



S.E. P. TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTEPEC

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN ALIMENTOS

**EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA Y
PARÁMETROS DE CALIDAD MEDIANTE EL SECADO CON
VENTANA REFRACTIVA DEL BETABEL (*Beta vulgaris*).**

PRESENTA:

C. TORRES NIÑO MARTHA SARAHI

DIRECTOR:

DR. ERASMO HERMAN Y LARA

CODIRECTOR INTERNO:

DRA. ROSELIS CARMONA GARCÍA

CO-DIRECTOR EXTERNO

DR. JOSÉ MANUEL JUAREZ BARRIENTOS

TUXTEPEC, OAXACA

ENERO, 2022



Autorización de Presentación Electrónica de Tesis

San Juan Bautista Tuxtepec, Oax., **21/enero/2022**

No. de Oficio 0136

**C. MARTHA SARAHÍ TORRES NIÑO
EGRESADA DE LA MAESTRÍA EN CIENCIAS EN ALIMENTOS
CON NÚMERO DE CONTROL M14350031
P R E S E N T E**

POR MEDIO DE LA PRESENTE ME PERMITO COMUNICARLE QUE EL COMITÉ TUTORIAL INTEGRADO POR LOS CC. ERASMO HERMAN Y LARA, ROSELIS CARMONA GARCÍA, JOSÉ MANUEL JUÁREZ BARRIENTOS, JESÚS RODRÍGUEZ MIRANDA E IVET CALLEGOS MARÍN, REVISÓ Y APROBÓ EN SU TOTALIDAD EL TRABAJO PROFESIONAL DENOMINADO "EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA Y PARÁMETROS DE CALIDAD DEL SECADO POR VENTANA REFRACTIVA DEL BETABEL (BETA VULGARIS L.)" PRESENTADO POR USTED COMO PRODUCTO DE TESIS DE ACUERDO AL LINEAMIENTO DE TITULACIÓN CORRESPONDIENTE, PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRA EN CIENCIAS EN ALIMENTOS.

POR LO ANTERIOR Y DE ACUERDO A LOS LINEAMIENTOS INSTITUCIONALES SE LE DA TRÁMITE LEGAL PARA QUE PROCEDA A LA PRESENTACIÓN DEL TRABAJO PROFESIONAL.

ATENTAMENTE

*Excelencia en Educación Tecnológica
Ciencia y Técnica Presentes al Futuro*

**JULIÁN KURI MAR
SUBDIRECTOR ACADÉMICO**

ccp. Archivo

MHC/mdom*



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTEPEC

**SUBDIRECCIÓN
ACADÉMICA**



CARTA DE CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de Tuxtepec el día 25 de enero del 2022, la que suscribe **Martha Sarahi Torres Niño** alumna del Programa de Maestría en Ciencias en Alimentos con número de control: **M14350031**, adscrita al Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtepec, manifiesta que es autora intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del **Dr. Erasmo Herman y Lara** y cedo los derechos del trabajo titulado: **“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA Y PARÁMETROS DE CALIDAD DEL SECADO POR VENTANA REFRACTIVA® DEL BETABEL (*Beta vulgaris* L.)”**. Al Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtepec para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a los correos: sarahi_torres120417@outlook.es y erasmo_hl@hotmail.com, si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.



IBQ Martha Sarahi Torres Niño

Nombre y firma

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD Y DE NO PLAGIO

Yo, **Martha Sarahi Torres Niño** con Número de control: **M14350031**, RFC: **TONM9608227G8**, alumna de la Maestría en Ciencias en Alimentos, del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtepec, autor (a) de la Tesis titulada **“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA Y PARÁMETROS DE CALIDAD DEL SECADO POR VENTANA REFRACTIVA® DEL BETABEL (*Beta vulgaris* L.)”**.

DECLARO QUÉ:

1. El presente trabajo de investigación y tema de la tesis presentada para la obtención del Título de Maestra en en Ciencias en Alimentos es original y asignado por mi Director de tesis el **Dr. Erasmo Herman y Lara**, siendo resultado de mi trabajo experimental y escritura personal, el cual no he copiado de otro trabajo de investigación, ni utilizado ideas, fórmulas, ni citas completas, así como ilustraciones diversas, sacadas de cualquier tesis, obra, artículo, memoria, etc., (en versión digital o impresa). Caso contrario, menciono de forma clara y exacta su origen o autor, tanto en el cuerpo del texto, figuras, cuadros, tablas u otros que tengan derechos de autor.
2. Declaro que el trabajo de investigación que pongo en consideración para evaluación no ha sido presentado anteriormente para obtener algún grado académico o título, ni ha sido publicado en sitio alguno.
3. Soy consciente de que el hecho de no respetar los derechos de autor y hacer plagio, es objeto de sanciones administrativas y/o legales por parte del Instituto, por lo que asumo cualquier responsabilidad que pudiera derivarse de irregularidades en la tesis, así como de los derechos sobre la obra presentada.

Asimismo, me hago responsable ante la Institución o terceros, de cualquier irregularidad o daño que pudiera ocasionar, por el incumplimiento de lo declarado. De identificarse falsificación, plagio, fraude, o que el trabajo de investigación haya sido publicado anteriormente; asumo las consecuencias y sanciones que de mi acción se deriven, sometiéndome a la normatividad vigente del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtepec.

Tuxtepec, Oaxaca a 25 de Enero del 2022.



IBQ Martha Sarahi Torres Niño

Nombre y firma

“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA Y PARÁMETROS DE CALIDAD MEDIANTE EL SECADO CON VENTANA REFRACTIVA DEL BETABEL (*Beta vulgaris*)”.

Por:

IBQ Martha Sarahi Torres Niño

Tesis propuesta al

Instituto Tecnológico de Tuxtepec

Como requisito parcial para obtener el grado de:

Maestra en Ciencias en Alimentos

Enero, 2022

DEDICATORIA

A Dios

A mis padres Lilian y Gustavo y mi Abuelita Antonia

A mi hermano Carlos Gustavo y Cuñada Anahi

A mi compañero de vida y cómplice Roberto

A mi familia y amigos

Por su amor, comprensión y apoyo, los amo.

AGRADECIMIENTOS

A mi asesor el **Dr. Erasmo Herman Y Lara**, no hay palabras que alcancen para agradecer, el apoyo, la comprensión, el tiempo invertido, la amistad y cariño para llevar a termino este proyecto.

Al comité tutorial integrado por la **Dra. Roselis Carmona García**, **Dr. Jose Manuel Juárez Barrientos**, **Dr. Jesús Rodríguez Miranda** y a la **Dra. Ivet Gallegos Marín** por la disposición, el interés y las recomendaciones realizadas para la mejora de este proyecto de investigación.

A mi equipo de trabajo **Silviano Carlos Martinez**, **Diana Claudia Pérez José**, **Luis Fernando José de la Cruz** y **Ariana Cabrera** por su compañía, paciencia y gran apoyo para llevar a cabo en conjunto las actividades incluidas en este proyecto.

Al cuerpo académico de la **Maestría en Ciencias en Alimentos** les agradezco el apoyo brindado, la paciencia, los conocimientos impartidos, así como sus observaciones y sugerencias durante mi formación profesional.

A mi compañero y cómplice de vida **Roberto** que tuve el placer de encontrar durante este largo proceso quien estuvo a mi lado en los momentos más críticos de mi formación, por su compañía, apoyo y amor incondicional.

A **mis compañeros** y **amigos** que tuve el placer de conocer y con los que conviví, y en general a todos los que formaron parte de este logro, muchísimas gracias.

Y al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)** por haber financiado los estudios de Maestría en Ciencias en Alimentos en esta Institución.

RESUMEN

Torres Niño, Martha Sarahi. M. en C. en A. Instituto Tecnológico de Tuxtepec, diciembre del 2021. "Evaluación de la eficiencia energética y parámetros de calidad del secado por ventana refractiva® del betabel (*Beta vulgaris* L.)". Director: Dr. Erasmo Herman y Lara, codirectora interna: Dra. Roselis Carmona García, codirector externo: Dr. José Manuel Juárez Barrientos.

El secado por Ventana Refractiva™ (RW™ por sus siglas en inglés) se caracteriza por emplear tiempos cortos de exposición, obtención de productos secos con mayor retención de los parámetros de calidad y bajo costo. Sin embargo, existe escasa información que demuestre la eficiencia energética del secado por RW™. Para observar el efecto que tiene este secado sobre la calidad de un alimento y poder medir su eficiencia energética podría ser adecuado el empleo de alimentos en diferentes estados físicos (sólidos, semisólidos y líquidos). Por lo que, el objetivo fue evaluar la eficiencia energética del secador por RW™ y su efecto sobre las características físicas y químicas del betabel en dos estados físicos. Se utilizó betabel en estado sólido como rodajas de 1 mm de espesor y 30 mm de diámetro y en estado semisólido tipo puré. El secador RW™ fue caracterizado y operado junto con el secador de charolas a una temperatura de 70 °C en la superficie del alimento. El tiempo de secado fue calculado mediante cinéticas en ambos secadores en los dos estados físicos del betabel determinándose el contenido de humedad (CH) al inicio y al final del proceso de secado, posteriormente se realizaron los análisis físicos de actividad de agua (Aw) y color (L^* , C^* , h° y ΔE) y los análisis químicos de contenido de polifenoles totales (CPT), contenido de flavonoides totales (CFT), así como actividad antioxidante (AA) por DPPH⁺ y ABTS⁺. Finalmente, se calculó la eficiencia energética general (EE_g) del secador RW™. Las muestras secadas RW™ obtuvieron tiempos de secado de 40 y 30 min, contenidos de humedad de 0.09 y 0.07 g de agua/g sólidos secos y Aw de 0.19 y 0.18 para el betabel en rodajas y en estado semisólido respectivamente. Las muestras de betabel secadas en estado

semisólido con la tecnología RW™ lograron retener las características de color teniendo valores de $L^* = 25.46$, $C^* = 1.90$, $^{\circ}h = 16.80$ y $\Delta E = 0.91$ no presentando diferencia estadística significativa ($p > 0.05$) con el betabel en estado fresco. En el análisis de CPT las muestras secadas por RW™ lograron retener estos compuestos en comparación con el fresco no presentando diferencias estadísticas significativas obteniéndose valores de 278.02 y 275.67 mg EAG/g de extracto de betabel en estado semisólido y rodajas respectivamente, en cuanto al CFT se obtuvo la misma tendencia obteniéndose valores de 158.00 y 157.00 mg EC/g de extracto para muestras de betabel en estado semisólido y rodajas respectivamente. En el análisis de la AA por DPPH⁺ y ABTS⁺ se obtuvo un mayor % de inhibición del radical en las muestras de betabel secadas por RW™ en estado semisólido obteniéndose valores de 21.14% y 32.61% respectivamente, no presentándose diferencias estadísticas significativas con respecto al fresco. La EE_g fue más alta al secar el betabel en ambos estados físicos en el secador RW™ en comparación con el secador por charolas, obteniendo un valor máximo de 39.02% cuando se secó el betabel en estado semisólido. Con los resultados obtenidos se concluyó que el secador RW™ presentó una mayor eficiencia energética y retención de parámetros de calidad en el producto seco en comparación con el secado por charolas.

ABSTRACT

Torres Niño, Martha Sarahi. M. en C. en A. Instituto Tecnológico de Tuxtepec, December of 2021. "Evaluation of energy efficiency and quality parameters of refractive WindowTM of beet (*Beta vulgaris* L.)". Director: Dr. Erasmo Herman y Lara, intern co-director: Dra. Roselis Carmona García, external co-director: Dr. José Manuel Juaréz Barrientos.

The drying by Refractive Window (RWTM) is known for employing short times of exposure, obtaining dried objects with better retention of quality parameters and low costs. However, there's a lack of information that proves the energetic efficiency of drying by RWTM. To observe the effect that it has this drying on the quality of a food and being able to measure its energetic efficiency it could be appropriate the employment of foods in different forms (solid, half-solid and liquid). So, the objective was to evaluate the energetic efficiency of drying by RWTM and its effect on the physical and chemical properties of beetroot in two different physical states. A solid beetroot was used in slices of 1mm depth and a 30 mm diameter, it was also used another beetroot in half-solid state (puree). The RWTM drier was distinguished and operated alongside with the tray dryer at a 70°C temperature on the food surface. The drying time was calculated through the kinetics in both dryers in both physical states of the beetroot determining the humidity content (HC) in the beginning and the end of the drying process, afterwards the physical tests of Water Activity (WA) and color were made. There were also made the chemical analysis of total polyphenols content (TPC), Total flavonoids content (TFC), and antioxidant activity (AA) by DPPH+ and ABTS+. Finally the general energetic efficiency of the RWTM was calculated. The samples dried by the RWTM obtained drying time of 40 and 30 minutes, containing a humidity of 0.09 and 0.07g of water/g and WA of 0.19 and 0.18 for the beetroot in slices and in half-solid states respectively. The samples of the beetroot dried in half-solid state with the RWTM technology achieved to maintain the color obtaining the values of $L^* = 25.46$, $C^* = 1.90$, $h^\circ = 16.80$ y $\Delta E = 0.91$ presenting no significant statistical difference ($p > 0.05$) with fresh beetroot. In the CPT analysis the samples dried by RWTM achieved to keep this composites in comparison to the

fresh ones, not presenting significant statistical changes, obtaining values of 275.67mg EAG/g of beetroot extract in half solid state and slice respectively, as for the CFT, the same tendency was obtained, getting values of 158.00 and 157.00mg EC/g of extract for beetroot samples in half solid state and slices respectively. In the AA by DPPH⁺ and ABTS⁺ Analysis were obtained a bigger % of The radical inhibition in the beetroot samples dried by the RWTM in half-solid states obtaining values of 21.14% and 32.61% respectively, not showing significant statistical differences respect the fresh one. The EE_g was higher by drying the beetroot in the two physical states on the RWTM in comparison with the tray drier, obtaining a max value of 39.02% when the beetroot was dried in half solid state. With the obtained results, it was concluded that the RWTM drier presented a bigger energetic efficiency and bigger retention of quality parameters in the product comparing it with the tray drier.

CONTENIDO

Pág.

RESUMEN.....	viii
ABSTRACT.....	x
CONTENIDO	xii
LISTA DE TABLAS.....	xiv
LISTA DE FIGURAS.....	xv
I. INTRODUCCIÓN.....	2
II. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1 SECADO.....	5
2.1.1 MECANISMO DE SECADO.....	5
2.1.2 TÉCNICAS DE SECADO.....	6
2.2 SECADO POR VENTANA REFRACTIVA®.....	8
2.2.1 MECANISMO DE SECADO EN EL SECADOR RW™.....	9
2.2.2 APLICACIONES DEL SECADOR RW™.....	11
2.3 EFICIENCIA ENERGÉTICA.....	14
2.3.1 ENERGÍA INSTANTÁNEA, ACUMULATIVA E ÍNDICES DE SECADO.....	15
2.4 BETABEL.....	17
2.4.1 GENERALIDADES.....	17
2.4.2 CARACTERÍSTICAS NUTRICIONALES Y FISICOQUÍMICAS.....	17
2.5 CARACTERÍSTICAS DEL ALIMENTO.....	21
2.5.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS.....	21
2.5.2 CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS.....	23
2.6.3 ACTIVIDAD DE AGUA (A _w).....	28
2.5 ANTECEDENTES.....	30
2.6 JUSTIFICACIÓN.....	33
2.7 OBJETIVOS.....	34
2.7.1 OBJETIVO GENERAL.....	34
2.7.2 Objetivos específicos.....	34
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	37
3.1 CARACTERIZACIÓN DE UN EQUIPO DE SECADO POR RW™ ELABORADO EN EL INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTEPEC.....	37
3.2 PREPARACIÓN DE LA MUESTRA.....	38
3.3 SECADO POR RW™ Y SECADO EN CHAROLAS.....	38

3.4 DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DEL BETABEL EN DIFERENTES ESTADOS FÍSICOS.....	39
3.5 DETERMINACIÓN DE LA ACTIVIDAD DE AGUA (A_w).	40
3.7 DETERMINACIÓN LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS.....	40
3.7.1 DETERMINACIÓN DE COLOR.....	40
3.6.2 DETERMINACIÓN DE POLIFENOLES TOTALES Y ACTIVIDAD ANTIOXIDANTE.....	41
3.7 CÁLCULO DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DEL SECADOR POR RW™ Y SECADOR POR CHAROLAS.....	45
3.8 ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	45
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.	47
4.1 CARACTERIZACIÓN DE UN EQUIPO DE SECADO POR RW™ ELABORADO EN EL INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTEPEC (ITTux).....	47
4.2 CINÉTICAS DE SECADO.....	48
4.3 CONTENIDO DE HUMEDAD Y ACTIVIDAD DE AGUA	50
4.4 COLOR.....	51
4.5 CONTENIDO DE POLIFENOLES Y FLAVONOIDES TOTALES	55
4.6 DETERMINACIÓN DE LA ACTIVIDAD ANTIOXIDANTE.....	57
4.6.1 METODO DE DPPH ⁺	57
4.6.2 METODO ABTS ⁺	58
4.7 CÁLCULO DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DEL SECADOR POR RW™ Y SECADOR CONVECTIVO.....	61
V. CONCLUSIONES.	65
VI. REFERENCIAS.	68

LISTA DE TABLAS.

Tabla No.	Descripción	Pág.
1	Composición proximal de 100 g de betabel fresco.	18
2	Composición fitoquímica del betabel.	20
3	Ensayos in vitro de la capacidad antioxidante.	26
4	Tiempo de secado, contenido de humedad y actividad de agua del betabel secado en dos estados físicos mediante la técnica de secado por RW TM y secado por charolas.	50
5	Parámetros de color del betabel secado en rodajas mediante la técnica de secado por RW TM y secado por charolas.	52
6	Contenido de polifenoles totales (CPT) y contenido de flavonoides totales (CFT) del betabel en dos estados físicos diferentes.	55
7	Humedad removida y tiempo de secado obtenidos por el secador RW TM y charolas del betabel en sus dos estados físicos.	61
8	Tasa de evaporación, Energía de evaporación y Eficiencia energética general para el secador por RW TM y charolas.	62

LISTA DE FIGURAS.

Figura No.	Descripción	Pág.
1	Mecanismo de transferencia de calor del baño de agua caliente al producto alimenticio en el secador RW™ (Ortiz- Jerez et al., 2015).	11
2	ABTS y su producto de oxidación de un electrón, ABTS ^{•+}	27
3	Reacción química entre el radical DPPH [•] y la especie antioxidante.	28
4	Secador por RW™ continuo	37
5	a) Betabel en estado sólido, rodajas y b) betabel en estado semisólido.	38
6	Secado del betabel a) en rodajas y b) semisólido por RW™.	39
7	Aqualab 3TE, EUA	40
8	Colorímetro UltraScan Vis	41
9	Espectrofotómetro Cary 60 UV Vis.	43
10	Cinética de secado por RW™ para el betabel en dos estados físicos rodajas y semisólido a 70 °C.	49
11	Cinética de secado por charolas para el betabel en dos estados físicos rodajas y semisólido a 70 °C.	49
12	Actividad antioxidante por el método DPPH [•] del betabel secado en dos estados físicos diferentes. (FR: fresco, RW™ ROD: Secado RW™ del betabel en rodajas, RW™ SS: Secado RW™ del betabel en semisólido, CH ROD: Secado en charolas del betabel en rodajas, CH SS: Secado en charolas del betabel en semisólido).	58

13	Actividad antioxidante por el método ABTS ⁺ del betabel secado en dos estados físicos diferentes. (FR: fresco, RW TM ROD: Secado RW TM del betabel en rodajas, RW TM SS: Secado RW TM del betabel en semisólido, CH ROD: Secado en charolas del betabel en rodajas, CH SS: Secado en charolas del betabel en semisólido).	59
----	--	----

INTRODUCCIÓN

I. INTRODUCCIÓN.

El secado es una de las operaciones unitarias más importantes y cuya finalidad es reducir el contenido de humedad en los alimentos, tiene una amplia aplicación en la industria alimentaria al formar parte del proceso de elaboración de una gran variedad de productos alimenticios presentes en el mercado. Esta ayuda a prolongar la vida de anaquel, así como la disminución de los costos de transporte y almacenamiento, también ayuda a prevenir la contaminación microbiana y otras reacciones químicas perjudiciales como el oscurecimiento enzimático. Para llevar a cabo esta operación unitaria en la industria alimentaria se utilizan secadores tradicionales los cuales emplean un gran porcentaje de energía de la empresa, presentando una eficiencia energética baja y generando un elevado costo de producción, además de que la energía utilizada es desperdiciada en forma de gases de escape calientes dando la formación de altas emisiones de gases de efecto invernadero, a su vez se someten a los alimentos a tiempos prolongados de secado y una exposición a temperaturas elevadas provocando la pérdida de parámetros de calidad como las propiedades físicas, químicas, nutricionales y funcionales. Hoy en día, existen alternativas emergentes que se caracterizan principalmente por llevar a cabo un proceso más rápido y efectivo, tal es el caso del secado por Ventana Refractiva™ (RW™ por sus siglas en inglés Refractance Windows™) el cual, utiliza un baño de agua caliente como mecanismo de transferencia de calor al alimento, el cual es colocado sobre una película plástica de Mylar que utiliza el principio de refracción del agua para transmitir la energía térmica por radiación infrarroja principalmente. Este secador se caracteriza por emplear temperaturas bajas en el producto, tiempos cortos de exposición, obtención de productos secos de mejor calidad al final del proceso, y se considera un proceso de bajo costo energético siendo considerado un secador versátil con potencial para el procesamiento de productos alimenticios de diferentes características. Sin embargo, existe poca información que demuestre la eficiencia energética que presenta el secado por RW™ en alimentos. Por tal motivo, en este trabajo se propuso evaluar la eficiencia

energética del secado por RWTM utilizando el betabel como alimento modelo en dos estados físicos: sólido y semisólido, de tal manera que permitiera medir algunos cambios en los parámetros de calidad como el color, contenido de polifenoles y flavonoides totales, así como la actividad antioxidante y la actividad de agua.

