



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA**

**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICO BIOLÓGICAS**

**MAESTRÍA EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS**

Optimización del secado convectivo de nopal (*Opuntia ficus-indica* L.) en trozos y evaluación de parámetros de calidad

**TESIS**

Que presenta

**IBQ. YAMEL GISELA CASTRO BELTRÁN**

Para obtener el grado de

**MAESTRA EN CIENCIA**

**Y**

**TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS**

Directores de Tesis

**DR. JOSÉ DE JESÚS CARO CORRALES**

**DRA. YESSICA VIRIDIANA VÁZQUEZ LÓPEZ**

Culiacán, Sinaloa, México

Noviembre de 2022



Dirección General de Bibliotecas  
Ciudad Universitaria  
Av. de las Américas y Blvd. Universitarios  
C. P. 80010 Culiacán, Sinaloa, México.  
Tel. (667) 713 78 32 y 712 50 57  
dgbuas@uas.edu.mx

## UAS-Dirección General de Bibliotecas

### Repositorio Institucional Buelna

#### Restricciones de uso

Todo el material contenido en la presente tesis está protegido por la Ley Federal de Derechos de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

Queda prohibido la reproducción parcial o total de esta tesis. El uso de imágenes, tablas, gráficas, texto y demás material que sea objeto de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente correctamente mencionando al o los autores del presente estudio empírico. Cualquier uso distinto, como el lucro, reproducción, edición o modificación sin autorización expresa de quienes gozan de la propiedad intelectual, será perseguido y sancionado por el Instituto Nacional de Derechos de Autor.

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial  
Compartir Igual, 4.0 Internacional



Este trabajo fue realizado en el Laboratorio de Mediciones Termofísicas de la Maestría en Ciencia y Tecnología de Alimentos de la Facultad de Ciencias Químico Biológicas de la Universidad Autónoma de Sinaloa, bajo la dirección del Dr. José de Jesús Caro Corrales y la Dra. Yessica Viridiana Vázquez López y la asesoría del Dr. Roberto Gutiérrez Dorado. Contó con financiamiento del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y del Programa de Fomento y Apoyo a Proyectos de Investigación (PROFAPI). Yamel Gisela Castro Beltrán recibió beca de CONACYT y PROFAPI.

## AGRADECIMIENTOS

Estoy profundamente agradecida con mi **esposo Alfredo Romero Gámez**, por inducirme al camino de la superación; sin ese empujón no hubiese podido tomar la decisión de iniciar la maestría. Además, me ha apoyado en todos los obstáculos emocionales que he tenido. Lo extraño, pero aún en la distancia sigo teniendo su apoyo.

Estoy orgullosa y muy agradecida con mi mami **Rosalinda Beltrán Salas** y mi papi **Gustavo Castro Martínez** quienes me han brindado su compañía y han sido parte de los caminos que he tomado. Gracias por siempre aceptar mis decisiones y apoyarlas, no he sido una hija fácil, pero siempre doy gracias a Dios por darme a padres tan maravillosos.

Expreso mi más sincero agradecimiento a mis directores de tesis **Dr. José de Jesús Caro Corrales** y la **Dra. Yessica Viridiana Vázquez López**, estas personas bondadosas, inteligentes y llenas de buenas virtudes me guiaron a un nuevo mundo de conocimientos, al cual no sentía la confianza ni la capacidad de poder entender. Ellos me aconsejaron, me brindaron sus experiencias y siempre me hicieron sentir que podía lograr todo sin limitaciones.

Agradezco a la **Dra. Rosalina Iribe Salazar** y al **Dr. Marco Cesar Carrasco Escalante** por brindarme su apoyo incondicional en los problemas que se presentaron en el proyecto, por darme el tiempo de aclarar dudas y siempre tenerme paciencia cuando no entendía algo. En estos dos años he compartido buenos momentos con estas dos personas y deseo que siempre tengan éxito en todo lo que se propongan.

Gracias al **Dr. Roberto Gutiérrez Dorado** por compartir su tiempo y laboratorio en todo lo que necesitara. El carisma que emana es tan alegre y cálido que me hacía sentir en confianza para poder resolver cualquier duda que tuviese.

