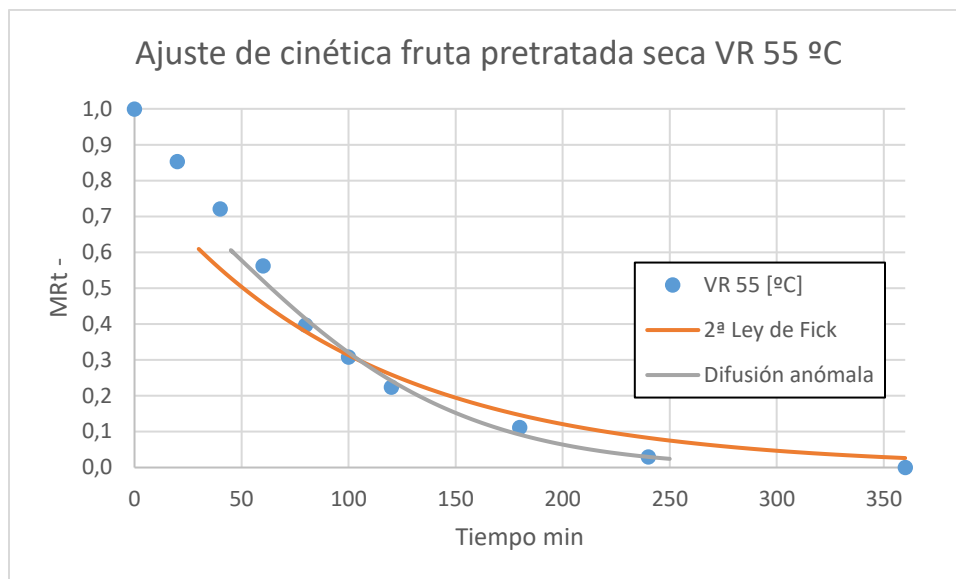


Figura 40 Ajuste de cinética fruta pretratada seca VR 55 °C

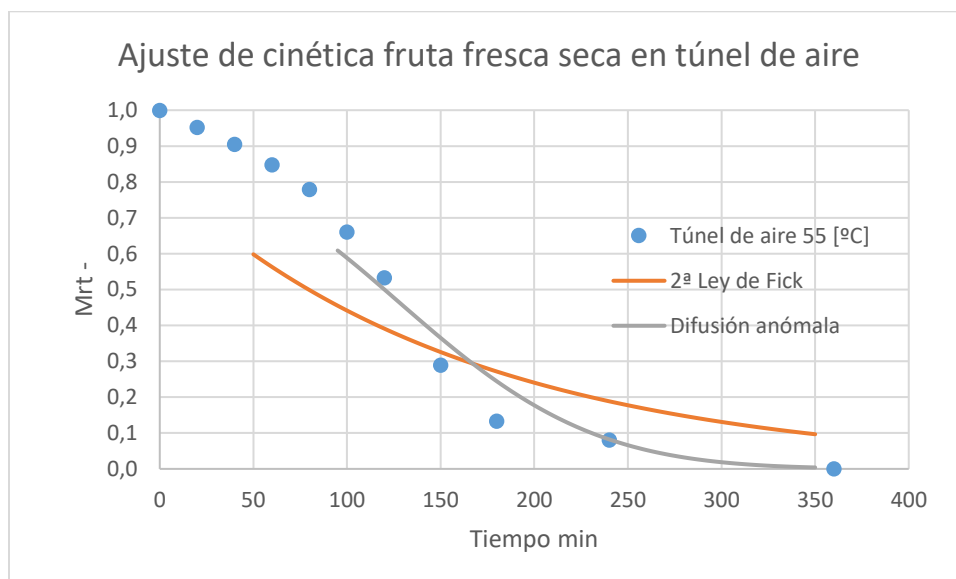


Figura 41 Ajuste de cinética fruta fresca seca en túnel de aire

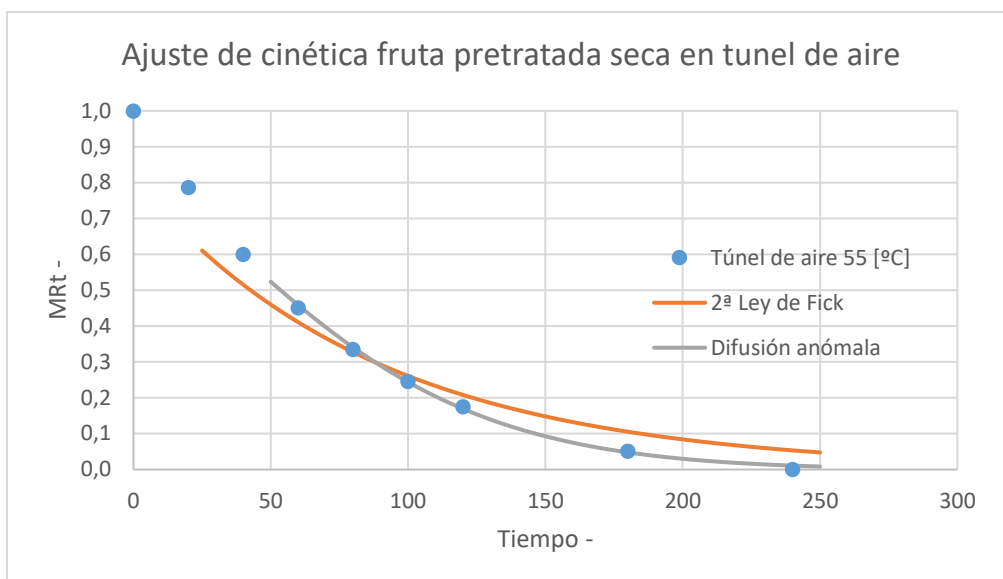


Figura 42 Ajuste de cinética fruta pretratada seca en túnel de aire