MARCO TEÓRICO

II. MARCO TEÓRICO.

Las frutas y verduras frescas constituyen una fuente muy importante de muchas sustancias nutritivas esenciales y valiosas, como vitaminas, minerales, fibras dietéticas, polisacáridos, proteínas y antioxidantes. Desafortunadamente, los bioproductos postcosecha son muy inestables y deben consumirse o procesarse lo antes posible. Debido a que el contenido de humedad generalmente superior al 80% y la actividad del agua elevada favorecen el desarrollo de microorganismos que son responsables de los procesos de descomposición. Por esta razón, las frutas y hortalizas frescas se someten a un secado para prolongar su vida útil y, por lo tanto, permitir un almacenamiento a largo plazo y facilitar su transporte (Kowalski y Mierzwa, 2013).

2.1 SECADO.

El secado es una de las operaciones unitarias más importantes en la manufactura de los alimentos, principalmente dirigida a su conservación y cuyo objetivo es, reducir la cantidad de humedad en la matriz alimentaria a niveles que ralentizarán o inhibirán la actividad microbiana y enzimática, así como también el deterioro asociado con la calidad del producto. En términos básicos, el proceso de secado involucra la eliminación de agua de un material alimenticio húmedo induciendo cambios de fase del agua de sólido a líquido o a una fase de vapor mediante la aplicación de calor, a excepción de la deshidratación osmótica durante la cual el agua se elimina sin cambio de fase (Sabarez, 2015).

2.1.1 MECANISMO DE SECADO.

El secado de alimentos no se limita a la selección del secador, es necesario comprender los conceptos fisicoquímicos asociados con el secado de alimentos para una evaluación adecuada de los fenómenos de secado en cualquier producto alimenticio. La actividad del agua, la temperatura de transición vítrea, los mecanismos y teorías de deshidratación y los cambios químicos y físicos deben

reconocerse como elementos clave para cualquier operación de secado de alimentos (Vega-Mercado et al., 2001).

El proceso de secado de los alimentos es extremadamente complejo, involucra mecanismos transitorios acoplados de procesos de transferencia de calor, masa y momento acompañados de transformaciones físicas, químicas y de cambio de fase (Sabarez, 2012). Al secar los alimentos, se producen simultáneamente dos mecanismos de transporte distintos, que comprenden la transferencia de calor desde el medio de secado o fuente de calor al material alimenticio y el transporte de agua desde el interior del producto sólido hasta su superficie, desde donde el agua se transporta incluso hasta el final por un gas portador o por la aplicación de vacío para secadores no convectivos (Sabarez, 2015).

2.1.2 TÉCNICAS DE SECADO.

La eliminación de agua de los materiales alimenticios durante el secado se puede lograr de diferentes maneras, y esta variedad de métodos ha dado lugar a muchas técnicas de secado (Mujumdar y Wu, 2010). La selección del método de secado para un producto alimenticio en particular es un paso importante debido a que la técnica de secado y las condiciones de operación afectan la calidad del producto a secar, así como su costo. Esta selección depende de varios factores, incluido el tipo de alimento, la cantidad de humedad, la cinética de secado, la sensibilidad al calor, la estructura física del material a secar, los requisitos de calidad de un alimento seco y muchos otros factores (Jangam, 2011; Sabarez, 2015).

La tecnología de secado ha ido evolucionando desde el simple uso de energía solar a la tecnología actual que incluye una variedad de sistemas de secado, cada uno con sus propias ventajas y desventajas teniendo por ende aplicaciones particulares. Los secadores se clasifican comúnmente en función del modo de transferencia de calor, por ejemplo, convección, conducción, radiación o una combinación de los mismos (Sabarez, 2015). Sin embargo, autores como Vega-Mercado et al. (2001) clasificaron las tecnologías de secado en cuatro generaciones de acuerdo a sus

características y avances técnicos que estos presentan como se describe a continuación:

La primera generación incluye a los secadores de charolas y tipo armario, tales como secado en horno, secado en charolas, cinta rotatoria y túnel, donde el aire caliente fluye a través de un área extensa del producto para eliminar el agua de la superficie. Los secadores de esta categoría son principalmente adecuados para materiales sólidos como cereales, frutas y verduras en rodajas o productos en trozos. La configuración básica de este tipo de secadores comprende un alimentador, un calentador y un colector.

La segunda generación comprende a los secadores por aspersion y tambor, los cuales están destinados a secar suspensiones y purés de alimentos para convertirlos en polvo, aglomerados o escamas. En esta clasificación también se encuentran el secado por lecho fluidizado, en el cual se pueden secar piezas de alimentos de gran tamaño y granos.

En la tercera generación se incluyen los métodos de liofilización, secado al alto vacío y la deshidratación osmótica. La deshidratación osmótica y la liofilización son incluidos en la misma generación debido a que eliminan el agua a baja temperatura, siendo empleados en la industria de alimentos para mantener la estructura y superar los deterioros de calidad en la deshidratación de frutas tropicales (Marqués et al., 2009).

Por último, en la cuarta generación se encuentran los últimos desarrollos tecnológicos, diferentes patentes de procesos de secado con mayor capacidad, mejor calidad y control del producto, además con una reducción del impacto ambiental, operaciones más seguras, mayor eficacia y menor costo de inversión y funcionamiento. Cada una de estas tecnologías tiene una aplicación específica, basada en los atributos de calidad final de los productos previstos, así como las características físico-químicas de las materias primas que se procesan. Dentro de esta clasificación se encuentran el secado por microondas y radiofrecuencia, así como alternativas emergentes de secado como el secado por ventana refractiva (Nindo et al., 2007).

En el secado de materiales alimenticios, sigue existiendo un gran desafío para eliminar el agua del material de la manera más eficiente, con un mejor control de la calidad del producto, un impacto mínimo en el medio ambiente, los costos de capital y operativos más bajos del proceso (Sabarez, 2015). Otro desafío surge del hecho de que muchos materiales alimenticios con propiedades físicas o químicas muy diversas deben secarse a diferentes escalas de producción y con especificaciones de calidad de producto muy diferentes (Mujumdar y Wu, 2010; Sabarez, 2015), es por ello que cobran gran importancia las nuevas tecnologías de secado enfocadas en la retención de estos atributos de calidad en productos alimenticios, tal es el caso del secado por ventana refractiva.

2.2 SECADO POR VENTANA REFRACTIVA®.

El sistema de secado por ventana refractiva o RW™ por sus siglas en inglés Refractance Window™, es un método de secado novedoso que fue patentado por Magoon en 1986 y desarrollado por MCD Technologies, Inc., Tacoma, Washington, EE. UU. (Ochoa-Martínez et al., 2012; Gamboa et al., 2014), para ser aplicado en materiales líquidos y pastosos y convertirlos en hojuelas y gránulos (Abonyi et al., 2002). La tecnología de RW™ usa agua caliente a presión atmosférica normal como medio de transmisión de energía térmica al material a secar (Nindo et al., 2004; Topuz et al., 2011). En este método de secado, la energía térmica es generada a partir de la circulación de agua caliente que transmite el calor a través de una película polimérica que evapora el agua de un producto alimenticio y que fluye simultáneamente en la superficie superior del plástico (Nindo y Tang, 2007; Abul-Fadl y Ghanem, 2011; Capariño et al., 2012). Esta película polimérica tiene propiedades únicas para facilitar la transferencia de calor entre el medio de calentamiento y los alimentos líquidos (Nindo et al., 2004). La película corre poniéndose en contacto con el agua caliente, lo que permite un proceso de secado mucho más rápido. Luego, el producto seco es recogido utilizando una lámina que cubre el ancho de la cinta transportadora (Nindo y Tang, 2007).

La tecnología de secado RW™ utiliza el principio de refracción de la superficie del agua, que se aprovecha creando una ventana para el paso de la energía infrarroja.

En esta tecnología, los tres modos de transferencia de calor ocurren entre el medio de secado (agua) y el material a secar (Sabarez, 2015). La tecnología es relativamente económica y el equipo es simple de operar y mantener (Abonyi et al., 1999). Nindo y Tang (2007) describen el método de RWTM como el secado basado en el principio de transferencia de calor por radiación infrarroja a través de una película refractiva en la cual se coloca una capa fina del producto a deshidratar sobre una película de poliéster transparente, que a su vez está en contacto, por la otra cara, con el líquido calefactor generalmente agua. El calor transferido por radiación es absorbido por el producto, generando la evaporación rápida del agua. A diferencia de otros secadores, el equipo desarrollado en este método no presenta contacto directo entre el producto y el medio de transferencia de calor evitando la contaminación cruzada.

La tecnología de secado RWTM es un método de secado adecuado para producir productos secos a partir de alimentos líquidos y semilíquidos (Bolland, 2000; Sabarez, 2015; Tontul y Topuz, 2017; Tontul et al., 2018), sin embargo, esta técnica también puede ser utilizada para secar rodajas de frutas y verduras (Gamboa et al., 2014; Topuz et al., 2009).

2.2.1 MECANISMO DE SECADO EN EL SECADOR RWTM.

El secado por RWTM utiliza agua para transmitir calor al producto que se está secando, la cual generalmente se encuentra a unos pocos grados por debajo del punto de ebullición en un intervalo de 95 a 97 °C (Abonyi et al., 2002; Nindo et al., 2006; Kaspar et al., 2012; Caparino et al., 2012; Baeghballi et al., 2016) manteniéndose a ese nivel para evitar la formación de burbujas que disminuyan la transferencia de calor al alimento. Los productos en puré o espesos se aplican uniformemente a la superficie de una cinta transportadora de plástico que se mueve sobre el agua en circulación en un canal poco profundo (Barbosa-Cárnovas y Uliano, 2004).

Nindo et al. (2007) mencionan que la lámina de plástico hecha de Mylar (DuPont Polyester Film Enterprise, Wilmington, DE) permite la transmisión de energía

infrarroja con longitudes de onda que coinciden con los espectros de absorción de moléculas de agua en alimentos líquidos. Esta transmisión infrarroja es importante porque permite una rápida evaporación a baja temperatura y compensa con creces la baja conductividad térmica del plástico (0.155 W/km frente a los 15 W/km del acero inoxidable). Mylar™ (Dupont Teijin Films) es un tereftalato de polietileno (PET) y es el material plástico que se usa típicamente para el secado RW™. La cantidad de energía conducida e irradiada varía con el tipo y grosor de la hoja de plástico que se utiliza. Asimismo, la absorbancia del alimento depende de su espesor y contenido de humedad (Ratti y Mujumdar, 1995; Ortiz-Jerez et al., 2015).

Nindo et al., 2006 mencionan que el uso de agua caliente como medio de transferencia de calor y a temperaturas justo por debajo de la ebullición es exclusivo del sistema de secado RW™. Para un secado RW™ efectivo, es importante tener purés o extractos de jugo con la consistencia adecuada para facilitar la aplicación uniforme en la cinta transportadora. Abonyi et al. (2002) y Nindo et al. (2003a) han proporcionado información más detallada sobre el desempeño de este sistema. En esta tecnología de secado se presentan los tres modos de transferencia de calor de acuerdo con la Figura 1 por conducción, a través de la película plástica al producto, por convección, entre el agua y la película plástica y entre el producto y el aire y por radiación, a través de la película al producto (Ortiz-Jerez et al., 2015). El calor latente del vapor que se condensa en el agua se transfiere por convección a la superficie inferior de la lámina de plástico. Dado que la lámina de plástico es muy delgada, casi inmediatamente se equilibra con la temperatura del agua que fluye debajo de ella. La lámina de plástico transmite la energía neta que le llega del agua caliente por conducción y radiación. Las proporciones de energía conducida o radiada dependen de las resistencias relativas proporcionadas por el plástico a estos dos modos de transferencia de calor. El pequeño grosor del transportador de plástico Mylar™ (DuPont Plastics, Wilmington DE) junto con su alta transparencia a la radiación infrarroja permite que la mayor parte de la radiación se transmita al producto líquido.



Figura 1. Mecanismo de transferencia de calor del baño de agua caliente al producto alimenticio en el secador RW™ (Ortiz- Jerez et al., 2015).

Cuando el alimento húmedo es colocado en la película, se crea una ventana que deja pasar la radiación térmica del agua caliente en toda la superficie donde el material húmedo está colocado, dicha ventana se cierra gradualmente a medida que el material se seca, cortando la radiación térmica y evitando que la muestra alcance la temperatura del baño (Ortiz-Jerez et al., 2015). Esta transferencia de calor reducida en la etapa final del secado ayuda a prevenir la degradación de la calidad del producto (Topuz et al., 2011). Cuando el producto alcanza niveles de humedad más bajos, la energía infrarroja se refractará de tal manera que la cantidad de calor transmitido a través del transportador será mínima. En este punto, se puede evitar la aplicación excesiva de calor en el producto y se puede reciclar el calor. La minimización del calor proporcionará alimentos secos con mayor retención de nutrientes y sabores, y con una mejor retención del color (Barbosa-Cárnovas y Uliano, 2004). Normalmente las temperaturas reales del producto promedian los 70 °C durante el procesamiento y el costo de equipo y energía es menor en comparación con la liofilización (Kaspar et al., 2012, Ochoa-Martínez et al., 2012; Baeghbali et al., 2016).

2.2.2 APLICACIONES DEL SECADOR RW™.

El secado por RW™ ha sido utilizado para la obtención de productos farmacéuticos, nutracéuticos y pigmentos para cosméticos (Ortiz-Jerez et al., 2015) y a diferencia

de otros secadores, este equipo de secado no presenta contacto directo entre el producto y el medio de transferencia de calor evitando la contaminación cruzada (Nindo et al, 2007), además la superficie de la película solo necesita limpiarse al final del proceso o cuando un producto diferente sea procesado (Nindo et al., 2004). Muchos estudios se han realizado empleando el secador RW™, por ejemplo, al evaluar el contenido de carotenoides, ácido ascórbico y el color en el puré de fresa y zanahoria (Abonyi et al., 1999), así como la reducción microbiana en calabazas (Nindo et al., 2003a); al evaluar el color y la actividad antioxidante del puré de espárragos (Nindo et al., 2003b) y aloe (Nindo et al., 2006); se ha utilizado al estudiar el flavor, color, carotenoides, capsaicinoides del puré de pimentón (Topuz et al., 2011); así como para el estudio de los sabores encapsulados del aceite de naranja (Cadwallader et al., 2010); el estudio de los compuestos antioxidantes del puré de tomate (Abul-Fadl y Ghanem, 2011); estudio de los compuestos bioactivos de rodajas de papa (Kaspar et al., 2012); la retención del color, el contenido de polifenoles totales y la actividad antioxidante de la zanahorias (Hernández-Santos et al., 2016); el contenido total de antocianinas, la actividad antioxidante y el contenido de polifenoles totales del jugo de granada (Baeghbali et al., 2016); se ha evaluado la influencia que tiene el secado en las propiedades de calidad de rodajas de kiwi (Azizi et al., 2017).

Por otro lado, dentro de los aspectos físicos que han sido evaluados se incluye la evaluación de la eficiencia energética (Abonyi et al., 1999; Nindo et al., 2003a, 2004; Nindo et al., 2006; Abul-Fadl y Ghanem, 2011, Baeghbali et al., 2016), las propiedades de sorción de humedad tales como la rehidratación del jugo de tomate seco (Abul-Fadl y Ghanem, 2011) y el jugo de mango (Caparino et al., 2012), así como el contenido de humedad, solubilidad, rendimiento, densidad aparente del jugo de granada (Baeghbali et al., 2016), el contenido de humedad, el volumen y el coeficiente de difusión del agua en muestras de pure de papaya (Ocoro y Ayala, 2012); la actividad de agua del aloe (Nindo et al., 2006); la difusividad efectiva y el encogimiento de rodajas de mango (Ochoa-Martínez et al., 2012); así como la difusividad efectiva durante el secado de rebanadas de fruto de árbol del pan (Tirado

et al., 2016) isotermas del jugo de acai (Pavan et al., 2012) y análisis de la microestructura del tomate (Capariño et al., 2012); encontrándose que la retención de color, aroma, vitaminas y antioxidantes pueden ser mejoradas en este proceso de secado y la calidad final del producto puede ser comparable o en algunos casos mejor que la liofilización.

Así mismo, se ha utilizado para encontrar las condiciones ideales para obtener una harina de lúcuma conforme a los requerimientos estándar (Gamboa et al., 2014); se ha aplicado para obtener tomate en polvo evaluando la velocidad del secado y algunas propiedades fisicoquímicas (Castoldi et al., 2015) también se ha utilizado para investigar la influencia de la temperatura de secado, el origen de radiación infrarroja y el espesor de la capa de pulpa en las tasas de secado de mango (Zotarelli et al., 2015); así como para evaluar la estabilidad de un cultivo probiótico LactoSpore® en pulpa de tomate de árbol (*Solanum betaceum*) variedad amarillo común, secado por ventana refractiva (Cardona y Diez, 2020); se ha utilizado para secar salmón, carne de res y manzana evaluando la difusividad efectiva, así como el tiempo de procesamiento y la calidad en los productos finales (Franco et al., 2019); se ha utilizado también para ver su efecto sobre ciertas propiedades fisicoquímicas y funcionales del concentrado de proteína de garbanzo (Tontul et al., 2018a); también se han evaluado las propiedades físicas y microbiológicas de un polvo de yogur (Tontul et al., 2018b); además se ha aplicado para determinar la retención de antocianinas en el polvo de la baya de haskap describiendo algunas propiedades fisicoquímicas del mismo (Celli et al., 2016).

Los secadores convencionales tienen, por lo general una eficiencia energética baja debido en primer término a malos diseños y, por otra parte, estos secadores fueron diseñados cuando la energía era abundante y de bajo costo. Sin embargo, actualmente las condiciones no son las mismas, el costo de la energía es una preocupación significativa no sólo desde el punto de vista económico, sino también en el impacto ambiental. Es por eso la preocupación de diseñar secadores con mayor eficiencia y bajo costo energético.

Además que el impacto ambiental se ha vuelto crítico en los últimos años. Los sistemas de secado consumen una gran cantidad de energía y, por lo tanto, dan

como resultado una alta emisión de gases de efecto invernadero como resultado del consumo masivo de combustible (Mujumdar y Jangam, 2011). Existe un gran interés en la industria por mejorar la eficiencia energética en el secado para mantener su rentabilidad, competitividad y sostenibilidad debido a la perspectiva de una tendencia en continuo aumento en los precios de los combustibles y la necesidad de procesos ecológicos para mitigar el impacto ambiental, con la creciente demanda de los consumidores de productos de alta calidad (Sabarez et al., 2012).

2.3 EFICIENCIA ENERGÉTICA.

El rendimiento energético de un secador y un proceso de secado se caracterizan por varios índices, como la tasa de evaporación volumétrica, el consumo de vapor, el consumo de calor de la unidad y la eficiencia energética del equipo o térmica del agua. De todos los índices, la eficiencia energética es la más citada, en especificaciones técnicas. Un análisis exhaustivo de la información disponible, incluido el manual de secado industrial, señala la inconsistencia de la terminología, la definición y la interpretación de los datos. Por lo tanto, los datos reportados sobre eficiencia energética varían significativamente y con frecuencia en la literatura científica (Kudra, 2004).

Por lo que Jangam & Mujumdar (2010) establecieron conceptos relacionados con la eficiencia del proceso de secado que no deben ser confundidos. El término eficiencia de secado se entiende como la razón de evaporación real entre la evaporación que teóricamente es posible con la energía suministrada al sistema y el consumo de energía específica es la energía que es requerida para evaporar una unidad de masa de agua.

Mujumdar (1995) estableció que la eficiencia energética η (ecuación 1) comúnmente relaciona la energía utilizada para la evaporación de humedad a la temperatura de alimentación de sólidos (E_{ev}) con la energía total suministrada al secador (E_{in}).

$$\eta = \frac{E_{ev}}{E_{in}} \quad (1)$$

Cuando se trabaja el secado convectivo con humedades y temperaturas bajas y capacidades caloríficas constantes, en este caso se relacionan la temperatura ambiente T_0 , la temperatura de entrada del aire T_1 y la temperatura de salida de aire T_2 de acuerdo a la ecuación 2:

$$\eta_t = \frac{T_1 - T_2}{T_1 - T_0} \quad (2)$$

Dado que la temperatura de salida, T_2 no llega a ser igual que la temperatura ambiente, la eficiencia térmica de acuerdo con la ecuación (2) nunca será del 100%.

Con frecuencia, la eficiencia energética dada en términos de temperatura (ecuación 2) se denomina eficiencia térmica. Ambos términos son intercambiables, si están definidos por las ecuaciones (1) y (2). Para evitar interpretaciones erróneas, se debe utilizar el rendimiento térmico en lugar de la eficiencia térmica para definir el consumo de energía específico como la cantidad de calor requerida para evaporar la unidad de masa de agua (Baker y Mckenzie, 2005).