A la **Universidad Autónoma de Sinaloa**, en específico a la **Facultad de Ciencias Químico-Biológicas** por ofrecerme la oportunidad de crecer de manera académica y personal.

Estoy muy agradecida con el **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de Alimentos** por el financiamiento económico brindado durante estos dos años.

También, quiero elogiar a mis compañeros de laboratorio: **Felicitas, Melissa, Olivia, Miriam, Edoardo y Benjamín**. Estos maravillosos compañeros, me han brindado un excelente ambiente laboral, son personas únicas (adoran los gatos, Harry Potter, libros de reflexión, les encanta el chisme y Bety la fea), siempre te cuidan y te apoyan en cualquier duda o problema que tengas. Siempre me encantó su compañía, sus anécdotas y su calidez. Espero que siempre mantengan su forma de ser y que nadie los detenga en sus propósitos.

Siempre estaré profundamente agradecida con Dios, por darme la oportunidad de conocer tan increíbles personas, por siempre estar presente en todas las decisiones que tomo, por siempre cuidar a mi familia, a las personas que me rodean y a mí, gracias por todo el infinito amor que me has dado, aunque no lo merezca.

Por último y no menos importante, gracias a mis amigos del *team*: **Yesenia, Ángel, Magui, Claudia, Minne, Fabiola, Valeria, Carlos, Negro, David, Iuza, Iván y Tony**. A mis amigos los conocí en diferentes etapas de mi vida, pero sin importar cuando haya sido, los quiero y los aprecio por igual. Cada uno me ha enseñado lo hermosa que es la amistad, lo difícil que es encontrar personas que te quieran como eres y que siempre estén para ti cuando lo necesites. Aunque ellos no lo saben, me ayudaron a superar mi depresión, a olvidar que estoy sola, me brindaron luz en el momento que más lo necesitaba y me hicieron ver que estoy rodeada de gente que me quiere. Gracias por su tiempo de amistad, siempre estaré agradecida con ustedes y nunca olvidaré nuestros buenos momentos.

## ÍNDICE

	<b>Pág.</b>
ÍNDICE DE FIGURAS.....	IV
ÍNDICE DE CUADROS.....	VIII
I RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	3
II INTRODUCCIÓN.....	5
III REVISIÓN DE LA LITERATURA.....	7
A NOPAL.....	7
1 Generalidades.....	7
2 Contenido nutrimental.....	9
3 Productos derivados del nopal.....	11
4 Importancia económica.....	11
B DESHIDRATACIÓN.....	14
1 Secado.....	14
2 Secado convectivo.....	15
3 Calidad de los alimentos deshidratados.....	20
C OPTIMIZACIÓN.....	26
1 Introducción a la metodología de superficie de respuesta.....	27
D ANTECEDENTES.....	29
IV JUSTIFICACIÓN.....	33
V HIPÓTESIS.....	34

VI	OBJETIVOS.....	35
A	OBJETIVO GENERAL.....	35
B	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	35
VII	MATERIALES Y MÉTODOS.....	36
A	MATERIALES.....	36
1	Materia prima .....	36
B	MÉTODOS.....	36
1	Secado convectivo .....	36
2	Parámetros fisicoquímicos.....	37
3	Parámetro nutrimental .....	39
4	Parámetro enzimático .....	41
5	Parámetros ingenieriles.....	42
6	Diseño experimental .....	50
7	Optimización .....	50
VIII	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	53
A	PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS, NUTRIMENTAL Y ENZIMÁTICO EN TROZOS DE NOPAL FRESCO .....	53
1	Parámetros fisicoquímicos.....	53
2	Parámetro nutrimental .....	55
3	Parámetro enzimático .....	55