2.3.1 ENERGÍA INSTANTÁNEA, ACUMULATIVA E ÍNDICES DE SECADO.

La eficiencia energética definida por la ecuación (1) puede derivarse de los equilibrios de calor y masa alrededor del secador, o determinarse como un producto de eficiencias parciales, que reflejan factores externos e internos que afectan el consumo de calor en un secador (Strawinski, 1982). Por lo tanto, la eficiencia energética se considera un parámetro agrupado o acumulativo, calculado a partir de los datos iniciales-finales o, de entrada. Por lo tanto, para el secado por lotes, la eficiencia energética se da como un valor promedio durante un tiempo de secado. Para el secado continuo, la eficiencia energética se promedia sobre el rango de contenido de humedad, o la longitud, altura o volumen del secador, dependiendo de la configuración del secador. Sin embargo, la eficiencia energética de un proceso

de secado en particular depende del contenido de humedad del material en cualquier instante porque la energía térmica se usa no solo para calentar el material y evaporar la humedad libre, sino también para eliminar el agua enlazada y eventualmente romper los enlaces del agua del material.

La eficiencia energética como parámetro agrupado es útil cuando se comparan diferentes secadores, pero tiene una aplicación limitada al analizar un proceso de secado y la configuración del secador en la etapa de diseño. Tal análisis puede hacerse cuando se utiliza un concepto de eficiencia energética instantánea definido como en la ecuación 3:

$$\eta_{ins} = \frac{\text{Energía requerida en el tiempo } t}{\text{Energía de entrada en el tiempo } t} \quad (3)$$

La integración de la eficiencia energética instantánea proporciona la eficiencia energética acumulativa durante un intervalo de tiempo dado, que es equivalente al rango de contenido de humedad (ecuación 4).

$$\overline{\eta}_{ins} = \frac{1}{t} \int_0^t \eta_{ins}(t) dt \quad (4)$$

Para medir la eficiencia energética y el efecto de un secador sobre las características de calidad de un alimento es necesario utilizar alimentos modelos que por sus características particulares permitan observar el impacto que se tiene sobre sus propiedades durante el proceso de secado y de esta manera poder decidir si es el equipo indicado, tal es el caso del betabel que por las características que posee permitirá observar de manera evidente los cambios que se puedan presentar durante el proceso.

2.4 BETABEL.

2.4.1 GENERALIDADES.

La betarraga, remolacha o también llamada betabel de nombre científico *Beta vulgaris L.* es una planta herbácea del tipo anual perteneciente a la familia de las Amarantáceas, originaria del sur de Europa, actualmente es cultivada por sus raíces, hojas y semillas, las cuales se utilizan con fines azucareros forrajeros y para consumo de mesa (Fuentes-Barría et al., 2018). El betabel es considerado una hortaliza de raíz, aunque en realidad se trata de un “tallo engrosado bulboso”, y constituye un órgano de almacenamiento, principalmente de azúcares y almidones, el cual tiene una forma esférica de forma globosa, con un diámetro de entre 5 y 10 cm y un peso de entre 80 y 200 gramos (Macías y Suarez, 2019).

El sistema de raíces es muy profundo y ramificado; el tallo floral puede alcanzar una altura de 1 a 1.3 m; presenta flores hermafroditas, con estambres y pistilos pudiendo aparecer solas o en grupos (panícula) apretados de dos o tres; las hojas son de color verde intenso y los pecíolos son de color rojo o púrpura. Es una planta de clima frío, aunque se puede explotar en clima cálido (Aguirre-García, 2017). Su color es variable, desde rosáceo a violáceo, la pulpa suele ser de color rojo oscuro y puede presentar, en ocasiones, círculos concéntricos de color blanco, su sabor es dulce, debido a que se acumula gran cantidad de azúcares y es una fuente excelente de vitamina C (Gómez y Duque-Cifuentes, 2018).

2.4.2 CARACTERÍSTICAS NUTRICIONALES Y FISICOQUÍMICAS.

El betabel es considerado una buena fuente de minerales y es recomendado por su bajo valor calórico, así como por su riqueza en compuestos bioactivos como ácido ascórbico, carotenoides, ácidos fenólicos y flavonoides (Wootton-Beard y Ryan, 2011). Es una excelente fuente de calcio, magnesio, cobre, fósforo, sodio y hierro. Las raíces son las más populares para el consumo humano, tanto cocidas como crudas. En la Tabla 1 se muestra la composición proximal de 100 g de betabel fresco.

Tabla 1. Composición proximal de 100 g de betabel fresco.

Componente	Concentración (g)
Agua	87.58
Proteína	1.61
Lípidos totales	0.17
Cenizas	1.08
Carbohidratos (por diferencia)	9.56
Fibra dietaría total	2.80
Azúcares totales	6.76

Fuente: Adaptado de Neelwarne y Halagur, 2013.

El betabel destaca por ser un potente anticancerígeno, virtud que deriva de su riqueza en flavonoides, principalmente por el pigmento rojo betanina, así mismo por su contenido de folatos resulta ideal para prevenir enfermedades del corazón (Tojo y Leis, 2006). Por otro lado, Coles y Clifton, 2012 reportan que el consumo de betabel en adultos sanos, con una dieta normal ha mostrado una tendencia a disminuir la presión arterial sistólica, siendo mayor el efecto en hombres. Las remolachas son ricas en compuestos activos como los carotenoides, glicina, betaína, saponinas, betacianinas, folatos, betanina, polifenoles y flavonoides. Por lo tanto, la ingesta de remolacha puede considerarse un factor en la prevención del cáncer.

Tiene efectos antimicrobianos, antivirales y puede inhibir la proliferación de células tumorales humanas. Las remolachas después de ser sometidas a un proceso de secado se pueden consumir directamente en forma de hojuelas como sustituto de los bocadillos tradicionales, altos en ácidos grasos trans o en bebidas de fácil preparación como componente de alimentos instantáneos (Singh et al., 2014).

El color característico del betabel se atribuye a que en su composición existe un grupo de compuestos nitrogenados conocidos como betalainas estas son derivadas del ácido betalámico y son categorizadas en betacianinas, las cuales le confieren el color rojo- violeta característico, se encuentran presentes de un 75 a 95% (Kanner et al., 2001) y presentan su pico de máxima absorción en un intervalo de 534 nm y 554 nm (Azeredo, 2009), y betaxantinas, presentes en el betabel en una proporción

menor y son de color amarillo-naranja (Stintzing y Carle, 2004) y quienes presentan su máxima absorción entre los 480 nm y 485 nm (Azeredo, 2009).

Por otro lado, además de impartir propiedades de color, las betalaínas proporcionan protección en los humamos contra el estrés relacionado con desórdenes por oxidación lipídica y peroxidación (Kanner et al., 2001; Reddy et al., 2005), imparten efectos antiinflamatorios (Gentile et al., 2004) y ofrecen actividad antirradical y antioxidante (Butera et al., 2002; Caí et al., 2003; Stintzing et al., 2005; Tsai et al., 2010). Sin embargo, muchos factores son responsables de la estabilidad de estos pigmentos, la mayoría de los procesos de degradación son iniciados por deshidrogenación, descarboxilación y oxidación de la molécula original, por otro lado, el contenido de agua influye significativamente en la degradación de las betalaínas del extracto, induciendo la actividad hidrolítica (Manchali et al., 2013), otros de los factores que influyen en la estabilidad de las betalaínas es el pH, la temperatura, la luz, la actividad de agua (A_w) y la presencia de oxígeno (Caí et al., 2001; Pedreño y Escribano, 2001; Tesoriere et al., 2005), tal estabilidad, es un factor que restringe su uso como colorante (Azeredo, 2009). De acuerdo con estas características, las betalaínas se pueden utilizar en alimentos con una corta vida de anaquel, procesados por un tratamiento de calor mínimo, envasándolos y colocándolos en un lugar seco, en niveles bajos de luz, oxígeno y humedad (Von Elbe, 1977).

En la tabla 2 se muestra la clasificación de las betalalinas, y compuestos fenólicos que se encuentran en mayor concentración en el betabel, siendo la betanina la más abundante con respecto a los demás compuestos.

El uso del betabel es permitido en diversos productos comerciales como lo son lácteos, helados, sorbetes, bebidas, confitería, sopas, así como en productos de tomate y tocino (Bazaria y Kumar, 2016). También se ha empleado mayormente para colorear alimentos como yogurt, helados, jarabes, incluso en mayonesa (Carmo et al., 2018), sin embargo, no es ampliamente difundido porque solo se restringe su utilidad a productos que no emplean procesos térmicos, así mismo se le suma otras desventajas como su degradación a altas temperaturas, a pH que no

estén dentro del rango de 3.5 a 7, luminosidad, oxígeno y actividad del agua (Vergara, 2013; Antigo et al., 2018). Además, presenta un contenido intermedio de compuestos fenólicos de 100-500 mg ácido gálico/100 g muestra (Zapata et al., 2013). Sin embargo, a pesar de las cualidades medicinales, nutraceuticas y los beneficios de salud, pocas personas incluyen el betabel en su dieta diaria (Jain et al., 2017).

Tabla 2. Composición fitoquímica del betabel.

Clasificación	Compuestos
1. Betalainas	
1.1 Betaxantinas	Vulgaxantina I Vulgaxantina II
1.2 Betacianinas	Betanina Isobetanina
2. Conjugados de ácido ferúlico	5,5',6,6'-tetrahidroxi-3,3'-biidolil Feruloilglucosa β -d-fructofuranosil- α -d-(6-O- (E) feruloilglucopiranosido)
3. Aminas fenólicas	N-trans-feruloiltiramina N-trans-feruloilhomovanililamina
4. Flavonoides	Betagarina Betavulgarina Coclofilin A Dihidroisoramnetina

Fuente: (Wootton-Beard y Ryan, 2011).

Por otra parte, durante el proceso de secado, muchas propiedades de los alimentos como el betabel, relacionadas con la calidad tienden a cambiar; estas incluyen los aspectos estructurales, ópticos, texturales, térmicos, sensoriales, de rehidratación y nutricionales (Kaspar et al., 2012) por lo que el análisis de las características del alimento después del proceso de secado toma relevancia al momento de evaluar

un equipo que lleva a cabo esta operación. El alcance de los cambios depende del cuidado que se tenga en la preparación del material antes del secado y del proceso utilizado. Los principales parámetros de calidad asociados con los productos alimenticios secos incluyen color, atractivo visual, forma del producto, sabor, carga microbiana, retención de nutrientes, densidad aparente de porosidad, textura, propiedades de rehidratación, actividad del agua, ausencia de plagas, insectos y otros contaminantes, conservantes y ausencia de manchas y malos olores (Ratti, 2005; Sagar y Kumar, 2010).

2.5 CARACTERÍSTICAS DEL ALIMENTO.

Conocer la composición del alimento a secar es uno de los factores más importantes para elegir el tipo de secado a utilizar. Se debe considerar si los productos a tratar son termosensibles, una temperatura elevada permite que la velocidad de secado sea mayor, sin embargo, puede ocasionar daños en el color, en la textura, así como la pérdida de compuestos fisicoquímicos de interés. El contenido de humedad inicial del alimento a secar también influye en la tasa de secado. Entre más elevado sea el contenido de humedad de un alimento, mayor será la cantidad de agua a evaporar por unidad de energía y con ellos la demanda de energía aumentará. La calidad en el producto seco va de acuerdo a sus características físicas, químicas biológicas y nutricionales y encontrarse dentro de la especificación de estas también deben tomarse en cuenta en las limitaciones del proceso de secado.

2.5.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS.

2.5.1.1 Color.

El color es considerado el atributo visual más importante para la determinación de la calidad de los alimentos, por ello es considerado el primer atributo para determinar la aceptabilidad y preferencia del consumidor (Moreno, 2017; Cortés y Chiralt, 2008). El cambio del color que ocurre en el procesado de los alimentos se debe a múltiples reacciones que se producen en el secado, la más común es la destrucción del pigmento y el pardeamiento no enzimático que se producen durante el calentamiento de frutos y vegetales (Álvarez y Corzo, 2012).

Las mediciones de color pueden ser realizadas de formas visuales, con el ojo humano, o instrumentales con un colorímetro, o utilizando la visión digital (Wu y Sun, 2013). El método instrumental se utiliza como herramienta básica para determinar el color usando el colorímetro y espectrofotómetro (Ortega, 2013). La CIE (Commission Internationale de l'Eclairage o la Comisión Internacional de Iluminación) recomienda la escala de color conocida como CIELCH o $L^*C^*H^*$, donde los parámetros cromáticos del espacio de color se miden empleando coordenadas polares (Wrolstad y Smith, 2010).

Yam y Papadakis, 2014 describen las coordenadas del espacio CIELab de la siguiente manera: La coordenada L^* recibe el nombre de luminosidad o claridad, es un atributo relacionado con la transmisión de la luz observada en el espectro, puede tomar valores entre 0 para negro puro y 100 para el blanco puro. Las coordenadas colorimétricas a^* y b^* forman un plano perpendicular a la coordenada L^* . La coordenada a^* define la desviación del punto acromático correspondiente a la luminosidad hacia el rojo si a^* es positiva, y hacia el verde si a^* es negativa. Análogamente la coordenada b^* define la desviación hacia el amarillo si b^* es positiva, y hacia el azul si b^* es negativa (Gilabert, 1992).

El croma C^* describe la saturación de un color, en otras palabras, qué tan cerca está el color ya sea al gris o al matiz puro. Colores de cromaticidad bajo se denominan “débiles”, mientras que los de alta cromaticidad se dice que están “altamente saturados”, “fuertes” o “vivos”. Toma el valor 0 para estímulos acromáticos y normalmente no pasa de 150, aunque puede superar valores de 1000 para estímulos monocromáticos.

El tono h° , Hue es la expresión cualitativa de la cromaticidad, es el “color” actual que sigue un orden natural: rojo, amarillo, verde, azul y púrpura, designando el principio de matices. Entre cada tono hay intermedios: amarillo-rojo, verde-amarillo, azul-verde y rojo-púrpura, varía entre 0 y 360° .

2.5.2 CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS.

2.5.2.1 Polifenoles.

En los últimos años los polifenoles vegetales han sido los compuestos bioactivos más estudiados, se han identificados más de 8,000 compuestos divididos en subclases. Aunque el metabolismo de muchos polifenoles es desconocido (Martin y Appel, 2010), la forma en la que estos están presentes en los alimentos es distinta (agliconas, ésteres, glucósidos o polimerizados), por lo que se dificulta evaluar su real efecto sobre la salud (Li et al., 2014).

Los compuestos fenólicos o polifenoles son metabolitos secundarios producidos por las plantas para su defensa y supervivencia. Estas moléculas poseen anillos aromáticos con varios grupos hidroxilos en su estructura. Además, en el cuerpo humano posee variedad de actividades biológicas, la más representativa es su acción antioxidante (Ricco et al., 2015). Estos compuestos pueden clasificarse en diferentes grupos en función del número de anillos que contienen y de los elementos estructurales que los unen entre sí (Manach et al., 2004). A los compuestos fenólicos, se les ha atribuido una amplia gama de efectos benéficos a la salud humana, ya que pueden actuar como antialérgicos, antiinflamatorios, antimicrobianos y antioxidantes (Balasundram et al., 2006). Dichos efectos benéficos se han atribuido principalmente a su capacidad antioxidante, y por tal; poseen un rango extenso de aplicaciones en la industria alimentaria y farmacéutica (Gil et al., 2013).

Las antocianinas, ácidos fenólicos, flavonoides y estilbenos son compuestos bioactivos pertenecientes al amplio grupo de los compuestos fenólicos utilizados para la formulación de alimentos funcionales. Estos compuestos pueden encontrarse en altas concentraciones en la uva, mango, granada, berries, acai y té verde, y en vegetales como las espinacas, berenjena, brócoli y zanahoria, por mencionar algunos (Balasundram et al., 2006).

Los compuestos fenólicos totales pueden actuar como antioxidantes mediante dos mecanismos principales:

a) Como captadores de radicales libres: actúan como donantes de hidrógeno o electrones en reacciones de terminación que rompen el ciclo de generación de nuevos radicales libres, deteniendo las reacciones en cadena en las que están implicados los radicales libres, el radical fenoxilo generado es menos reactivo dado que se estabiliza por resonancia con los electrones “p” del anillo aromático (Leyva, 2009).

b) Como quelantes de metales: requiere la presencia de grupos hidroxilos cercanos en el anillo aromático, de este modo, los o-dihidroxifenoles son secuestradores efectivos de iones metálicos e inhiben la generación de radicales libres al formar complejos con metales di o trivalentes, especialmente con el hierro y el aluminio (Gimeno, 2004). Sin embargo, existen otros factores que afectan la actividad antioxidante de los compuestos fenólicos totales, como el número y posición de grupos hidroxilo, la presencia de azúcares unidos a ellos y el grado de polimerización (Leyva, 2009).

2.5.2.2 Actividad Antioxidante

Los antioxidantes son compuestos o sistemas que pueden interactuar de manera segura con los radicales libres y terminar la reacción en cadena antes de que se dañen las moléculas vitales. Los antioxidantes cubren diferentes clases de compuestos que pueden interferir con los ciclos oxidativos para inhibir o retardar el daño oxidativo de las biomoléculas. Las principales clases de compuestos con actividad antioxidante son: vitaminas (vitamina C y vitamina E), carotenoides (carotenos y xantofilas) y polifenoles (flavonoides, ácidos fenólicos, lignanos y estilbenos). (Oroian y Escriche, 2015). Según (Pisoschi y Pop, 2015) los antioxidantes biológicos se refieren a cualquier compuesto que, cuando está presente en una concentración más baja en comparación con la de un sustrato oxidable, puede retrasar o prevenir la oxidación del sustrato. Las funciones antioxidantes implican reducir el estrés oxidativo, las mutaciones del ADN (Ácido Desoxirribonucleico), las transformaciones malignas y otros parámetros del daño celular.

Como parte del envejecimiento normal del organismo humano se producen un número considerable de sustancias químicamente inestables, llamadas especies reactivas de oxígeno que en su mayoría son radicales libres. El daño oxidativo que estas especies pueden producir en las células es de consecuencias críticas para su función, por lo que se le asocia con el desarrollo de numerosas patologías y enfermedades degenerativas como el cáncer y la diabetes.

Además de las defensas endógenas del organismo contra el daño oxidativo (enzimas y coenzimas superóxido dismutasas, galactasa, glutatión peroxidasa y el ácido úrico), la ingesta de moléculas antioxidantes puede neutralizar la producción y exposición a los radicales libres y disminuir los efectos adversos de las especies reactivas del oxígeno en el cuerpo humano. Los antioxidantes de origen exógeno pueden ser de naturaleza diversa, como la vitamina C, la vitamina E, carotenoides, flavonoides, principalmente. Estos difieren unos de otros tanto en su mecanismo como en su sitio de acción. Existe evidencia científica de que los compuestos antioxidantes de frutas y vegetales pueden prevenir el daño oxidativo en las células, con lo que se reduce el riesgo de cáncer, enfermedades cardiovasculares, neurodegenerativas y diabetes, entre otras (Sumaya-Martínez et al., 2010).

2.5.2.3 Métodos de Cuantificación de Antioxidantes

La actividad antioxidante de frutos puede evaluarse in vitro e in vivo con base a las reacciones químicas involucradas, Leyva (2009) las divide en dos categorías:

- Basados en la transferencia de un átomo de hidrógeno, donde el antioxidante y el sustrato compiten por el radical libre sintético, una molécula oxidable y un antioxidante.
- Basados en la transferencia de electrones: involucran una reacción de oxidación con el antioxidante que es un indicador del punto final de la misma.

En la tabla 3 se muestran los métodos según la reacción utilizada para la cuantificación de la actividad antioxidante.

Tabla 3. Ensayos in vitro de la capacidad antioxidante.

Mecanismo	Método
Por transferencia de un átomo de hidrogeno	ORAC (del inglés Oxigen radical absorbance capacity). TRAP (del inglés Total radical trapping antioxidant parameter). IOU (del inglés Inhibited oxigen uptake).
Por transferencia de electrones	TEAC (del inglés Trolox equivalent antioxidant capacity) FRAP ⁺ (del inglés Ferric ion reducing antioxidant capacity). DPPH ⁺ ("2, 2- difenil- 1- picrihidracilo) ABTS ⁺ (2, 2'-Azino- bis -- etilenbenzotiazolino- 6- ácido sulfónico).
Otros	TOSC (del inglés total oxidant scavenging capacity).

(Huang et al., 2005)

a) Método ABTS⁺ (2,2'-Azino-bis (3-etilenbenzotiazolino-6-ácido sulfónico)

El método ABTS⁺ es uno de los más utilizados para determinar la capacidad de los compuestos fenólicos totales para capturar radicales libres generados, operando así en contra de los efectos perjudiciales de los procesos de oxidación, que implican especies reactivas de oxígeno (Arnao, 2000; Montoya et al., 2003). El radical libre ABTS⁺ tiene que ser generado tras una reacción que puede ser química (dióxido de magnesio, persulfato de potasio, ABAP (2,2'-azobis(2-amidinopropanol)) (Arnao, 2000; Kuskoski et al., 2004), enzimática (peroxidasa) o también electroquímica (Imeh y Khokhar., 2002). Con el método de ABTS⁺ se puede medir la actividad de compuestos de naturaleza hidrofílica y lipofílica (Kim et al., 2002). La molécula incolora ABTS⁺ se convierte en un radical de color azul-verde (ABTS^{•+}) por oxidación (figura 2). El radical ABTS^{•+} tiene una máxima longitud de onda a 645, 734 y 815

nm. La oxidación del radical $ABTS^{\bullet+}$ comienza inmediatamente, pero la absorbancia no es máxima ni estable hasta después de haber transcurrido 6 h. La máxima absorbancia es alcanzada después de 12-16 h. La adición de compuestos antioxidantes al radical catión $ABTS^{\bullet+}$ preformado, reduce hasta un punto y una escala de tiempo dependiendo de la actividad antioxidante, la concentración del antioxidante y la duración de la reacción. La disminución de la absorción después de la adición de antioxidantes es directamente proporcional al número de los radicales $ABTS^{\bullet+}$.