B	MODELO DE REGRESIÓN DE PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS, NUTRIMENTAL Y ENZIMÁTICO EN TROZOS DE NOPAL DESHIDRATADO EN UN SECADOR CONVECTIVO.....	56
1	Análisis fisicoquímico .....	56
2	Análisis nutrimental.....	61
3	Análisis enzimático.....	63
C	PARÁMETROS INGENIERILES .....	65
1	Curvas de secado en trozos de nopal .....	65
2	Periodo de velocidad decreciente .....	73
D	CONDICIONES ÓPTIMAS EN EL PROCESO DE SECADO CONVECTIVO DE TROZOS DE NOPAL DESHIDRATADO. ....	80
1	Optimización del secado convectivo (secado en túnel).....	80
2	Parámetros fisicoquímicos, nutrimental y enzimático.....	81
IX	CONCLUSIONES.....	86
X	BIBLIOGRAFÍA .....	88
	ABREVIATURAS.....	103

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Fig.</b>	<b>Título</b>	<b>Pág.</b>
1	Fruto del nopal ( <i>Opuntia ficus-indica</i> L.).	8
2	Curva típica de rapidez de secado, condiciones de secado constantes (Geankoplis 2016).	16
3	Curva de contenido de humedad ( $X$ ) como función del tiempo, condiciones de secado constantes (Geankoplis 2016).	18
4	Escala del color por medio del CIELAB con valores de $L^*$ , $a^*$ y $b^*$ (Cubillas y Japitana 2016).	22
5	Degradación de ácido ascórbico a ácido 2,3-dicetogulónico.	25
6	Gráfico de superficie de respuesta (A) y contorno (B) que muestran el efecto de la temperatura y velocidad de aire sobre la diferencia total de color ( $\Delta E$ ) en trozos de nopal deshidratados en un secador convectivo.	57
7	Gráfico de superficie de respuesta (A) y contorno (B) que muestran el efecto de la temperatura y velocidad de aire sobre la retención de firmeza (% $RF$ ) en trozos de nopal deshidratados en un secador convectivo.	59
8	Gráfico de superficie de respuesta (A) y contorno (B) que muestran el efecto de la temperatura y velocidad de aire sobre la retención de ácido ascórbico (% $RAA$ ) en trozos de nopal deshidratados en un secador convectivo.	61

<b>Fig.</b>	<b>Título</b>	<b>Pág.</b>
9	Gráfico de superficie de respuesta (A) y contorno (B) que muestran el efecto de la temperatura y velocidad de aire sobre la actividad residual de peroxidasa (% <i>POD</i> ) en trozos de nopal deshidratados en un secador convectivo.	64
10	(A) Etapas de la cinética de secado en trozos de nopal en un secador convectivo en el tratamiento suave ( $T = 58.7\text{ °C}$ y $v = 0.6\text{ m/s}$ ) y (B) Efecto de la temperatura y velocidad de aire sobre las cinéticas de secado en el tratamiento suave ( $T = 58.7\text{ °C}$ y $v = 0.6\text{ m/s}$ ), central ( $T = 67.5\text{ °C}$ y $v = 1.0\text{ m/s}$ ) y drástico ( $T = 76.3\text{ °C}$ y $v = 1.4\text{ m/s}$ ) en trozos de nopal.	66
11	Gráfico de superficie de respuesta (A) y contorno (B) que muestran el efecto de la temperatura y velocidad de aire sobre la densidad de flujo de masa ( $N_c$ ) en trozos de nopal deshidratados en un secador convectivo.	70
12	Gráfico de superficie de respuesta (A) y contorno (B) que muestran el efecto de la temperatura y velocidad de aire sobre el coeficiente individual de transferencia de masa ( $k_y$ ) en trozos de nopal deshidratados en un secador convectivo.	72