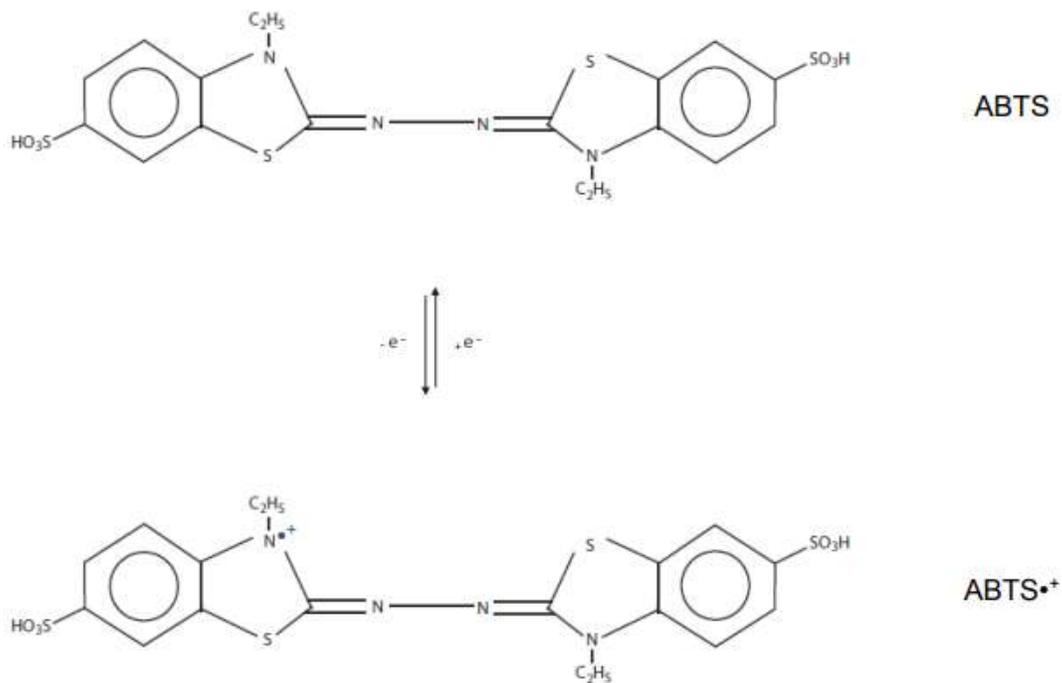


Figura 2. $ABTS^+$ y su producto de oxidación de un electrón, $ABTS^{\bullet+}$.

b) Método DPPH[•] (2,2-difenil-1-picrilhidracilo)

El compuesto DPPH[•] se caracteriza por poseer un electrón desapareado que es el radical libre estable 2,2-difenil-1-picrilhidracilo (DPPH[•]), estabilizado por resonancia. Por esta propiedad, el compuesto DPPH[•] se utiliza como material de referencia para determinar el poder antioxidante de una sustancia por captura de radicales libres (Avella et al., 2008). Este método permite la evaluación de la actividad de sustancias con su radical en una solución metanólica que tiene un color violeta intenso que se

pierde progresivamente a color amarillo cuando se añade la muestra que contiene antioxidantes. La decoloración del radical se determina alrededor de 520 nm y la cuantificación se realiza por lo general empleando soluciones de Trolox (análogo sintético de la vitamina E) (Leyva, 2009). Cuando una disolución de DPPH[•] entra en contacto con una sustancia que puede donar un átomo de hidrógeno o con otra especie radical (R) se produce la forma reducida DPPH-H o DPPH-R con la consecuente pérdida del color (figura 3) y por lo tanto la pérdida de la absorbancia (Molyneux, 2004).

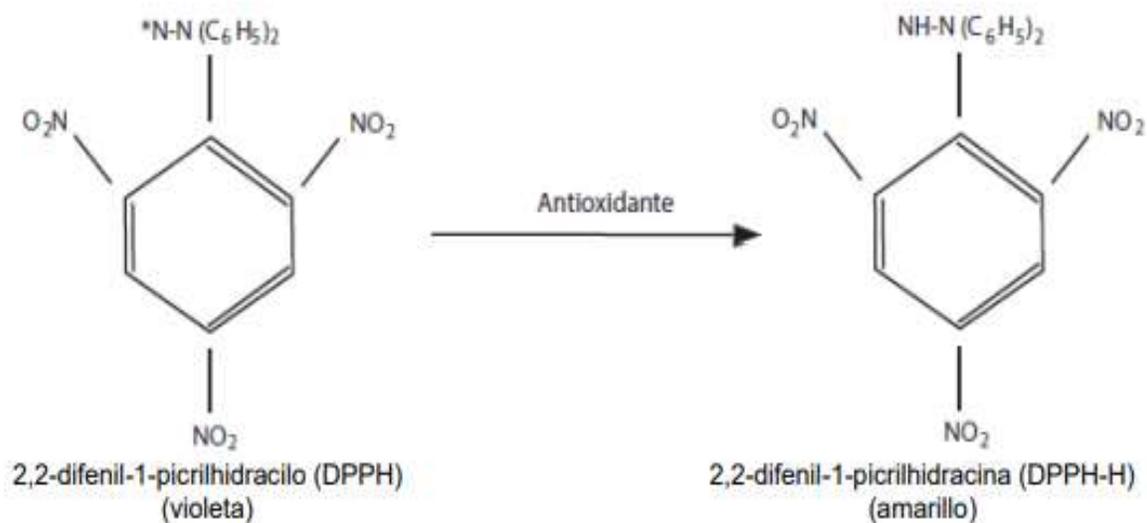


Figura 3. Reacción química entre el radical DPPH[•] y la especie antioxidante.

2.6.3 ACTIVIDAD DE AGUA (A_w).

En el secado de algunos materiales, que requieren una cuidadosa atención higiénica, por ejemplo, los alimentos, la disponibilidad de agua para el crecimiento de microorganismos, la germinación de esporas y la participación en varios tipos de reacciones químicas se convierte en un tema importante. Esta disponibilidad, depende de la presión relativa, o de la actividad del agua (A_w) y se define como la relación entre la presión parcial, *P*, del agua sobre el sistema sólido húmedo y la

presión de vapor de equilibrio, P_w , del agua a la misma temperatura (Jangam y Mujumdar, 2010).

La estabilidad de los alimentos depende estrictamente de la actividad del agua (A_w), el agua puede estar presente pero no disponible, por lo que el crecimiento microbiano se detiene casi por completo cuando la A_w es inferior a 0.6. Sin embargo, para prevenir la aparición de patógenos en frutas y verduras, es necesario secarlas hasta que tengan un contenido de humedad y A_w muy bajo (Kowalski et al., 2015).

La actividad del agua (A_w) es uno de los factores más críticos para determinar la calidad y seguridad de los bienes que se consumen todos los días. La actividad de agua afecta la vida útil, la seguridad, la textura, el sabor y el olor de los alimentos. También es importante para la estabilidad de los productos farmacéuticos y cosméticos. Si bien la temperatura, el pH y varios otros factores pueden influir en la rapidez con la que los organismos crecen en un producto, la actividad del agua puede ser el factor más importante para controlar el deterioro. Predice la estabilidad con respecto a las propiedades físicas, las tasas de reacciones de deterioro y el crecimiento microbiano (Jangam y Mujumdar, 2010). Los alimentos que contienen proteínas y carbohidratos, por ejemplo, son propensos a reacciones de pardeamiento no enzimáticas, llamadas reacciones de Maillard. La probabilidad de que las reacciones de Maillard oscurezcan un producto aumenta a medida que aumenta la actividad del agua, alcanzando un máximo en las actividades del agua en el rango de 0.6 a 0.7 (Okos et al., 1992). En algunos casos, sin embargo, un mayor aumento de la actividad del agua dificultará las reacciones de Maillard. Por lo tanto, para algunas muestras, medir y controlar la actividad del agua es una buena manera de controlar los problemas de pardeamiento de Maillard.

La actividad del agua es un concepto ampliamente aceptado y se utiliza con frecuencia como parámetro para predecir la estabilidad microbiana, química y física de los productos alimenticios a lo largo del tiempo. La actividad del agua influye en el crecimiento microbiano, la oxidación de lípidos y las actividades enzimáticas y no enzimáticas (Rahman y Labuza, 1999; Caparino et al., 2013) Expresar la relación entre la actividad del agua y el contenido de agua en equilibrio en forma gráfica a

una temperatura fija produce una isoterma de sorción de agua. Las isotermas de sorción se utilizan para relacionar la estabilidad física, química y microbiológica, todos los cuales son parámetros importantes durante el secado, envasado y almacenamiento de productos alimenticios.

2.5 ANTECEDENTES

Abonyi et al. (1999). Estudiaron la eficiencia energética, la cinética de secado, el contenido de betacaroteno, caroteno total, ácido ascórbico (vitamina C) y la retención de color de materiales seleccionados, utilizando la planta piloto del secador por Ventana refractiva®. Los experimentos se realizaron con puré de zanahoria (CA) y con puré de fresa con a) 70% de aditivo de maltodextrina-DE10 (SA) y b) sin aditivo (SW). Donde se obtuvieron valores de eficiencia energética de 32.3, 23.4 y 34.3% para los tres alimentos respectivamente. La retención de vitamina C fue superior en purés de fresa secados mediante Ventana refractiva® en comparación con los purés liofilizados a un contenido de humedad similar. Así mismo la Retención de beta, alfa y caroteno total de los purés de zanahoria secados por Ventana refractiva® fueron comparables al producto liofilizado y mejores que los productos secados en tambor. La degradación del color en los productos secados por Ventana refractiva® fue comparable o un poco menos que el de los productos liofilizados. Las cinéticas de secado en el sistema de Ventana refractiva® para productos probados en general siguió la tendencia obtenida para productos similares utilizando otros métodos de secado (Feng et al., 1999). Los resultados anteriores se basaron solo en los materiales seleccionados realizados en un equipo a escala piloto. Se comprobó que el sistema de Ventana refractiva® tiene un potencial único para el secado de frutas con alto contenido de azúcar y que la retención de compuestos termosensibles es muy favorable en los productos secados con esta tecnología y que pueden ser comparados con productos secos liofilizados. Así mismo, tiene potencial de presentar una eficiencia energética más alta en comparación con otro tipo de secadores comúnmente utilizados.

Nindo et al. (2004). Reportaron el consumo de energía durante el secado por ventana refractiva® de jugos de diferentes bayas. Describieron que el secador por ventana refractiva representa un concepto novedoso en el diseño de sistemas de secado para pequeñas plantas procesadoras de alimentos. Donde los objetivos del estudio fueron investigar las características de transferencia de calor de este secador, determinar su consumo de energía y la capacidad en diferentes ángulos de inclinación y caudales de producto. El rendimiento del sistema se evaluó con agua corriente, jugo de frambuesa y jugo y puré de arándanos como alimentación. Con un método de calentamiento por inyección directa de vapor, la economía de vapor varió de 0.64 a 0.84, mientras que el coeficiente global de transferencia de calor (U) fue $666 \text{ Wm}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$. Bajo esta condición, la capacidad de evaporación más alta fue de $27.1 \text{ kg h}^{-1} \text{ m}^{-2}$ para el jugo de arándano y $31.8 \text{ kg h}^{-1} \text{ m}^{-2}$ para el puré de arándano. La energía de consumo fue de $2492\text{--}2719 \text{ kJkg}^{-1}$ de agua evaporada. La instalación de un intercambiador de calor de carcasa y tubo con un mejor control de la temperatura, minimizó las incidencias de ebullición y la descarga frecuente de condensado. La economía de vapor, tasa de evaporación más alta y coeficiente general de transferencia de calor aumentaron a 0.99, $36.0 \text{ kg h}^{-1} \text{ m}^{-2}$ y $733 \text{ Wm}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, respectivamente. Dado que el secador por Ventana refractiva® es mucho menos costoso y opera en condiciones atmosféricas normales, los resultados obtenidos en este estudio son muy buenos en comparación con otros secadores que funcionan en condiciones similares.

Ochoa-Martínez et al. (2012). Realizaron el secado de rebanadas de mango con espesor de 1 y 2 mm utilizando la técnica de Ventana refractiva® (RW) con un baño de agua a una temperatura de $92 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Determinaron cinéticas de secado, actividad de agua y los cambios de color, comparándolas con las obtenidas por el secado de rodajas en un secador de charolas a $62 \text{ }^{\circ}\text{C}$ con una velocidad de aire caliente de 0.52 m/s . Encontrando que después de 1 h de secado, la humedad se redujo a 0.013 y $0.048 \text{ kg agua/kg sólido seco}$ para rodajas de 1 y 2 mm de espesor respectivamente para el secado RW, y de 0.966 y $3.614 \text{ kg agua/kg sólido seco}$

para 1 y 2 mm de espesor respectivamente para el secado en charolas. La actividad de agua después de 1 hora de secado fue menor de 0.5 para el secado RW™ y cerca de 0.97 para el secado en charolas. En el caso del secado en charola fueron necesarios 4 h para obtener el producto con las mismas características que el producto secado con RW durante 1 h. El cambio de color del producto fue similar en ambos métodos de secado y en algunos casos fue menor en el RW™. Concluyeron que la técnica de Ventana refractiva® tiene un alto potencial para el secado de rodajas de frutas y que las muestras secadas con RW™ mostraron alta difusividad comparadas con las secadas por aire caliente, no obstante, las rodajas de 2 mm de espesor mostraron la difusividad más alta y menores signos de deterioro por el calentamiento térmico.

Baeghbali et al. (2016). Evaluaron las características de retención de calidad del concentrado de jugo de granada (PJ) secado en un sistema continuo de secado RW™ a escala piloto en comparación con los métodos de secado por liofilización y aspersion. Las muestras de concentrado de PJ con 64 °Brix mezclado con goma arábica como vehículo con 35%, base seca, se secaron mediante los métodos de secado RW™, liofilización y secado por aspersion. Se compararon las propiedades fisicoquímicas que incluyeron el contenido de humedad, solubilidad, densidad aparente y parámetros de color de las muestras secadas usando diferentes métodos. El análisis químico y las mediciones de color de las muestras reconstituidas mostraron que el secador RW™ puede producir productos de alta calidad con un contenido de antocianinas, color de antocianinas y actividad antioxidante igual o mayor que los de las muestras liofilizadas y secas por aspersion. El consumo de energía del secador RW™ fue de aproximadamente un tercio y 1/40 de los de los sistemas de secado por aspersion y liofilización, respectivamente. Los resultados obtenidos en este estudio mostraron que el secador de ventana refractiva es una técnica de secado energéticamente eficiente y tiene una buena capacidad de retención de calidad. Aunque RW™ mostró algunas ventajas sobre otras tecnologías de secado, se requiere más investigación para investigar la ampliación de la tecnología RW™ para secar productos de frutas.

Hernández-Santos et al. (2016). Compararon la técnica de secado por Ventana refractiva (RW^{TM}) y secado convectivo en rodajas de zanahoria con 3 cm de diámetro y con espesores de 2 y 4 mm a temperaturas de 74 y 94 °C. La pérdida de humedad, textura, color, contenido de polifenoles totales y actividad antioxidante fueron evaluadas como variables de respuesta y se compararon con un control la zanahoria fresca. El método RW^{TM} produjo una reducción del tiempo de secado de 26 a 51% ($p < 0.05$) en comparación con el secado convectivo, este tiempo fue notablemente más corto cuando se emplearon rodajas con espesor de 2 mm en ambas temperaturas. El color, el contenido de polifenoles totales y actividad antioxidante para el tratamiento con RW^{TM} no mostró diferencia significativa ($p < 0.05$) en comparación con el control, siendo mejores que los obtenidos para el secado convectivo. Los valores de textura mostraron diferencia significativa con respecto al control en ambos métodos de secado. Sin embargo, no hubo diferencia significativa en la textura ($p < 0.05$) entre los dos métodos de secado. Los resultados sugieren que la tecnología RW^{TM} se puede usar en alimentos sólidos con piel dura para desarrollar productos con mejores propiedades funcionales en comparación con los obtenidos a través de métodos convencionales de secado con aire.

2.6 JUSTIFICACIÓN

Los secadores tradicionales utilizados en la industria alimentaria someten a los alimentos a tiempos prolongados de secado y temperaturas elevadas lo que provoca un efecto negativo disminuyendo la calidad del producto, afectando de manera significativa parámetros físicos, químicos, funcionales, nutricionales, sensoriales entre otros, los cuales suelen ser de gran importancia para el consumidor. Asu vez, el secado tradicional representa una de las operaciones unitarias con más gasto de energía actualmente, es muy utilizado en la industria de procesamiento de alimentos y constituye una parte importante de los costos operativos. La eficiencia energética de los métodos de secado tradicionales típicamente está entre 10 y 15% lo cual es un valor bastante bajo para este tipo de operaciones. Por lo que es una consideración importante al evaluar un sistema de

secado. Con el aumento potencial de los costos de energía y los requisitos ambientales más estrictos sobre las emisiones de humos, los métodos de secado de alta eficiencia energética tendrían una ventaja competitiva sobre aquellos métodos con baja eficiencia energética. El secado por ventana refractiva (RW™) es un método relativamente nuevo, que ha demostrado una reducción mínima en la calidad de alimentos en comparación con los secados tradicionales. Sin embargo, realizando un análisis de la literatura científica existente se ha encontrado que no hay suficiente información que demuestre la eficiencia energética que posee el secado RW™ y su efecto sobre un alimento en diferentes estados físicos, por lo que el objetivo del presente trabajo fue evaluar la eficiencia energética del secador por RW™ y su efecto sobre las características fisicoquímicas del betabel en dos estados físicos: sólido (rodajas) y semisólido y comparar los resultados obtenidos con un secador tradicional, el secado por charolas.

2.7 OBJETIVOS.

2.7.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar la eficiencia energética del secador por RW™ y su efecto sobre las características fisicoquímicas del betabel en dos estados físicos: sólido (rodajas) y semisólido.

2.7.2 Objetivos específicos.

- Caracterizar un equipo de secado por RW™ elaborado en el Instituto Tecnológico de Tuxtepec.
- Determinar el tiempo de secado, contenido de humedad inicial y final del betabel secado por RW™ y secado en charolas del betabel empleando dos diferentes estados físicos.
- Evaluar las características de actividad de agua (A_w), color, contenido de polifenoles totales, contenido de flavonoides totales, actividad antioxidante por ABTS⁺ y DPPH⁺ en las muestras de betabel secadas por RW™ y secado por charolas.

- Calcular la eficiencia energética durante el secado por RW™ y secado en charolas con los dos estados físicos del betabel.
- Comparar los resultados obtenidos en el secador por RW™ y el secado por charolas a las mismas condiciones de operación.

MATERIALES Y MÉTODOS

III. MATERIALES Y MÉTODOS.

3.1 CARACTERIZACIÓN DE UN EQUIPO DE SECADO POR RW™ ELABORADO EN EL INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTEPEC.

Se caracterizó el secador por RW™ ubicado en el Instituto Tecnológico de Tuxtepec en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Licenciatura de Ingeniería Bioquímica, el cual fue construido durante la residencia profesional de un alumno del área de Ingeniería Bioquímica. Se revisó el funcionamiento de dicho equipo, para comprobar que trabajara adecuadamente. Además, se midieron las temperaturas de tres diferentes áreas de interés en el secador, las cuales fueron, la temperatura del baño de agua, la temperatura que se alcanzó sobre la película de Mylar y la temperatura a la que se sometió al alimento, con ayuda de un controlador de temperatura externo (Johnson Controls, A419 Inc., Wisconsin, EUA). A su vez se corroboraron los tiempos de movimiento de la banda del secador donde fue colocada la muestra de alimento a secar en las 3 velocidades establecidas del equipo.

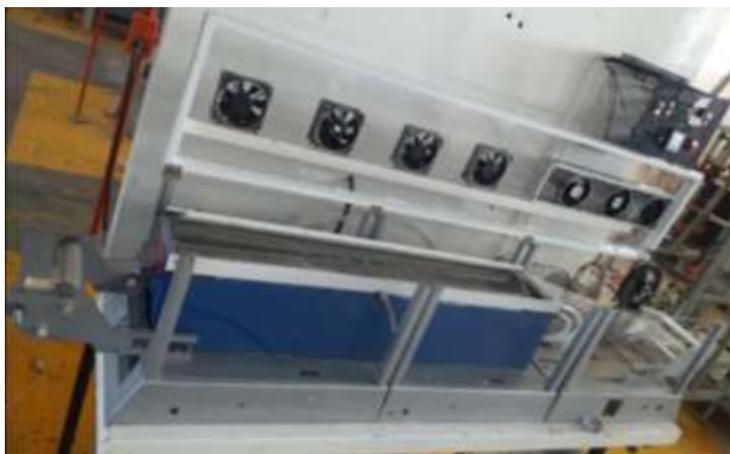


Figura 4. Secador por RW™ continuo.

3.2 PREPARACIÓN DE LA MUESTRA

El betabel que se utilizó durante los tratamientos experimentales de secado por RW™ y secado por charolas se obtuvo del mercado central local de San Juan Bautista Tuxtepec en el estado de Oaxaca, con un grado de madurez comercial y fue seleccionado por el nivel de coloración, forma, tamaño y pesos uniformes. El betabel se lavó, se peló manualmente con ayuda de un pelador de alimentos y se preparó en dos estados diferentes: sólido (Figura 5, a), el cual fue cortado en rodajas de 30 mm de diámetro con ayuda de un mondador y 1 mm de espesor con una rebanadora tipo comercial (EURA, modelo 275E, USA) y semisólido (Figura 5, b), este último se obtuvo en un extractor (Record, modelo Hp-8202, México), donde se colocaron trozos de betabel y se obtuvieron 2 fases: líquida(jugo) y sólida (fibras) las cuales posteriormente se llevaron a una licuadora para homogeneizar ambas fases.



Figura 5. a) Betabel en estado sólido, rodajas y b) betabel en estado semisólido

3.3 SECADO POR RW™ Y SECADO EN CHAROLAS

Como prueba preliminar se realizaron cinéticas de secado en el secador por RW™ y en el secador por charolas para determinar el tiempo de secado para el betabel en los dos diferentes estados. La temperatura del baño de agua para el secador RW™ fue mantenida a 95 °C, obteniéndose una temperatura final sobre la película de Mylar de 80 °C y en el producto alimenticio de 70 °C en contacto directo con el

alimento, mientras que para el secado por charolas se mantuvo a una temperatura de 70 °C del aire caliente en contacto directo con las muestras de betabel. La temperatura fue monitoreada con ayuda de un controlador de temperatura externo (Johnson Controls, A419 Inc., Wisconsin, EUA). Las cinéticas de secado para el betabel en rodajas en ambos secadores se llevaron a cabo colocando una monocapa de rodajas de 1 mm de espesor y 30 mm de diámetro. Mientras que, para determinar el tiempo de secado del betabel en estado semisólido por la complejidad y estado de la muestra éste se colocó con ayuda de un molde de lámina galvanizada con 1 mm de espesor a manera de controlar el grosor y cantidad de muestra. El contenido de humedad se determinó por lapsos de tiempos hasta llegar al contenido de humedad en el equilibrio, tomándose este tiempo como el tiempo de secado para cada diferente estado en cada uno de los 2 secadores empleados. Posterior a las cinéticas de secado, se procedió a secar las muestras en los tiempos determinados donde el total de la muestra a secar se pesó al inicio y al final del proceso de secado. Esta operación se realizó cuatro veces para cada secador.



Figura 6. Secado del betabel a) en rodajas y b) semisólido por RW™

3.4 DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DEL BETABEL EN DIFERENTES ESTADOS FÍSICOS.

Al betabel en sus dos estados físicos se le determinó el contenido de humedad inicial y final, es decir antes y después del proceso de secado. Para tal fin se utilizó el método de la estufa No. 925.10 de la AOAC (2005), utilizando una estufa de secado de flujo convectivo (Estufa Binder, ED 115, Alemania). El valor de la

humedad se reportó en g de agua/g sólidos secos. Esta operación se realizó cuatro veces por cada determinación.

3.5 DETERMINACIÓN DE LA ACTIVIDAD DE AGUA (A_w).

La determinación de la actividad de agua (A_w) se realizó empleando la metodología descrita por Castoldi et al., 2015, utilizando un equipo higrométrico electrónico (Aqualab 3TE, EUA) que se muestra en la imagen 7. Se determinó la A_w en el betabel fresco (antes de iniciar el proceso de secado) en sus dos estados físicos analizados y sus respectivas muestras secadas con la tecnología por RWTM y charolas. Los datos fueron obtenidos por cuadruplicado.



Figura 7. Aqualab 3TE, EUA.

3.7 DETERMINACIÓN LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS.

3.7.1 DETERMINACIÓN DE COLOR.

Para la determinación de color en las muestras frescas y secas de betabel fue empleado un colorímetro (UltraScan Vis, Hunterlab, USA) que se muestra en la figura 8 a través del software EasyMatchQC. Los resultados fueron expresados de acuerdo con el sistema CIELCH, expresando la medición de color como L^*

(luminosidad), cromaticidad (C^*), ángulo hue (h°) y la diferencia total de color (ΔE). La luminosidad fue obtenida directamente de la lectura del equipo, mientras que los tres últimos parámetros fueron calculados por medio de las ecuaciones 5, 6 y 7 respectivamente. Todas las determinaciones de color se realizaron 4 veces para cada tratamiento.

$$C^* = (a^2 + b^2)^{0.5} \quad (5)$$

$$h^\circ = \arctang\left(\frac{b^*}{a^*}\right) \quad (6)$$

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2} \quad (7)$$

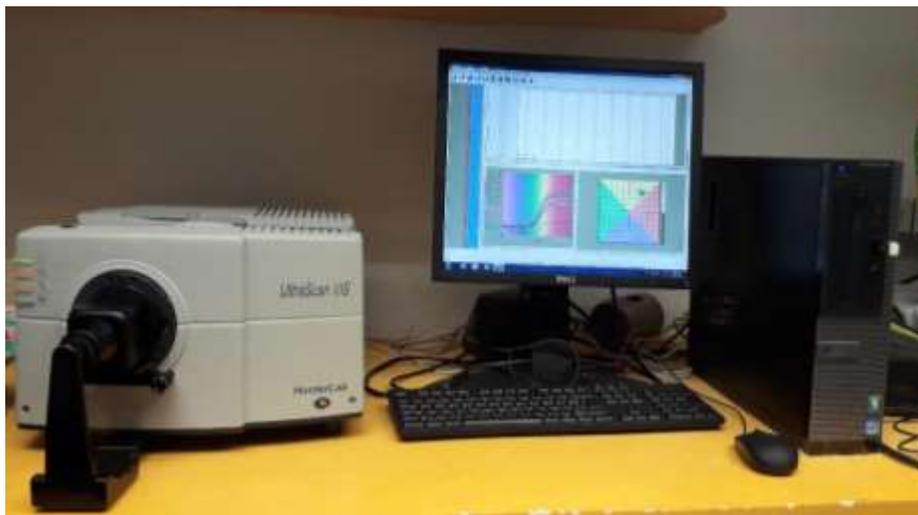


Figura 8. Colorimetro UltraScan Vis.

3.6.2 DETERMINACIÓN DE POLIFENOLES TOTALES Y ACTIVIDAD ANTIOXIDANTE.

3.6.2.1 Preparación de los Extractos.

Las muestras frescas y secadas por RWTM y secado por charolas fueron trituradas utilizando una licuadora (Osterizer, Oster Inc. 6798, México), las muestras secas posteriormente se tamizarán con un tamiz #35 con tamaño de partícula de 0.5 mm. Los extractos de las muestras de betabel de los diferentes tratamientos y el testigo

(fresco) fueron obtenidos mediante una extracción con una mezcla de solvente etanol-agua 70/30% respectivamente. En un matraz Erlenmeyer se colocaron 3.75 g de muestra, a continuación, se añadieron 25 mL de solvente, este se llevó a un baño ultrasónico durante 30 minutos a una potencia de 100 W y una frecuencia de 80 Htz., posteriormente se filtró con papel Whatman #1 utilizando vacío. Posteriormente se procedió a evaporar la fase etanólica utilizando un rotavapor (BÜCHI Labortechnik AG, R-3 HB, Suiza). El extracto acuoso obtenido fue liofilizado utilizando un liofilizador (Biobase, BK-FD10 Series, China) y el polvo obtenido se utilizó para la determinación del contenido de polifenoles totales (CPT), contenido de flavonoides totales (CFT) y la capacidad antioxidante (CA) por ABTS⁺ y DPPH⁺.

3.6.2.2 Determinación del Contenido de Polifenoles Totales.

El análisis del contenido de polifenoles totales de los extractos fue determinado empleando el método de Folin-Ciocalteu utilizando la metodología de Heimler et al. (2005) modificada. Se utilizó una curva de estándar de ácido gálico a distintas concentraciones de 0.7, 0.6, 0.5, 0.4, 0.3, 0.2, 0.1 y 0.05 mg/mL. Las muestras liofilizadas fueron disueltas para tener una concentración de 5 mg/mL. En un tubo Eppendorf se depositaron 600 µL de agua desionizada, 10 µL de muestra o del estándar (para el blanco se utilizó agua desionizada) y 50 µL de reactivo de Folin-Ciocalteu. La mezcla fue agitada, posteriormente se adicionaron 150 µL de solución de Na₂CO₃ al 20% y 190 µL de agua desionizada, se agitó en un vortex y se dejó reposar por 120 minutos en oscuridad a temperatura ambiente. Se midió la absorbancia a 760 nm utilizando un espectrofotómetro (Agilent Technologies, Cary 60 UV-Vis, Estados Unidos de América) como se muestra en la figura 9. Los resultados se reportaron como mg equivalentes de ácido gálico/g de extracto.



Figura 9. Espectrofotómetro Cary 60 UV Vis.

3.6.2.3 Determinación del Contenido de Flavonoides Totales.

El contenido de flavonoides totales se llevó a cabo por el método descrito por Zhishen et al., 1999. La curva de calibración se preparó con catequina como estándar a diferentes concentraciones (50, 100, 150, 200 y 250 $\mu\text{g}/\text{mL}$). En un tubo de ensaye se adicionaron 1250 μL de agua desionizada, 100 μL de muestra o del estándar (en el caso del blanco se utilizó agua desionizada) y 75 μL de NaNO_2 al 5% y se dejaron reposar durante 6 min, posteriormente se adicionaron 150 μL de AlCl_3 al 10% y se dejó reposar durante 5 min. Después se adicionaron 500 μL de NaOH 1M y se completó la dilución a 2.5 mL con 425 μL de agua desionizada. Las muestras fueron leídas 510 nm utilizando un espectrofotómetro (Agilent Technologies, Cary 60 UV-Vis, Estados Unidos de América) después de 30 min de incubación. Los resultados se reportaron como mg equivalentes de catequina (EC)/g de extracto.

3.6.2.4 Determinación de Capacidad Antioxidante.

A) Método 2,2-difenil-1-picrilhidracilo (DPPH⁺).

Se pesaron 2.4 mg del radical 2,2-difenil-1-picrilhidracilo (DPPH⁺) y se aforó a 100 mL con metanol. Se prepararon las muestras tomando como inicio 10000 ppm; se hicieron diluciones a 5000, 2500, 1000 y 500 ppm. Posteriormente en tubos Eppendorf forrados con aluminio se adicionaron 975 μL de DPPH⁺ y 25 μL de

muestra, se dejaron reposar durante 15 min en total oscuridad. Las muestras fueron leídas en un espectrofotómetro (Agilent Technologies, Cary 60 UV-Vis, Estados Unidos de América) a 515 nm (Braca et al., 2002). La capacidad antiradicalaria fue calculada utilizando la ecuación 8:

$$\%DPPH+= \frac{Ac - Am}{Ac} \times 100 \quad (8)$$

Donde:

%DPPH•: Actividad antiradicalaria

Ac: absorbancia control

Am: absorbancia de la muestra

B) Método 2,2. Azino -bis-(3-etilbenzo-tiazolina-6-sulfónico) o ABTS⁺.

Se empleó el método descrito por Re et al. (1999); en el cual se pesaron 77.6 mg de reactivo ABTS⁺ y se adicionaron 20 mL de agua destilada para obtener una concentración de 7 mM en solución acuosa. Posteriormente se pesaron 13.2 mg de persulfato de potasio (2.45 mM) y se hicieron reaccionar en un frasco ámbar con la solución de ABTS⁺. Se homogenizaron y cubrieron con aluminio; para incubarlas entre 12-16 h a temperatura ambiente y en total oscuridad, ya que, el radical permanece estable hasta por 2 días cuando se cuidan estas condiciones. La solución ABTS⁺ se diluyó en etanol absoluto hasta obtener una absorbancia inicial de 0.7 ± 0.05 a 732 nm. Posteriormente se adicionó el radical ABTS⁺ a las muestras en una relación 0.1:10 (v/v), teniendo la muestra a diferentes concentraciones (10000, 5000, 2500, 1000, 500, 250, 50 y 25 ppm). La capacidad antiradicalaria fue calculada utilizando la ecuación 9:

$$\%ABTS+= \frac{Ac - Am}{Ac} \times 100 \quad (9)$$

Donde:

%ABTS⁺: Actividad antiradicalaria

Ac: absorbancia control

Am: absorbancia de la muestra

3.7 CÁLCULO DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DEL SECADOR POR RW™ Y SECADOR POR CHAROLAS.

Para realizar los cálculos referentes a la eficiencia energética se utilizó la metodología descrita por Abonyi et al. (1999) en la cual utilizaron las ecuaciones 10, 11 y 12:

(A) Tasa de evaporación Q .

$$Q\left(\frac{kg}{s}\right) = \frac{\text{Humedad removida durante el secado (kg)}}{\text{tiempo de secado (s)}} \quad (10)$$

(B) Energía de evaporación E_{Ev} .

$$E_{Ev}(kW) = Q * h_{fg} \quad (11)$$

Donde h_{fg} (kJ/kg) es calor latente de evaporación.

(C) Eficiencia energética en general EE_g .

$$EE_g(\%) = \frac{E_{Ev}(KW)}{\text{Energía de entrada (KW)}} * 100 \quad (12)$$

3.8 ANÁLISIS ESTADÍSTICO.

Los resultados obtenidos fueron analizados con un análisis de varianza (ANDEVA) de una vía y una prueba de comparación de medias por Fisher con un nivel de confianza del 95%, empleando el software Statistica versión 10.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

Los resultados obtenidos de este proyecto de investigación se presentan de tal forma que vayan ordenados de acuerdo a la metodología aplicada.

4.1 CARACTERIZACIÓN DE UN EQUIPO DE SECADO POR RWTM ELABORADO EN EL INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTEPEC (ITTux).

Para la caracterización del equipo primeramente se llevó a cabo el acondicionamiento del secador donde, al revisar el funcionamiento del equipo de RWTM se encontró que el estado de las tres bandas plásticas colocadas en los rodillos del extremo derecho del secador, las cuales ayudan a realizar el movimiento de la película de Mylar se encontraban gastadas por lo cual se cambiaron por unas nuevas. Posteriormente se realizó el cambio del contactor y la fuente de poder, los cuales sufrieron daños por cuestiones de variación de corriente. Se reemplazó el sensor de temperatura debido a que éste dejó de mandar señal al controlador de temperatura por lo cual no se podía conocer ni controlar la temperatura a la cual se estaba trabajando. Se reemplazó la película donde se coloca el alimento para secar debido a que estaba en mal estado y esto podría afectar la transferencia de radiación además de que ésta era muy corta, para lo cual se cortó la película de MylarTM de 12.3 cm de ancho por 10 m de largo y se colocó en los rodillos utilizando pegamento para PVC para evitar que se moviera.

Al medir las temperaturas de las tres diferentes áreas de interés en el secador, se encontró que, la temperatura en el baño de agua fue de 95 ± 2 °C y sobre la superficie de la película de Mylar de 80 ± 2 °C. Sin embargo, la temperatura alcanzada en la superficie del alimento en este caso betabel en rodajas (sólido) y en un tipo puré (semisólido) fue de 70 ± 2 °C, esta temperatura obtenida fue comparable con lo que reportaron algunos autores como Kaspar et al. (2012), Ochoa-Martínez et al. (2012); Baeghbali et al. (2016) quienes han informado que utilizando la tecnología de secado por RWTM el alimento rara vez supera los 70 °C.

Cuando se midieron los tiempos en que la película de Mylar del secador donde fue colocada la muestra decimo a secar terminaba un ciclo, se obtuvo que en la velocidad mínima el tiempo obtenido fue de 15 ± 1 minutos, en la velocidad media el tiempo fue de 8 ± 1 minutos y en la velocidad máxima el tiempo de residencia del alimento fue de 3 ± 1 minutos. El secador RWTM elaborado en el ITTux pudo operarse de forma continua, sin embargo, por la complejidad en el manejo del estado semisólido el secador fue utilizado por lotes.

4.2 CINÉTICAS DE SECADO.

En las figuras 10 y 11 se observan los resultados de las cinéticas de secado obtenidas mediante el secador por RWTM y por el secador por charolas respectivamente en los dos tipos de estado físico de betabel empleados, utilizando una temperatura de 70 °C en cada uno de los dos casos. Se apreció que la velocidad de secado fue mayor en el secador por RWTM que, en el secado por charolas, determinándose por el tiempo de secado empleado en RWTM, ya que éste fue menor que el empleado en el secador tradicional por charolas. Para el caso del secador por charolas los tiempos de secado obtenidos cuando las muestras llegaban al contenido de humedad en equilibrio para el betabel en rodajas y en estado semisólido fueron de 100 y 80 minutos respectivamente. Hubo una diferencia con los tiempos de secado a este mismo contenido de humedad en el secador RWTM de 40 minutos y 30 minutos para rodajas y semisólido respectivamente, dando así un 60 y 62.5% de reducción en los tiempos de secado para cuando se secó el betabel en rodajas y semisólido respectivamente en el secador RWTM. Lo anterior es debido a la mayor transferencia de calor producida a través de la radiación infrarroja producida por la película de Mylar. Esta conducta fue reportada por Hernández-Santos et al., 2016 donde el método RWTM produjo una reducción del tiempo de secado de 26 a 51% ($p < 0.05$) en comparación con el método convectivo cuando secaron rebanadas de zanahoria de 1 mm de espesor.

También se observó que, para ambos métodos de secado, el uso de betabel en estado semisólido los tiempos de secado del alimento fueron más cortos que los empleados en rodajas. Esto puede explicarse debido a que la transferencia de calor

fue mayor, debido al menor tamaño de partícula empleada debido a ya que se tiene una superficie mayor de contacto.

Estas diferencias de tiempo empleadas en el secado por RW™ podrían favorecer la retención las propiedades químicas y fisicoquímicas del betabel en sus dos presentaciones físicas en relación a las obtenidas por el secador de charolas.

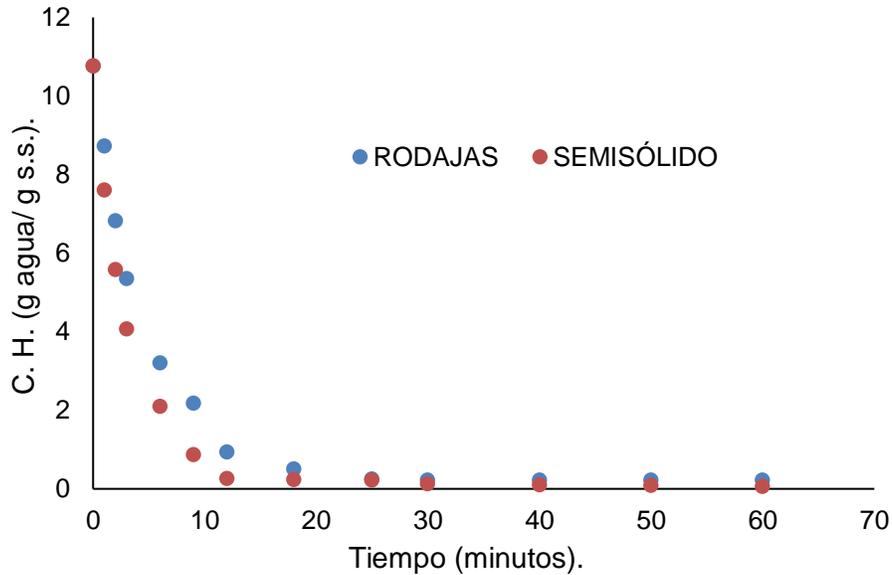


Figura 10. Cinética de secado por RW™ para el betabel en dos estados físicos rodajas y semisólido a 70 °C.

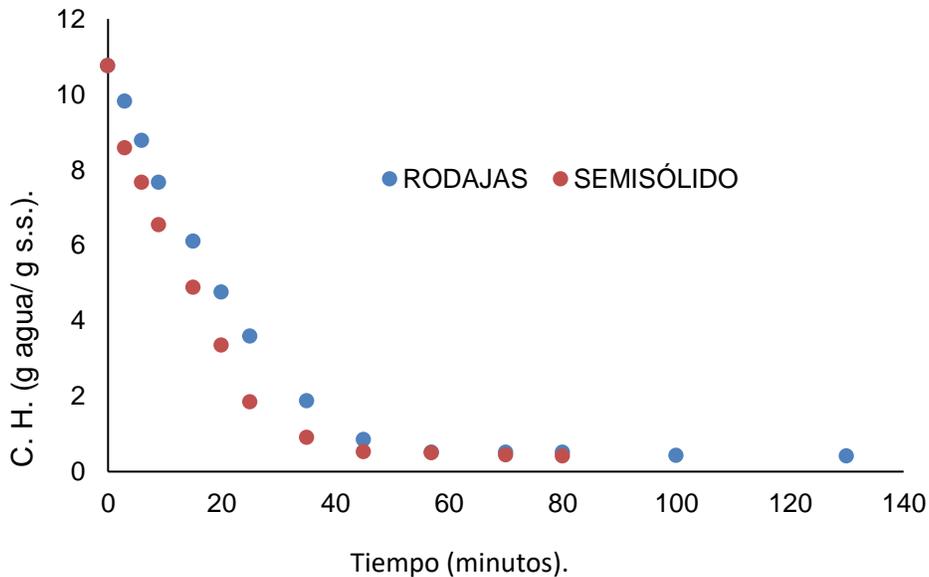


Figura 11. Cinética de secado por charolas para el betabel en dos estados físicos rodajas y semisólido a 70 °C.