<b>Fig.</b>	<b>Título</b>	<b>Pág.</b>
13	Difusividad efectiva estimada (A) y cinéticas de secado experimental (B), predichas con el método de pendientes por subperiodos, método de aproximaciones sucesivas y promedio de estas últimas para trozos de nopal en el tratamiento suave ( $T = 58.7\text{ °C}$ y $v = 0.6\text{ m/s}$ ), considerando una $D_e$ constante.	74
14	Difusividades efectivas estimadas (A) y cinéticas de secado experimental (B), predichas considerando una $D_e$ variable en función del tiempo con un comportamiento constante ( $D = D_0$ ), lineal ( $D = D_0 + D_1t$ ) y cuadrático ( $D = D_0 + D_1t + D_2t^2$ ) para el secado convectivo en trozos de nopal en el tratamiento suave ( $T = 58.7\text{ °C}$ y $v = 0.6\text{ m/s}$ ).	76
15	Difusividades efectivas estimadas (A) y cinéticas de secado experimental (B), predichas considerando una $D_e$ variable en función del tiempo con un comportamiento constante ( $D = D_0$ ), lineal ( $D = D_0 + D_1t$ ) y cuadrático ( $D = D_0 + D_1t + D_2t^2$ ) para el secado convectivo en trozos de nopal en el tratamiento central ( $T = 67.5\text{ °C}$ y $v = 1.0\text{ m/s}$ ).	78
16	Difusividades efectivas estimadas (A) y cinéticas de secado experimental (B), predichas considerando una $D_e$ variable en función del tiempo con un comportamiento constante ( $D = D_0$ ), lineal ( $D = D_0 + D_1t$ ) y cuadrático ( $D = D_0 + D_1t + D_2t^2$ ) para el secado convectivo en trozos de nopal en el tratamiento drástico ( $T = 76.3\text{ °C}$ y $v = 1.4\text{ m/s}$ ).	79

<b>Fig.</b>	<b>Título</b>	<b>Pág.</b>
17	Deseabilidad individual y global de las variables de respuesta en condiciones óptimas del proceso de secado convectivo de trozos de nopal deshidratado.	82

## ÍNDICE DE CUADROS

<b>Cuadro</b>	<b>Título</b>	<b>Pág.</b>
1	Información nutrimental del nopal ( <i>Opuntia ficus-indica</i> L.).	10
2	Volumen y valor anual aproximado exportado de nopal por país de destino.	13
3	Combinación de temperatura y velocidad de aire para la optimización del proceso de secado.	51
4	Contenido de humedad crítico respecto al contenido de humedad inicial de trozos de nopal deshidratado en un secador convectivo con diferentes temperaturas y velocidad de aire.	68
5	Condiciones óptimas de las variables de respuesta en trozos de nopal deshidratados en un secador convectivo.	83
6	Comparación de los resultados experimentales en nopal fresco y deshidratado en condiciones óptimas para el color, firmeza, ácido ascórbico y peroxidasa.	85

## I RESUMEN

El nopal es una hortaliza muy consumida por los mexicanos debido a los múltiples beneficios que aporta a la salud; así como también, por su alto contenido de fibra, vitaminas (A y C) y minerales (potasio y calcio). El secado es una técnica de conservación que disminuye el contenido de humedad del alimento hasta estabilizarlo químicamente, inhibe la proliferación de microorganismos y prolonga la vida de anaquel. El objetivo de este trabajo fue optimizar el proceso de secado convectivo de nopal (*Opuntia ficus-indica* L.) en trozos con base en parámetros fisicoquímicos (diferencia total de color y retención de firmeza), nutrimental (retención de ácido ascórbico) y enzimático (actividad residual de peroxidasa). Se empleó un diseño central compuesto rotatable, las variables de proceso fueron la temperatura (55 a 80 °C) y la velocidad de aire (0.5 a 1.5 m/s), con 5 niveles de variación y 13 tratamientos. De acuerdo con las variaciones de los factores, se evaluó el color (colorimetría), firmeza (técnica de punción), ácido ascórbico y actividad residual de peroxidasa (espectrofotometría). Así mismo, se determinó el contenido de humedad crítico ( $X_c$ ), se evaluaron los parámetros ingenieriles: densidad de flujo de masa ( $N_c$ ) y coeficiente local de transferencia de masa ( $k_f$ ) en el período de velocidad constante; difusividad efectiva considerada constante y variable ( $D_e$ ) en el periodo de velocidad decreciente. Se modeló la cinética de secado de los trozos de nopal mediante la solución analítica de la segunda ley de Fick. Para obtener las condiciones óptimas en el secado convectivo se utilizó la Metodología de Superficie de Respuesta (MSR). Los resultados mostraron que la diferencia total de color ( $\Delta E$ ) estuvo entre 9.6 a 17.3; la retención de firmeza (%  $RF$ ) fue de 16.2 a 88.6 %; la retención de ácido ascórbico (%  $RAA$ ) se encontró en 27 a 97 %; y la actividad residual de peroxidasa (%  $POD$ ) estuvo en un intervalo de 0 a 80 %. En los parámetros ingenieriles, el  $X_c$  osciló desde 12.9 a 15.3 kg de agua/kg s. s., la  $N_c$  varió entre