4.3 CONTENIDO DE HUMEDAD Y ACTIVIDAD DE AGUA

En la tabla 4 se observan los resultados de los tiempos finales de secado, contenido de humedad y actividad de agua durante el secado del betabel en dos estados físicos diferentes utilizando la técnica de secado por RWTM y por charolas. Las letras diferentes en la misma columna indican que existe diferencia significativa ($p < 0.05$). Utilizando el secador por RWTM se obtuvieron tiempos de secado de 40 y 30 min, contenidos de humedad de 0.09 y 0.07 g de agua/g sólidos secos y A_w de 0.19 y 0.18 para el betabel en rodajas y en estado semisólido respectivamente. Mientras que, con el secado por charolas se obtuvieron tiempos de secado de 100 y 80 min, contenidos de humedad de 0.13 y 0.11 g de agua/g sólidos secos y A_w de 0.28 y 0.25 para el betabel en rodajas y semisólido respectivamente.

Tabla 4. Tiempo de secado, contenido de humedad y actividad de agua del betabel secado en dos estados físicos mediante la técnica de secado por RWTM y secado por charolas.

TRATAMIENTO	ESTADO	T. S. (minutos)	C.H. (g de agua/g s.s)	A_w
FRESCO		---	10.17±0.01^a	0.97±0.01^a
Secado por RW TM	Rodajas	40	0.09±0.01 ^b	0.19±0.01 ^b
	Semisólido	30	0.07±0.01 ^b	0.18±0.01 ^b
Secado por Charolas	Rodajas	100	0.13±0.01 ^c	0.28±0.01 ^c
	Semisólido	80	0.11±0.01 ^c	0.25±0.01 ^d

RWTM: Ventana Refractiva, T. S.: Tiempo de secado, C.H.: Contenido de Humedad, A_w : Actividad de agua,

* Letras diferentes en la misma columna indican que hay diferencia significativa de $p < 0.05$

**Los resultados representan el promedio ± DS de cuatro determinaciones.

Se obtuvieron valores más bajos utilizando el secado por RWTM en comparación con los valores obtenidos por el secador de charolas, esto podría deberse a que la transmisión de calor que se presenta en el secador RWTM se lleva a cabo de tres maneras diferentes: por radiación infrarroja principalmente, así como por conducción y convección (Ortiz-Jerez et al., 2015). Esto favoreció que la pérdida de agua localizada en el interior del alimento se realizara con mayor rapidez,

disminuyendo así los tiempos de exposición y favoreciendo valores bajos en cuanto a contenidos de humedad y de actividad de agua. Estos resultados pueden ser comparados con los reportados por Ochoa-Martínez et al. (2012), donde por la técnica RWTM el contenido de humedad disminuyó a un valor menor del 5% (0.053 g agua/g de s. s.) en un tiempo de 30 min para rebanadas de mango de 1 mm de espesor. Sin embargo, se necesitaron 240 min para obtener resultados similares con el método de secado en bandeja a 62 °C. Asimismo, Nindo et al. (2003b) reportaron que el tiempo de residencia para el secado de 800 g de puré de espárragos con un contenido medio de humedad de 21.0 disminuyó a 0.04 g agua/g de s. s. en el sistema RWTM a escala piloto en 4.5 minutos, explicando que el secado rápido fue el resultado de la alta transferencia de calor y masa que tiene lugar en el sistema de secado RWTM. La A_w es la relación que existe entre la presión de vapor en la muestra y la presión de vapor del agua pura, entre menor sea el valor de la actividad acuosa, el crecimiento de los microorganismos se hace más lento, es una variable importante en los estudios de secado porque determina la calidad de un producto y su seguridad para la salud (Quek et al., 2007). En este trabajo se observó que con RWTM se alcanzaron los valores más bajos de A_w , lo que podría reducir el desarrollo de microorganismos que favorecieran el deterioro de la muestra, también podría disminuir otras reacciones enzimáticas y no enzimáticas que no son deseables en un alimento, esto puede respaldarse con lo dicho por Pavan et al. (2012) quienes concluyeron que el secado RWTM produce polvos con baja actividad de agua y buena estabilidad durante su almacenamiento. Por otro lado, analizando el comportamiento de la muestra en dos diferentes estados se encontró que al secar el betabel en estado semisólido (tipo puré) los tiempos de exposición disminuyeron. Esto se explica de manera que el tamaño de partícula fue menor, favoreciendo la transmisión y distribución de calor más uniforme dentro y entre las partículas del alimento, aumentando la velocidad de pérdida de agua.

4.4 COLOR

En la tabla 5 se observan los resultados de color de las muestras durante el secado del betabel utilizando la técnica de secado por RWTM y secado por charolas, en

rodajas y semisólido respectivamente. Las letras diferentes en la misma columna indican que existe diferencia significativa ($p < 0.05$). En primer lugar, se observó que en el parámetro L^* (Luminosidad) no hay una diferencia estadística significativa ($p > 0.05$) entre el betabel fresco en rodajas con valor de L^* de 22.22 y el secado por RW^{TM} de 23.7. Esta misma tendencia se observó en el betabel fresco en estado semisólido con un valor de L^* de 26.29 y el secado por RW^{TM} de 25.46. Sin embargo, un efecto contrario se presentó en las muestras de betabel en los dos estados físicos cuando se utilizó el secado tradicional de charolas, donde se obtuvieron valores de L^* de 16.57 y 19.40 para el betabel en rodajas y semisólido respectivamente, donde se observó diferencias significativas ($p < 0.05$) con los valores en fresco en cada uno de los estados físicos de las muestras estudiadas.

Tabla 5. Parámetros de color del betabel secado en rodajas mediante la técnica de secado por RW^{TM} y secado por charolas.

TRATAMIENTO	ESTADO	L^*	C^*	h°	ΔE
FRESCO		22.22 ± 0.11^a	19.31 ± 0.87^a	19.05 ± 1.26^a	
Secado por RW^{TM}	Rodajas	23.7 ± 0.02 ^a	16.48 ± 0.04 ^b	17.47 ± 0.25 ^b	3.24 ± 0.02 ^a
Secado por Charolas		16.57 ± 0.03 ^b	11.48 ± 0.14 ^c	15.95 ± 0.35 ^c	9.66 ± 0.10 ^b
FRESCO		26.29 ± 0.04^a	2.24 ± 0.04^a	16.80 ± 0.42^a	
Secado por RW^{TM}	Semisólido	25.46 ± 0.02 ^a	1.90 ± 0.02 ^a	16.81 ± 0.39 ^a	0.91 ± 0.02 ^a
Secado por Charolas		19.40 ± 0.08 ^b	9.96 ± 0.17 ^b	15.69 ± 0.41 ^b	10.3 ± 0.17 ^b

RW^{TM} : Ventana Refractiva, L^* (luminosidad), cromaticidad (C^*), ángulo Hue (h°) y ΔE : Diferencia total de color.

*Letras diferentes en la misma columna indican que hay diferencia significativa de $p < 0.05$

*Los resultados representan el promedio ± DS de cuatro determinaciones.

Los cambios presentados se debieron a que durante este proceso de secado tradicional a pesar de usar la misma temperatura que el secado por RW^{TM} , se sometieron las muestras a mayor de tiempo de exposición para alcanzar el contenido de humedad de equilibrio deseado. Lo que provocó un oscurecimiento, denominado oscurecimiento no enzimático. Sin embargo, este oscurecimiento no es igual en ambos tipos de secado, el impacto del secado sobre la luminosidad de las muestras secadas con la tecnología de RW^{TM} fue menor obteniéndose valores más estables para el betabel secado en rodajas y semisólido. Esto se puede explicar

debido a que los secados tradicionales como el secado por charolas tienen a dañar mayormente las características de color como lo es la luminosidad (L^*), debido a que el aire caliente al hacer contacto directo con la muestra daña de forma más evidente el color de la misma, a diferencia del secador por RWTM con el cual se conserva más esta característica al hacer contacto indirecto el calor en la muestra por radiación infrarroja principalmente.

Esta misma conducta se vio reflejada en la cromaticidad C^* de las muestras de betabel, donde se observó que no hubo una diferencia estadística significativa ($p>0.05$) entre las muestras de betabel fresco en estado semisólido con una C^* de 2.21 y de 1.90 en la muestra secada por RWTM. Mientras que el secador de charolas presentó un valor de C^* en las muestras de 9.96 con diferencia significativa ($p<0.05$) con respecto a la muestra en fresco. Sin embargo, se observó una diferencia significativa ($p<0.05$) en el estado sólido (rodajas) en los dos tipos de secado empleados. Donde el valor de cromaticidad de betabel en fresco fue de C^* de 19.31, en comparación los valores de C^* de 16.48 y 11.48 en RWTM y secado por charolas respectivamente.

En cuanto a los resultados de ángulo Hue o tonalidad (h°) la misma tendencia de diferencias significativas ($p<0.05$) fue observada para el estado sólido de betabel en rodajas. Teniendo un valor de h° en fresco igual a 19.05, mientras que para el secador por RWTM y el secador por charolas se obtuvieron valores de h° de 17.47 y 15.95 respectivamente. Para el caso de muestra de betabel en estado semisólido no hubo diferencias significativas ($p>0.05$) del betabel secado por RWTM con un valor de h° de 16.81 con respecto al betabel en fresco en el cual se obtuvo un valor de h° de 16.80. Caso contrario con el valor de h° obtenido por secado por charolas de 15.95 que mostró diferencia significativa con respecto a la muestra en fresco y secado ventana refractiva con una $p<0.05$.

Los valores de los parámetros de color L^* , C^* y h° fueron retenidos empleando secado por ventana refractiva, principalmente en el estado semisólido del betabel. A diferencia de los valores obtenidos en las muestras secadas por charolas. Estos resultados pueden compararse con los reportados por Hernández-Santos et al.

(2016) donde los tratamientos de rodajas de zanahoria secadas con RWTM no presentaron cambios de color con respecto al testigo, a diferencia que con el secador convectivo en los que si hubo una diferencia estadística significativa ($p < 0.05$). El oscurecimiento de las muestras es una característica no deseada que se encuentra en los alimentos secados convencionalmente. Esta disminución puede explicarse debido a que las condiciones de operación afectan la calidad del alimento (Jangam, 2011), debido a que las temperaturas y los tiempos de exposición del alimento no son los adecuados, pues en la composición en este caso del betabel secado hay presentes compuestos que son termosensibles, este es el caso de las betalaínas las cuales confieren el color característico y éstas pudieron degradarse favoreciendo así la disminución en los parámetros de color. Sin embargo, este impacto fue menos agresivo en el secado RWTM debido a que presentó menor descomposición de estos compuestos, debido a que en este proceso las condiciones de secado no fueron tan drásticas en cuanto al tiempo de secado, en comparación del secador por charolas. Asimismo, el secado por RWTM previene la oxidación y la degradación debido al menor tiempo de exposición al oxígeno cuando tiene lugar una intensa evaporación en la superficie del producto, así como un calentamiento reducido en la etapa final del secado.

En cuanto a la diferencia total de color se obtuvo una ΔE menor en los productos secados por RWTM siendo el menor efecto encontrado en la muestra en estado semisólido. Esto se explica debido a que, por sus características, se disminuyó el tiempo de exposición de secado reduciendo así la degradación de compuestos oxidantes. Sin embargo, cuando se utilizó secado por charolas con tiempos de exposición de secado mayores se obtuvieron valores más altos de ΔE , debido a la formación de otras reacciones que favorecieron el aumento de compuestos coloreados no deseables como la reacción de Maillard. Este mismo comportamiento fue observado por Caparino et al. (2012) donde secaron puré de mango utilizando la técnica de RWTM y obtuvieron valores más altos de C^* , h° y ΔE del mango seco en polvo. Así mismo Abonyi et al. (2002) obtuvieron valores más altos de h° (tonacidad) y L^* para la fresa secada con tecnología RWTM en comparación con el secado por aspersion. Así mismo, Jafari et al. (2016) indicaron que con el secado

RW™ en la mayoría de los casos dio como resultado valores de ΔE más bajos en comparación con otras técnicas de secado.

4.5 CONTENIDO DE POLIFENOLES Y FLAVONOIDES TOTALES

En la tabla 6 se presentan los valores obtenidos del Contenido de Polifenoles Totales (CPT) y Contenido de Flavonoides Totales (CFT) durante el secado del betabel utilizando la técnica de secado por RW™ secado por charolas, en rodajas y semisólido. Letras diferentes en la misma columna indican que existe diferencia significativa ($p < 0.05$).

Tabla 6. Contenido de polifenoles totales (CPT) y contenido de flavonoides totales (CFT) del betabel en dos estados físicos diferentes.

TRATAMIENTO	ESTADO	CPT	CFT
		(μg de EAG/g de extracto)	(μg EC/g de extracto)
FRESCO		278.33 \pm 0.03 ^a	161.33 \pm 0.02 ^a
Secado por RW™	Rodajas	275.67 \pm 0.14 ^a	157.00 \pm 0.01 ^a
	Semisólido	278.00 \pm 0.21 ^a	158.00 \pm 0.01 ^a
Secado por Charolas	Rodajas	140.67 \pm 0.18 ^b	147.67 \pm 0.01 ^b
	Semisólido	186.67 \pm 0.15 ^c	141.00 \pm 0.02 ^c

RW™: Ventana Refractiva.

*Letras diferentes en la misma columna indican que hay diferencia significativa de $p < 0.05$

*Los resultados representan el promedio \pm DS de cuatro determinaciones

Se obtuvieron CPT más cercanos a la muestra fresca con valor 278.33 EAG/g en el secado por RW™, obteniéndose valores de 275.67 y 278.00 de μg EAG/g en los extractos de rodajas y semisólido respectivamente sin diferencias significativas a una $p > 0.05$, inclusive entre los dos estados físicos estudiados. Mientras que se obtuvieron valores de CPT de 140.67 y 186.67 μg EAG/g en los extractos de rodajas y semisólido respectivamente por secado por charolas con una diferencia significativa a una $p < 0.05$ con el estado de betabel en fresco y entre los dos estados físicos empleados del betabel. Esta tendencia se observó en los trabajos realizados por Baeghbali et al. (2016) donde el CPT en RW™ fue más alto en comparación con otros tipos de secadores y así como con Hernández-Santos et al. (2016), donde utilizando la tecnología de secado RW™ no hubo diferencia estadística significativa ($p > 0.05$) con respecto al control.

La misma conducta se observó al realizar las pruebas de CFT donde los mejores tratamientos fueron al secar el betabel con el sistema RWTM obteniéndose valores de 157.00 y 158.00 EC/g en los extractos de rodajas y semisólido respectivamente, los cuales no tuvieron diferencia significativa ($p > 0.05$) con el betabel en fresco con un valor de 161.33 EC/g extracto. Estos resultados pueden explicarse debido a que al utilizar la tecnología de secado por RWTM la transferencia de calor se da por radiación infrarroja principalmente lo que favorece la rápida evaporación, disminuyendo así los tiempos de secado, así mismo la transferencia de calor es de manera indirecta permitiendo la retención de los compuestos presentes en las muestras secadas por RWTM. También se observó que en los estados físicos de betabel estudiados sólido y semisólido no hubo diferencia significativa entre los valores obtenidos de CFT aplicando secado por ventana refractiva. Por otro lado, los valores obtenidos de CFT por el secado por charolas de 147.67 y 141 μg EC/g en los extractos de rodajas y semisólido respectivamente, los cuales tuvieron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre ellos y entre el betabel en fresco. Esta misma tendencia en los resultados puede notarse con los obtenidos por Abul-Fadl y Ghanem (2011) donde el secado RWTM provocó una retención considerable de flavonoides totales en una proporción de 86.4, 76.6 y 74.2% en muestras de tomate secadas a tres condiciones 75 °C durante 60 min, 60 °C durante 75 min y 90 °C durante 40 min; respectivamente. Mientras, las muestras de tomate secadas por proceso de secado por convección no hubo más retención del 50.9% de flavonoides totales.

Esta misma tendencia se reportó con Calderón-Chiu et al. (2020) donde obtuvieron valores de 470 μg de EAG/g s.s y 250 μg de EC/g de s.s de CPT y CFT respectivamente para el betabel secado por RWTM, la diferencia en los valores reportados por estos autores y los obtenidos en este estudio aun siendo el mismo tipo de vegetal (betabel) puede deberse a que las técnicas de extracción y cuantificación fueron diferentes estableciendo una variación en los contenidos. Asimismo, el tipo de tierra de cultivo, la época de cosecha puede variar los contenidos de estos componentes.

Entre los valores obtenidos por el betabel secado en semisólido y en rodajas donde claramente se observó que al secar por RWTM las muestras en estado semisólido favorecieron la retención del CPT y CFT, esto debido que al secar el betabel en estado semisólido se consiguió un tiempo de secado menor (30 min), a su vez una baja actividad de agua en el equilibrio de 0.18 y retención de los parámetros de color, donde se evidenció que fue el tratamiento durante el cual se notó el menor índice de cambios después del proceso de secado. Esto fue debido a que los compuestos fenólicos sufren cambios en sus estructuras cuando se someten a procesos térmicos por un tiempo prolongado, a su vez al estar en alimentos con A_w bajas estos tienden a ser más estables debido a que el O_2 se encuentra en menores concentraciones. Por lo que al disminuir estas dos variables de secado (tiempo de secado y A_w) favoreció la retención de los componentes antioxidantes y por tanto la conservación de parámetros de color como L^* , C^* y h° y una disminución de la diferencia total de color.

4.6 DETERMINACIÓN DE LA ACTIVIDAD ANTIOXIDANTE.

4.6.1 METODO DE DPPH⁺.

En la figura 12 se presentan los resultados de la capacidad antioxidante por el método de DPPH⁺ del betabel fresco y secado por los dos métodos de secado en estudio. Se observó que en todas las concentraciones de los extractos que van desde 500 hasta 10,000 ppm los tratamientos de secado por charolas tuvieron diferencias significativas a una $p < 0.05$ en relación al betabel fresco. A diferencia de las muestras de betabel secadas por ventana refractiva en ambos estados físicos, en las que solo hubo diferencias significativas ($p < 0.05$) con el control de betabel en fresco en la concentración de 10,000 ppm. Esta misma tendencia ha sido reportada por Nindo (2008) donde las muestras de aloe vera secadas por RWTM obtuvieron un AA de 29.6% dando una mayor retención de los compuestos antioxidantes utilizando el método de secado por RWTM.

Los resultados obtenidos en las muestras obtenidas en el secado por RWTM podrían deberse al menor tiempo de secado empleado el cual fue de 30 y 40 minutos para el betabel en estado semisólido y sólido respectivamente, esto pudo favorecer la retención de compuestos antioxidantes como las betalaínas presentes evitando su degradación que puede presentarse cuando hay un prolongado tiempo de exposición al calor debido a que se ha reportado que estas son compuestos termosensibles. Además de ser coincidente con la concentración de CPT y CFT en este tipo de muestras. Algunos autores han demostrado esta conducta en la AA de extractos de vegetales (Butera, et al., 2002; Caí y Corke, 2003).

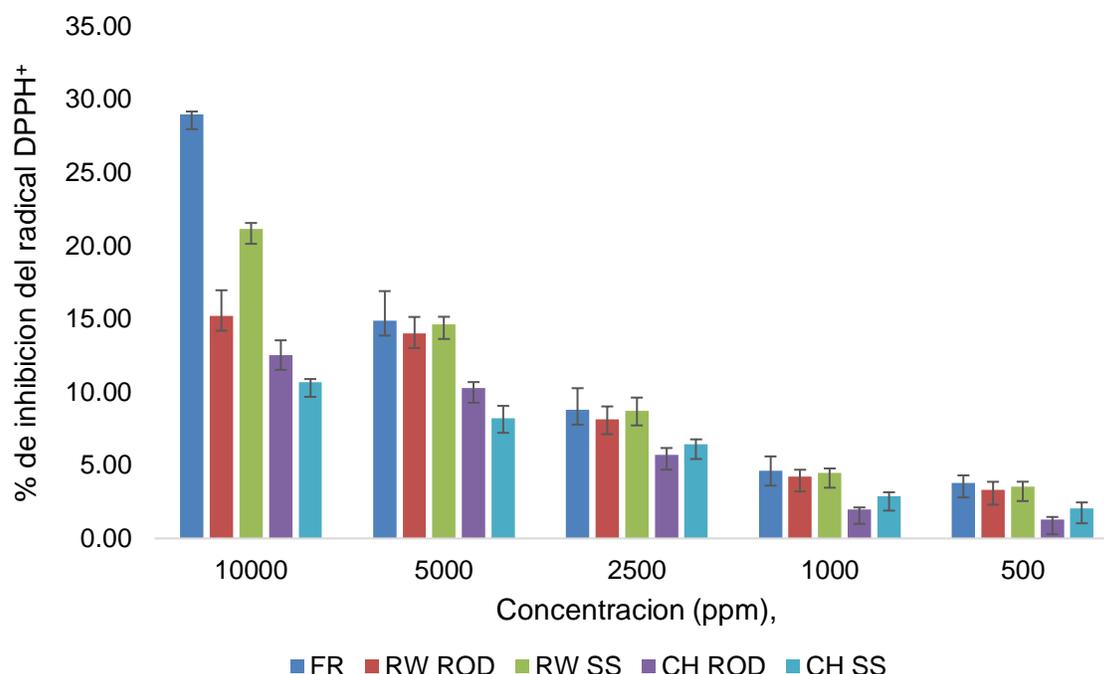


Figura 12. Actividad antioxidante por el método DPPH⁺ del betabel secado en dos estados físicos diferentes. (FR: fresco, RWTM ROD: Secado RWTM del betabel en rodajas, RWTM SS: Secado RW del betabel en semisólido, CH ROD: Secado en charolas del betabel en rodajas, CH SS: Secado en charolas del betabel en semisólido) ppm: partes por millón.

4.6.2 METODO ABTS⁺.

En la figura 13 se presentan los resultados de la capacidad antioxidante por el método de ABTS⁺ del betabel fresco y empleando los dos métodos de secado en estudio. Se observó que en todas las concentraciones de los extractos que van desde 25 hasta 10,000 ppm todos los tratamientos de betabel secado por charolas

tuvieron diferencias significativas a una $p < 0.05$ en relación al betabel fresco en los dos estados físicos del betabel empleado. No así las muestras de betabel secadas por ventana refractiva en estado semisólido (tipo puré) en las que no hubo diferencias significativas ($p > 0.05$) con el control de betabel en fresco en todas las concentraciones del extracto de 25 a 10000 ppm. Sin embargo, las rodajas de betabel secadas por RWTM no tuvieron diferencias significativas con el betabel control (en fresco) solo en concentraciones inferiores del extracto que van desde 25 hasta 2500 ppm. Mostrando que a concentraciones superiores del extracto si presentan diferencias con el betabel control.

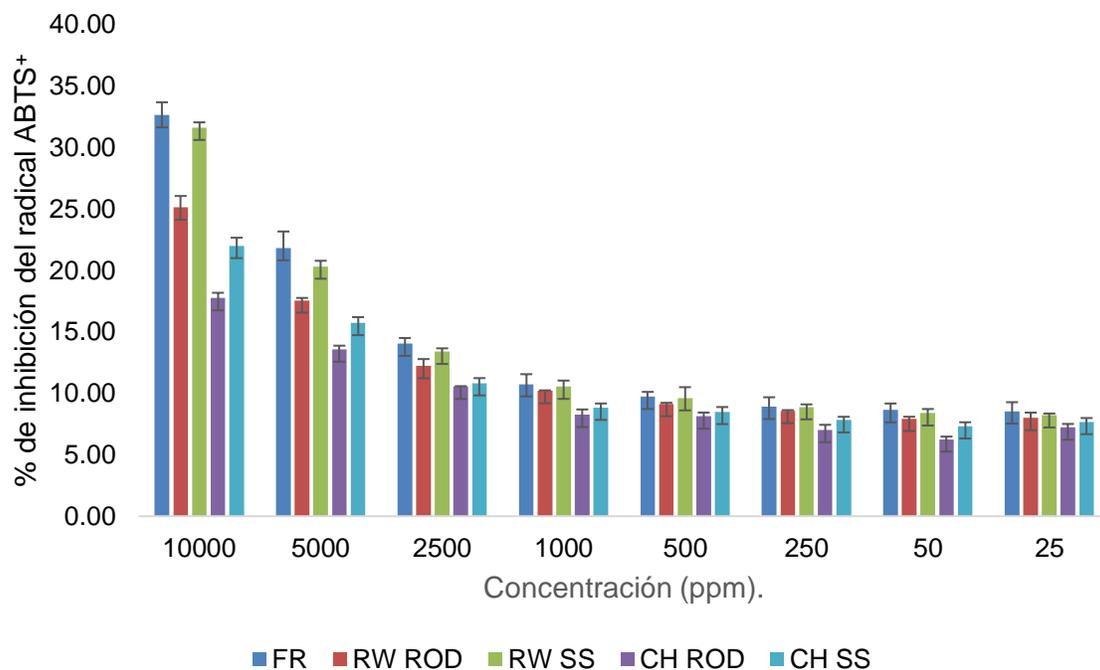


Figura 13. Actividad antioxidante por el método ABTS⁺ del betabel secado en dos estados físicos diferentes. (FR: fresco, RWTM ROD: Secado RWTM del betabel en rodajas, RWTM SS: Secado RWTM del betabel en semisólido, CH ROD: Secado en charolas del betabel en rodajas, CH SS: Secado en charolas del betabel en semisólido), ppm: partes por millón.

Los resultados obtenidos en el caso del secado por ventana refractiva del betabel en estado semisólido, podrían explicarse debido a que la reducción del tamaño de partícula favorece la reducción del tiempo de secado y el contenido de humedad pues se aumenta la superficie de contacto, favoreciendo la transmisión de calor por

radiación infrarroja que se transmite a través de la película de Mylar ayude a secar más rápidamente las muestras, permitiendo de esta manera la mayor retención de compuestos fenólicos y flavonoides y por tanto manteniendo la capacidad antioxidante como si fueran muestras de betabel fresco.

Trabajos como el Calderón-Chiu et al. (2020) en donde empleó betabel y secado por RWTM coincide en la conducta establecida en este trabajo, aun cuando la capacidad antioxidante fue mayor en esa investigación, quizás fue debido a la diferencia en la técnica empleada en la extracción de los compuestos antioxidantes y al estado de madurez debido a la época de cosecha del betabel. Entre los dos métodos aplicados se nota claramente una reducción del % de inhibición como capacidad antioxidante a medida que se reduce la concentración del extracto como era de esperarse. También se observó que en el método de ABTS⁺ los valores de % de inhibición fueron mayores que los obtenidos por DPPH⁺ esto puede explicarse debido a que el método de ABTS⁺ posee una elevada sensibilidad, es práctico, rápido y más estable, así mismo es específico tanto para compuestos de naturaleza hidrofílica y como de naturaleza lipofílica favoreciendo así una mayor captación de compuestos antioxidantes presentes en las muestras evaluadas.

De manera general la retención de los parámetros de calidad evaluados, como lo fueron color, CPT, CFT y la AA de las muestras secadas por RWTM principalmente en las muestras analizadas en el estado semisólido pueden explicarse debido a que la transferencia de calor en este tipo de secado se da principalmente por radiación infrarroja, además de que en este secador cuando el alimento alcanza niveles de humedad más bajos, la energía infrarroja se refracta de tal manera que la cantidad de calor transmitida se vuelve mínima, por lo que se puede evitar la aplicación excesiva de calor por conducción en el alimento, donde la minimización del calor por este medio favorece la obtención de alimentos secos con una mayor retención en los parámetros de calidad (Barbosa-Cárnovas y Uliano, 2004).

4.7 CÁLCULO DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DEL SECADOR POR RW™ Y SECADOR CONVECTIVO.

En la tabla 7 se pueden observar los valores de humedad removida y tiempo de secado obtenidos por el secador RW™ y charolas del betabel secado en estado sólido y semisólido, los cuales fueron utilizados para realizar el cálculo de la tasa de evaporación y así posteriormente realizar los cálculos de la energía de evaporación y la eficiencia energética general de los secadores.

Tabla 7. Humedad removida y tiempo de secado obtenidos por el secador RW™ y charolas del betabel en sus dos estados físicos.

TIPO DE SECADOR	ESTADO	HUMEDAD REMOVIDA (kg)	TIEMPO DE SECADO (s)
SECADOR POR RW™	SÓLIDO	0.42 ± 3.04 ^{-3a}	2400
	SEMISÓLIDO	0.28 ± 2.19 ^{-3b}	1800
SECADOR POR CHAROLAS	SÓLIDO	0.37 ± 8.06 ^{-3c}	6000
	SEMISÓLIDO	0.36 ± 1.07 ^{-3c}	4800

RW™: Ventana Refractiva.

*Los resultados representan el promedio ± DS de dos determinaciones.

**Letras diferentes en la misma columna indican que hay diferencia significativa de $p < 0.05$

En la tabla 8 se pueden observar los resultados obtenidos del cálculo de la tasa de evaporación Q , la energía de evaporación E_{Ev} y la eficiencia energética general EE_g para los secadores por RW™ y charolas donde se utilizaron las ecuaciones 10, 11 y 12 respectivamente de la metodología de Abonyi et al. (1999). Analizando los resultados obtenidos se observó que se presentaron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre los secadores como era de esperarse. Esto fue debido a que existe una diferencia notoria entre los tiempos de secado utilizados entre un tipo de secador y otro siendo los valores más bajos obtenidos cuando se utilizó el secador por RW™ favoreciendo así, que al realizar el cálculo primeramente de la tasa de evaporación se obtuvieran resultados diferentes. Otro factor importante fue la aplicación de energía que se llevó a cabo en cada secador pues al utilizar el secador por charolas el consumo de energía fue mayor provocando que al calcular la eficiencia energética de este se obtuvieran valores muy bajos, en comparación con

los obtenidos en el secador por RWTM donde el consumo de energía fue la mitad de la utilizada en el secador por charolas provocando que los resultados de eficiencia energética fueran superiores.

Tabla 8. Tasa de evaporación, Energía de evaporación y Eficiencia energética general para el secador por RWTM y charolas.

Tipo de secador		
Estado del alimento	Secador por RW TM	Secador por charolas
Tasa de evaporación Q (kg/s).		
Sólido	$1.73^{-4} \pm 1.27^{-6}$ ^{aA}	$6.09^{-5} \pm 1.34^{-6}$ ^{aB}
Semisólido	$1.53^{-4} \pm 1.22^{-6}$ ^{bA}	$7.56^{-5} \pm 0.22^{-6}$ ^{bB}
Energía de evaporación E_{Ev} (kW).		
Sólido	0.39 ± 2.86^{-3} ^{aA}	0.14 ± 3.03^{-3} ^{aB}
Semisólido	0.35 ± 2.75^{-3} ^{bA}	0.17 ± 0.50^{-3} ^{bB}
Eficiencia energética en general EE_g (%).		
Sólido	33.05 ± 0.24 ^{aA}	6.35 ± 0.14 ^{aB}
Semisólido	39.02 ± 0.31 ^{bA}	9.91 ± 0.03 ^{bB}

Q= Humedad removida/ tiempo de secado; E_{Ev}= Tasa de evaporación* calor latente de evaporación; EE_g= (Energía de evaporación/ Energía total de entrada) *100

*Los resultados representan el promedio \pm DS de dos determinaciones.

**Letras minúsculas diferentes en columnas indican que hay diferencia estadística significativa (p<0.05).

***Letras mayúsculas diferentes en filas indican que hay diferencia estadística significativa (p<0.05).

Así mismo se reportaron que las muestras secadas en un mismo secador, pero en diferente estado físico presentaron diferencias significativas (p<0.05). Esto se explica debido a que en las muestras en estado semisólido el tamaño de partícula fue menor, favoreciendo así una mayor superficie de contacto lo que provocó una disminución notable en el tiempo de secado utilizado, por lo que al calcular la energía utilizada para secar estas muestras fueron obtenidos valores más bajos que los utilizados para secar las muestras en estado sólido.

Se puede concluir que la eficiencia energética general (EE_g) fue más alta utilizando secado por RWTM obteniendo valores de 39.02% y 33.05%, mientras que por secado

por charolas se encontró un 9.91% y 6.35% para el betabel secado en estado semisólido y en rodajas respectivamente. Lo anterior fue debido a un mayor consumo de energía en el secador por charolas debido al diseño de sus resistencias eléctricas en serie, sumado al consumo de energía del motor para mover el ventilador que proporciona el aire de secado y al prolongado tiempo que necesitan las muestras para secarse. Mientras que el consumo de energía empleando el secador RWTM fue prácticamente la mitad del consumo de energía que el empleado por secador de charolas, ya que se consideraron resistencias eléctricas de menor consumo de energía, un motor de ventilador más pequeño y de menor potencia y el motor que inicialmente movería la banda donde se aplica la película de Mylar no fue utilizado, ya que se consideró un secado por ventana refractiva por lote en lugar de hacerlo continuo, por la dificultad de secar el estado semisólido (tipo puré) del betabel. Estos resultados pueden compararse con los obtenidos por Abonyi et al. (1999) donde encontraron que el secador por RWTM presenta una eficiencia energética general que va en un intervalo de 23.4 a 34.3% cuando secaron muestras de puré de zanahoria y fresa, asimismo con lo obtenido por Baeghbali et al. (2016) que cuando secaron jugo de granada obtuvieron una eficiencia energética de 31.56%. En ambos estudios se comparó el equipo de secado por RWTM con diferentes secadores, siendo éste el que presentó una mayor eficiencia energética como lo encontrado en este estudio.

CONCLUSIONES

V. CONCLUSIONES.

- Utilizando la misma temperatura en los dos métodos de secado empleados: RWTM y secado por charolas, el tiempo de secado y el contenido de humedad fueron más bajos en las muestras cuando fue empleando la tecnología de secado por RWTM.
- El estado semisólido del betabel obtuvo valores más bajos de contenido de humedad que el betabel en rodajas en los dos métodos de secado empleados. Con lo que se puede concluir que esta una de las formas más convenientes de secar los alimentos.
- La actividad de agua fue mayormente reducida empleando la tecnología de secado por RWTM que empleando secado por charolas en los dos estados físicos empleados del betabel.
- Debido probablemente a un rompimiento interno de las células y formación de canales internos, el estado semisólido del betabel permitió obtener valores más bajos de actividad de agua en los dos métodos de secado empleados, por lo que se puede concluir que en este estado físico se obtuvo un alimento de baja humedad o seco.
- La diferencia de color (ΔE) en las muestras secadas por RWTM, indicaron que no mostraron diferencia significativa ($p < 0.05$) con respecto al testigo (betabel en fresco), mientras que las muestras secadas por charolas fueron significativamente diferentes ($p < 0.05$) obteniendo valores más elevados.
- Los parámetros de color fueron mayormente retenidos con el empleo del secador ventana refractiva en el estado semisólido del betabel. No presentando diferencias significativas con los parámetros de color del betabel en fresco.
- El CPT y el CFT como parámetros de calidad fueron mayormente retenidos en los dos estados físicos del betabel empleando RWTM que empleando secador convectivo de charolas.

- La capacidad antioxidante fue congruente con el contenido de polifenoles totales, es decir a mayor CPT hubo mayor CA en las muestras secas tanto por RWTM como por secado por charolas. Principalmente por el método RWTM se retuvo a la CA como un parámetro de calidad del betabel secado.
- La capacidad antioxidante obtenida por el método de DPPH⁺ en las muestras secadas por RWTM en el estado semisólido fue similar a las muestras en fresco de betabel. El resto de las muestras mostraron diferencias significativas con la muestra de betabel en fresco.
- La capacidad antioxidante obtenida por el método de ABTS⁺ en las muestras secadas por RWTM en el estado sólido y semisólido fue similar a las muestras en fresco de betabel hasta la concentración máxima del extracto de 1000 ppm no presentando diferencias estadísticas. El resto de las muestras de secado por charolas mostraron diferencias con la muestra de betabel en fresco.
- La eficiencia energética general (EEG) fue más alta utilizando secado por ventana refractiva hasta un 38.80%, mientras que por secado por charolas donde solo se encontró un 9.91%. Indicando con esto un mayor consumo de energía en el secado tradicional por charolas en comparación con el secador RWTM.
- Por el momento, el secado con tecnología de ventana refractiva (RWTM) ha resultado en una mayor retención de los parámetros de calidad del betabel fresco como el contenido de humedad, actividad de agua, color, CPT y CA que los obtenidos por el secador de charolas.
- El equipo de secado por RWTM elaborado en el ITTux utilizado en este estudio obtuvo resultados que pueden ser comparados con los secadores RWTM utilizados en otros estudios, por lo que se indica que tuvo un buen diseño.

REFERENCIAS

VI. REFERENCIAS.

- Abonyi, B. I., Feng, H., Tang, J., Edwards, C. G., Chew, B. P., Mattinson, D. S., ytopuz Fellman, J. K. (2002). Quality retention in strawberry and carrot purees dried with Refractance Window™ system. *Journal of Food Science*, 67(3), 1051-1056.
- Abonyi, B.I., Tang, J., Edwards, C.G. (1999). Evaluation of energy efficiency and quality retention for the Refractance Window™ drying system. Research Report, Washington State University, Pullman.
- Abul-Fadl, M. M., y Ghanem, T. H. (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(7), 953-965
- Aguirre García, M., (2017). *Estudio de la transferencia de masa y capacidad antioxidante durante la impregnación de una matriz de manzana (malus domestica l.) con jugo de betabel* (Master's thesis, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla).
- Álvarez, A. y Corzo, O. 2012. Estudio de la variación del color en láminas de mango (mangifera indicial.) variedad hilacha, en tres estadios, durante el secado a diferentes condiciones. *Revista Multidisciplinaria del Consejo de Investigación de la Universidad de Oriente* 24(1): 69-75.
- Antigo, Y.; Bergamasco, R.; Madrona, G. 2018. Effect of pH on the stability of red beet extract (*Beta vulgaris* L.) microcapsules produced by spray drying or freeze drying. *Food Sci. Technol.* 38(1): 72-77.
- AOAC International. (2005). *Official methods of analysis of AOAC International*. AOAC International.
- Arnao, M. B. (2000). Some methodological problems in the determination of antioxidant activity using chromogen radicals: a practical case. *Trends in Food Science & Technology*, 11(11), 419-421.

- Avella, D. M. G., García, C. A. O., y Cisneros, A. M. (2008). Medición de fenoles y actividad antioxidante en malezas usadas para alimentación animal. Universidad Autónoma de Queretano. México.
- Azeredo, H. M. (2009). Betalains: properties, sources, applications, and stability—a review. *International journal of food science & technology*, 44(12), 2365-2376
- Azizi, D., Jafari, S. M., Mirzaei, H., y Dehnad, D. (2017). The influence of refractance window drying on qualitative properties of kiwifruit slices. *International Journal of Food Engineering*, 13(2).
- Baeghbalı, V., Niakousari, M., y Farahnaky, A. (2016). Refractance Window drying of pomegranate juice: quality retention and energy efficiency. *LWT-Food Science and Technology*, 66, 34-40.
- Baker, C. G. J., y McKenzie, K. A. (2005). Energy consumption of industrial spray dryers. *Drying Technology*, 23(1-2), 365-386.
- Balasundram N., Sundram K. y Samman S. (2006). Phenolic compounds in plants and agri-industrial by-products: Antioxidant activity, occurrence, and potential uses. *Food Chemistry*, 99, 191-203.
- Barbosa-Cánovas, G. V., y Uliano, P. J. (2004). Adaptation of classical processes to new technical developments and quality requirements. *Journal of food science*, 69(5), E240-E250.
- Bazaria, B., & Kumar, P. (2016). Compositional Changes in Functional Attributes of Vacuum Concentrated Beetroot Juice. *Journal of Food Processing and Preservation*, 40(6), 1215-1222.
- Bolland, K.M., 2000. A new low-temperature/short-time drying process. *Cereal Foods World*. 45, 293–296.
- Braca, A., Sortino, C., Politi, M., Morelli, I., & Mendez, J. (2002). Antioxidant activity of flavonoids from *Licania licaniaeflora*. *Journal of ethnopharmacology*, 79(3), 379-381.
- Butera, D., Tesoriere, L., Di Gaudio, F., Bongiorno, A., Allegra, M., Pintaudi, A. M., Kohen, R. & Livrea, M. A. (2002). Antioxidant activities of Sicilian prickly

pear (*Opuntia ficus indica*) fruit extracts and reducing properties of its betalains: betanin and indicaxanthin. *Journal of agricultural and food chemistry*, 50(23), 6895-6901.

- Cadwallader, K., Moore, J., Zhang, Z., y Schmidt, S. 2010. Comparison of spray drying and Refractance Window™ drying technologies for the encapsulation of orange oil. In C.T. Ho, C. J. Mussinan, F. Shahidi, & E. T. Contis, *Recent Advances in Food and Flavor Chemistry: Food Flavors and Encapsulation* (p.p. 246-254). The Royal Society of Chemistry.
- Cai, Y., Sun, M., & Corke, H. (2003). Antioxidant activity of betalains from plants of the Amaranthaceae. *Journal of agricultural and food chemistry*, 51(8), 2288-2294.
- Cai, Y., Sun, M., Schliemann, W., & Corke, H. (2001). Chemical stability and colorant properties of betaxanthin pigments from *Celosia argentea*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 49(9), 4429-4435.
- Calderón-Chiu, C., Martínez-Sánchez, C. E., Rodríguez-Miranda, J., Juárez-Barrientos, J. M., Carmona-García, R., & Herman-Lara, E. (2020). Evaluation of the combined effect of osmotic and Refractance Window drying on the drying kinetics, physical, and phytochemical properties of beet. *Drying Technology*, 38(12), 1663-1675.
- Caparino, O. A., Sablani, S. S., Tang, J., Syamaladevi, R. M., y Nindo, C. I. (2013). Water sorption, glass transition, and microstructures of refractance window–and freeze-dried mango (Philippine “Carabao” Var.) powder. *Drying Technology*, 31(16), 1969-1978.
- Capariño, O., Tang, J., Nindo, C., Sablani, S., Powers, J., & Fellman, J. (2012). Effect of drying methods on the physical properties and microstructures of mango (Philippine ‘Carabao’ var.) powder. *Journal of Food Engineering*, 111, 135–148.
- Caparino, O.A., Tang, J., Nindo, C.I., Sablani, S.S., Powers, J.R., Fellman, J.K., 2012. Effect of drying methods on the physical properties and

microstructures of mango (Philippine “Carabao” var.) powder. *J. Food Eng.* 111, 135–148.

- Cardona, J. E. C., y Díez, M. P. S. (2020). Evaluación de la estabilidad de probióticos LactoSpore® en pulpa de tomate de árbol (*Solanum betaceum*) variedad amarillo común, deshidratada por ventana refractiva. @ *limentech, Ciencia y Tecnología Alimentaria*, 18(1), 34-44.
- Carmo, R.; Ribeiro, R.; Campelo, P.; Barros, R.; Oliveira, E.; Abreu, T., Borges, S.; Alvarenga, D. 2018. Stability of spray-dried beetroot extract using oligosaccharides and whey proteins. *Food Chemistry* 249: 51-59.
- Castoldi, M., Zotarelli, M. F., Durigon, A., Carciofi, B. A. M., & Laurindo, J. B. (2015). Production of tomato powder by refractance window drying. *Drying Technology*, 33(12), 1463-1473.
- Celli, G. B., Khattab, R., Ghanem, A., y Brooks, M. S. L. (2016). Refractance Window™ drying of haskap berry—preliminary results on anthocyanin retention and physicochemical properties. *Food chemistry*, 194, 218-221.
- Coles, L. y Clifton, P. (2012). Effect of beetroot juice on lowering blood pressure in free-living, disease-free adults: a randomized, placebo-controlled trial. *Nutrition Journal*. 11(106): 1-6.
- Cortés, M. y Chiralt, A. 2008. Cinética de los cambios de color en manzana deshidratada por aire fortificada con vitamina E. *Revista de la facultad de química farmacéutica* 15 (1): 8-16.
- Feng, H. ,Tang, J and Cavalieri, R. P. 1999. Combined microwave and sprouted bed drying of diced apples: Effect of drying conditions on drying kinetics and product temperature, *Drying Technology*, 17(10): 1981-1998.
- Franco, S., Jaques, A., Pinto, M., Fardella, M., Valencia, P., Núñez, H., Ramírez, C. y Simpson, R. (2019). Dehydration of salmon (Atlantic salmon), beef, and apple (Granny Smith) using Refractance window™: Effect on diffusion behavior, texture, and color changes. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 52, 8-16.

- Fuentes-Barría, H., Muñoz Peña, D., Aguilera Eguía, R., & González Wong, C. (2018). Influencia de los compuestos bioactivos de betarraga (*Beta vulgaris* L) sobre el efecto cardio-protector: Una revisión narrativa. *Revista chilena de nutrición*, 45(2), 178-182.
- Gamboa, D., Ibáñez, D., Meléndez, M., Paredes, E., y Siche, R. (2014). Secado de lúcuma (*Pouteria obovata*) empleando la técnica de Ventana Refractante™. *Scientia Agropecuaria*, 5(2), 103-108.
- Gentile, C., Tesoriere, L., Allegra, M., Livrea, M. A., & D'alessio, P. (2004). Antioxidant betalains from cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) inhibit endothelial ICAM-1 expression. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1028(1), 481-486.
- Gil G., Villa J., Ayala-Zavala J., Basilio-Heredia J., Sepulveda D., Yahia E. Y González-Aguilar G. (2013). Technologies for extraction and production of bioactive compounds to be used as nutraceuticals and food ingredients: an overview. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 12(1), 5-23.
- Gilabert, E. 1992. Medida del color. Servicio de publicaciones. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia.
- Gimeno Creus, E. (2004). Compuestos fenólicos totales. Un análisis de sus beneficios para la salud. *Farmacia y Salud*, Oficina de Farmacia, 23, 80-84.
- Gómez, M. N., y Duque-Cifuentes, A. L. (2018). Caracterización fisicoquímica y contenido fenólico de la remolacha (*Beta vulgaris* L.) en fresco y sometida a tratamiento térmico. *Revista Ion*, 31(1), 43-47.
- Heimler, D., Vignolini, P., Dini, M. G., & Romani, A. (2005). Rapid tests to assess the antioxidant activity of *Phaseolus vulgaris* L. dry beans. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53(8), 3053-3056.
- Hernández-Santos, B., Martínez-Sánchez, C. E., Torruco-Uco, J. G., Rodríguez-Miranda, J., Ruiz-López, I. I., Vajando-Anaya, E. S., Carmona-García R. & Herman-Lara, E. (2016). Evaluation of physical and chemical

properties of carrots dried by Refractance Window drying. *Drying Technology*, 34(12), 1414-1422.

- Huang, D., Ou, B., y Prior, R. L. (2005). The chemistry behind antioxidant capacity assays. *Journal of agricultural and food chemistry*, 53(6), 1841-1856.
- Imeh, U., y Khokhar, S. (2002). Distribution of conjugated and free phenols in fruits: antioxidant activity and cultivar variations. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(22), 6301-6306.
- Jafari, S.M., Azizi, D., Mirzaei, H., Dehnad, D., 2016. Comparing quality characteristics of oven-dried and refractance window-dried kiwifruits. *J. Food Process. Preserv.* 40 (3), 362e372.3
- Jain, P., Gupta, A., Pathak, M. y Khanna, N. (2017). Effect of process conditions on the physicochemical properties of fermented beet root juice powder produced by spray drying. *Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci.* 6(12): 4209-4216.
- Jangam, S.V. and Mujumdar, A.S. Basic Concepts and Definitions, in *Drying of Foods, Vegetables and Fruits - Volume 1*, Ed. Jangam, S.V., Law, C.L. and Mujumdar, A.S., 2010, ISBN - 978-981-08-6759-1, Published in Singapore, pp. 1-11
- Jangam, S.V., 2011. An overview of recent developments and some R&D challenges related to drying of foods. *Drying Technol. Int. J.* 29 (12), 1343–1357.
- Jangman, S., Law, C. y Mujumdar, A. (Ed.). (2010). *Drying of Foods, vegetables and fruits. Volume 1.*
- Kanner, J., Harel, S., & Granit, R. (2001). Betalains a new class of dietary cationized antioxidants. *Journal of Agricultural and Food chemistry*, 49(11), 5178-5185.
- Kaspar, K. L., Park, J. S., Mathison, B. D., Brown, C. R., Massimino, S., y Chew, B. P. (2012). Processing of pigmented-flesh potatoes (*Solanum tuberosum* L.) on the retention of bioactive compounds. *International journal of food science & technology*, 47(2), 376-382.

- Kim, D. O., Lee, K. W., Lee, H. J., y Lee, C. Y. (2002). Vitamin C equivalent antioxidant capacity (VCEAC) of phenolic phytochemicals. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(13), 3713-3717.
- Kowalski, S. J., Szadzińska, J., & Pawłowski, A. (2015). Ultrasonic-assisted osmotic dehydration of carrot followed by convective drying with continuous and intermittent heating. *Drying Technology*, 33(13), 1570-1580.
- Kowalski, S. J., y Mierzwa, D. (2013). Influence of osmotic pretreatment on kinetics of convective drying and quality of apples. *Drying technology*, 31(15), 1849-1855.
- Kudra, T. (2004). Energy aspects in drying. *Drying Technology*, 22(5), 917-932.
- Kuskoski, E. M., Asuero, A. G., García-Parilla, M. C., Troncoso, A. M., y Fett, R. (2004). Actividad antioxidante de pigmentos antocianicos. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 24(4), 691-693
- Leyva, D. E., 2009. Determinación de antocianinas, fenoles totales y actividad antioxidante en licores y fruto de mora. Oaxaca: UTM.
- Li, A. N., Li, S., Zhang, Y. J., Xu, X. R., Chen, Y. M., & Li, H. B. (2014). Resources and biological activities of natural polyphenols. *Nutrients*, 6(12), 6020-6047.
- Macías Candelario, R. B., y Suárez Silva, J. L. (2019). *Determinación de polifenoles totales y actividad antioxidante de la cáscara de veteraba (Beta vulgaris L.)* (Doctoral dissertation, Universidad de Guayaquil. Facultad de Ciencias Químicas).
- Magoon, R. E. (1986). *U.S. Patent No. 4,631,837*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Manach, C., Scalbert, A., Morand, C., Rémésy, C., y Jiménez, L. (2004). Polyphenols: food sources and bioavailability. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 727 - 747.

- Manchali, S., Murthy, K. N. C., Nagaraju, S., & Neelwarne, B. (2013). Stability of betalain pigments of red beet. In *Red beet biotechnology* (pp. 55-74). Springer, Boston, MA.
- Marqués, L. G., Prado, M. M., y Freire, J. T. (2009). Rehydration characteristics of freeze-dried tropical fruits. *LWT-Food Science and Technology*, 42(7), 1232-1237.
- Martin KR, Appel CL. Polyphenols as dietary supplements: a double-edged sword. *Nutr Diet Suppl* 2010; 2: 1-2.
- Molyneux, P. (2004). The use of the stable free radical diphenylpicrylhydrazyl (DPPH) for estimating antioxidant activity. *Songklanakarin J Sci Technol*, 26(2), 211- 219.
- Montoya, B., Lemeshko, V., López, J. B., Pareja, A., Urrego, R., y Torres, R. (2003). Actividad antioxidante de algunos extractos vegetales. *Vitae*, 2, 10
- Moreno, M. 2017. La importancia del color en los alimentos. *Revista Alimentaria*, 6.
- Mujumdar, A. S., & Jangam, S. V. (2011). Some innovative drying technologies for dehydration of foods. *Proceedings of ICEF, Athens, Greece*, 555-556.
- Mujumdar, A.S., 2010. Drying R&D past, present and future. In: Jangam, S.V., Thorat, B.N. (Eds.), *R&D Needs, Challenges and Opportunities for Innovation in Drying Technology*. e-Book.
- Mujumdar, A.S., Ed. Chapter 40. *Handbook of Industrial Drying*, 2nd Ed.; Marcel Dekker, Inc.: NY, 1995.
- Mujumdar, A.S., Wu, Z.H., 2010. Thermal drying technologies: new developments and future R&D potential. In: Jangam, S.V., Thorat, B.N. (Eds.), *R&D Needs, Challenges and Opportunities for Innovation in Drying Technology*, e-Book.
- Neelwarne, B., & Halagur, S. B. (2013). Red beet: an overview. *Red Beet Biotechnology*, 1-43.

- Nindo, C. (2008). Novel Drying Method for Vegetables, Fruits, Herbs, and Aquatic Resources. CSBE/SCGGA 2008 Annum Conference Vancouver. *British Columbia July*.
- Nindo, C. I., Powers, J. R., y Tang, J. (2007). Influence of Refractance Window evaporation on quality of juices from small fruits. *LWT-Food Science and Technology*, 40(6), 1000-1007.
- Nindo, C. I., Tang, J., Cakir, E., y Powers, J. R. (2006). Potential of Refractance Window technology for value added processing of fruits and vegetables in developing countries. In 2006 ASAE Annual Meeting (p. 1). American Society of Agricultural and Biological Engineers.
- Nindo, C. I., y Tang, J. (2007). Refractance window dehydration technology: a novel contact drying method. *Drying technology*, 25(1), 37-48.
- Nindo, C., Feng, H., Shen, G., Tang, J., y Kang, D. (2003a). Energy utilization and microbial reduction in a new film drying system. *Journal of Food Processing and Preservation*, 27 (2) , 117–136.
- Nindo, C., Sun, T., Wang, S., Tang, J., y Powers, J. (2003b). Evaluation of drying technologies for retention of physical quality and antioxidants in asparagus (*Asparagus officinalis*, L.). *Lebensmittel Wissenschaft und Technologie*, 36, 507–516.
- Nindo, C., Tang, J., Powers, J., y Bolland, K. (2004). Energy consumption during Refractance Window evaporation of selected berry juices. *International Journal of Energy Research*, 28, 1089–1100.
- Ochoa-Martínez, C. I., Quintero, P. T., Ayala, A. A., y Ortiz, M. J. (2012). Drying characteristics of mango slices using the Refractance Window™ technique. *Journal of Food engineering*, 109(1), 69-75.
- Ocoro, M., y Ayala, A. (2012). Evaluation of the refractance window™ technique on drying of papaya (*Carica papaya* L.) purée. *Vitae*, 19(1), 72-74.
- Okos, M.R.; Narsimhan, G.; Singh, R.K.; Weitnauer, A.C. Food Dehydration. In *Handbook of Food Engineering*, Heldman, D.R.; Lund, D.B., Eds.; New York: Marcel Dekker, 437-562, 1992.

- Oroian, M., & Escriche, I. (2015). Antioxidants: Characterization, natural sources, extraction and analysis. *Food Research International*, 10 - 36.
- Ortega, F. 2013. Determinación de los parámetros cinéticos de transferencia de masa, color y fuerza máxima de fracturas de rodajas de yuca (*Manihot esculenta* Crantz) sometidas a freído por Inmersión, Tesis Master en Ciencias Agroalimentarias con énfasis en Ingeniería, Universidad de Córdoba, Montería-Sede Berastegui.
- Ortiz-Jerez, M. J., Gulati, T., Datta, A. K., y Ochoa-Martinez, I. C. (2015). Quantitative understanding of Refractance Window (TM) drying. *Food and Bioproducts Processing*, 95, 237-253.
- Pavan, M., Schmidt, S., y Feng, H. (2012). Water sorption behavior and thermal analysis of freeze-dried, Refractance Window-dried and hot-air dried açai (*Euterpe oleracea* Martius) juice. *LWT - Food Science and Technology*, 48, 75-81.
- Pedreño, M. A., y Escribano, J. (2001). Correlation between antiradical activity and stability of betanine from *Beta vulgaris* L roots under different pH, temperature and light conditions. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 81(7), 627-631.
- Pisoschi, A., y Pop, A. (2015). The role of antioxidants in the chemistry of oxidative stress: A review. *European Journal of Medicinal Chemistry*, 55 - 74.
- Rahman, M.S.; Labuza, T.P. Water activity and food preservation. In *Handbook of Food Preservation*; Rahman, M.S., Ed.; Marcel Dekker, Inc.: New York, 1999; 339–382.
- Ratti, C., (2005) Freeze drying of plant products: where we are and where we are heading to. *Stewart Post-harvest Rev* 4:5–12
- Ratti, C., y Mujumdar, A. (1995). Infrared Drying. En A. Mujumdar, *Handbook of Industrial Drying* (Vol. Vol. 1, pages. 1–39). New York: Ed. Marcel Dekker.
- Re, R., Pellegrini, N., Proteggente, A., Pannala, A., Yang, M., & Rice-Evans, C. (1999). Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation

decolorization assay. *Free radical biology and medicine*, 26(9-10), 1231-1237

- Reddy, M. K., Alexander-Lindo, R. L., & Nair, M. G. (2005). Relative inhibition of lipid peroxidation, cyclooxygenase enzymes, and human tumor cell proliferation by natural food colors. *Journal of agricultural and food chemistry*, 53(23), 9268-9273
- Ricco, R., Agudelo, I., & Wagner, M. (2015). Métodos empleados en el análisis de los polifenoles en un laboratorio de baja complejidad. *Lilloa*, 161 - 174.
- Sabarez, H. T. (2015). Modelling of drying processes for food materials. In *Modeling food processing operations* (pp. 95-127).
- Sabarez, H. T., Gallego-Juaréz, J. A., & Riera, E. (2012). Ultrasonic-assisted convective drying of apple slices. *Drying Technology*, 30(9), 989-997.
- Sabarez, H.T., 2012. Computational modeling of the transport phenomena occurring during convective drying of prunes. *J. Food Eng.* 111 (2), 279–288.
- Sagar, V. R., Kumar, P. S. (2010). Recent advances in drying and dehydration of fruits and vegetables: a review. *Journal of food science and technology*, 47(1), 15-26.
- Singh, B., Hathan, B. S., Devi, C., Memorial, L., y Longowal, S. (2014). Chemical composition, functional properties and processing of beetroot—a review. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 5(1), 679-684.
- Singleton, V. L., & Rossi, J. A. (1965). Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. *American journal of Enology and Viticulture*, 16(3), 144-158.
- Stintzing F.C. and Carle R. 2004. Functional Properties of Anthocyanins and betalains in plants, food and human nutrition. *Trends in Food Science and Technology*. 15: 19-38.
- Stintzing, F. C., Herbach, K. M., Mosshammer, M. R., Carle, R., Yi, W., Sellappan, S., Akoh, C. C., Bunch, R. & Felker, P. (2005). Color, betalain

- pattern, and antioxidant properties of cactus pear (*Opuntia* spp.) clones. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53(2), 442-451. CHECAR
- Strawinski, A. Proposal for Determination of Thermal Efficiency Factor for a Dryer, In Proc. of the Third International Drying Symposium, Ashworth, J.C., Ed.; Birmingham, England, 1982; Vol. 1.
 - Sumaya-Martínez, M. T., Suárez-Diéguez, T., Cruz-Cansino, N. D. S., AlanísGarcía, E., y Sampedro, J. G. (2010). Innovación de productos de alto valor agregado a partir de la tuna mexicana. *Rev. Mex. Agronegocios*, 27, 435-441.
 - Tesoriere, L., Butera, D., Allegra, M., Fazzari, M., & Livrea, M. A. (2005). Distribution of betalain pigments in red blood cells after consumption of cactus pear fruits and increased resistance of the cells to ex vivo induced oxidative hemolysis in humans. *Journal of agricultural and food chemistry*, 53(4), 1266-1270.
 - Tirado, D. F., Acevedo Correa, D., y Montero Castillo, P. M. (2016). Secado de rodajas de fruto del árbol del pan mediante la técnica de Ventana Refractiva®. *TecnoLógicas*, 19(36), 103-111.
 - Tojo R. y Leis R. (2006). Alimentos Funcionales: Su Papel en la Nutrición Preventiva y Curativa. Asturias, España.
 - Tontul, İ., Ergin, F., Eroğlu, E., Küçükçetin, A., & Topuz, A. (2018b). Physical and microbiological properties of yoghurt powder produced by refractance window drying. *International Dairy Journal*, 85, 169-176.
 - Tontul, İ., Kasimoglu, Z., Asik, S., Atbakan, T., & Topuz, A. (2018a). Functional properties of chickpea protein isolates dried by refractance window drying. *International journal of biological macromolecules*, 109, 1253-1259.
 - Tontul, I., y Topuz, A. (2017). Effects of different drying methods on the physicochemical properties of pomegranate leather (pestil). *LWT*, 80, 294-303.

- Topuz, A., Dincer, C., Özdemir, K. S., Feng, H., y Kushad, M. (2011). Influence of different drying methods on carotenoids and capsaicinoids of paprika (Cv., Jalapeno). *Food chemistry*, 129(3), 860-865.
- Topuz, A., Fenag, H., Kushad, M., 2009. The effect of drying method and storage on color characteristics of paprika. *LWT-Food Science and Technology* 42, 1667–1673.
- Tsai, P. J., Sheu, C. H., Wu, P. H., y Sun, Y. F. (2010). Thermal and pH stability of betacyanin pigment of djulis (*Chenopodium formosanum*) in Taiwan and their relation to antioxidant activity. *Journal of agricultural and food chemistry*, 58(2), 1020-1025.
- Vega-Mercado, H., Góngora-Nieto, M. M., & Barbosa-Cánovas, G. V., 2001. Advances in dehydration of foods. *Journal of food engineering*, 49(4), 271-289.
- Vergara, C. 2013. Extracción y estabilización de betalaínas de tuna púrpura (*Opuntia ficus-indica*) mediante tecnología de membranas y microencapsulación, como colorante alimentario. Tesis de Doctorado, Universidad de Chile, Santiago. Chile. 129 pp.
- Von Elbe, J. H. (1977). In *Current Aspects of Food Colorants*, Furia. T., Ed (pp 29-39) Cleveland, Ohio.
- Wootton-Beard, P. C., & Ryan, L. (2011). A beetroot juice shot is a significant and convenient source of bioaccessible antioxidants. *Journal of Functional Foods*, 3(4), 329-334.
- Wootton-Beard, P. C., & Ryan, L. (2011). A beetroot juice shot is a significant and convenient source of bioaccessible antioxidants. *Journal of functional foods*, 3(4), 329-334.
- Wrolstad, R. E., y Smith, D. E. (2010). Color analysis. In *Food analysis* pp. 573-586. Springer US.
- Wu, D., Sun, D. W. 2013. Colour measurements by computer vision for food quality control—A Review. *Trends in Food Science & Technology* 29(1): 5-20

- Yam, K. y Papadakis, S. 2004. A simple digital imaging method for measuring and analyzing color of food surfaces. *Journal of Food Engineering* 61(1): 137-142
- Yam, K. y Papadakis, S. 2004. A simple digital imaging method for measuring and analyzing color of food surfaces. *Journal of Food Engineering* 61(1): 137-142.
- Zapata K, Cortes F, Rojano B. 2013, Polifenoles y actividad antioxidante del fruto de guayaba agria (*Psidium araca*). *Inf.Tecnol*;24(5):103-12.
- Zhishen, J., Mengcheng, T., y Jianming, W. (1999). The determination of flavonoid contents in mulberry and their scavenging effects on superoxide radicals. *Food chemistry*, 64(4), 555-559.
- Zotarelli, M. F., Carciofi, B. A. M., y Laurindo, J. B. (2015). Effect of process variables on the drying rate of mango pulp by Refractance Window. *Food Research International*, 69, 410-417.