$1.84 \times 10^{-4}$  a  $4.98 \times 10^{-4}$  kg agua/m<sup>2</sup>s, el  $k_Y$  fue de  $9.0 \times 10^{-3}$  a  $2.5 \times 10^{-2}$  kg agua/m<sup>2</sup> $\Delta Y$  y la  $D_e$  estuvo entre  $9.92 \times 10^{-11}$  a  $2.69 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s. La difusividad obtenida con la función cuadrática del tiempo permitió generar predicciones satisfactorias ( $R^2 > 0.999$ ) del contenido de humedad, durante todo el período de velocidad decreciente de secado convectivo de nopal en trozos. Las condiciones óptimas del secado convectivo en trozos de nopal fueron de 69.1 °C y 1.5 m/s, con una deseabilidad global de 0.635. Los modelos de predicción de las variables de respuesta se consideraron adecuados y reproducibles, debido a que los resultados experimentales se encontraron dentro del rango predicho por el modelo óptimo.

## ABSTRACT

Nopal is a vegetable widely consumed by Mexicans due to the multiple benefits it brings to health; as well as its fiber content, vitamins (A and C), and minerals (potassium and calcium). Drying is a preservation technique that decreases the moisture content of food until it is chemically stabilized, inhibits the proliferation of microorganisms, and prolongs shelf life. The objective of this work was to optimize the convective drying process of nopal (*Opuntia ficus-indica* L.) in pieces based on physicochemical (total color difference and firmness retention), nutritional (ascorbic acid retention), and enzymatic (residual peroxidase activity) parameters. A rotatable central composite design was used, the process variables were temperature (55 to 80 °C) and air velocity (0.5 to 1.5 m/s), with 5 levels of variation and 13 treatments. According to the variations of the factors, color (colorimetry), firmness (puncture technique), ascorbic acid, and residual peroxidase activity (spectrophotometry) were evaluated. Likewise, the critical moisture content ( $X_c$ ) was determined, the engineering parameters were evaluated: mass flux density ( $N_c$ ), local mass transfer coefficient ( $k_Y$ ) in the constant rate period and effective diffusivity ( $D_e$ ), considered constant and variable, in the falling rate period. The drying kinetics of the nopal pieces were modeled using the analytical solution of Fick's second law. To obtain the optimal conditions in convective drying, the Response Surface Methodology (RSM) was used. The results showed that the total color difference ( $\Delta E$ ) was from 9.6 to 17.3; firmness retention (%  $RF$ ) ranged from 16.2 to 88.6; ascorbic acid retention (%  $RAA$ ) was found from 27 to 97; and the residual activity of peroxidase (%  $POD$ ) ranged from 0 to 80. In the engineering parameters, the  $X_c$  ranged from 12.9 to 15.3 kg water/kg d.s., the  $N_c$  varied from  $1.84 \times 10^{-4}$  to  $4.98 \times 10^{-4}$  kg water/m<sup>2</sup>s, the  $k_Y$  was from  $9.0 \times 10^{-3}$  to  $2.5 \times 10^{-2}$  kg water/m<sup>2</sup> $\Delta Y$  and the  $D_e$  from  $9.92 \times 10^{-11}$  to  $2.69 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s. The diffusivity as a function of quadratic time model allowed to

generate satisfactory predictions ( $R^2 > 0.999$ ) of the moisture content, throughout the falling rate period of convective drying of nopal pieces. The optimal conditions for convective drying of nopal pieces were 69.1 °C and 1.5 m/s, with a global desirability of 0.635. The prediction models of the response variables were adequate and reproducible, since the experimental results were within the range predicted by the optimal model.

## II INTRODUCCIÓN

El nopal es conocido por crecer en zonas áridas y semiáridas debido a la presencia del mucílago. Es una planta originaria del continente americano; en donde México es el principal país con la mayor diversidad de cactus. Hay más de 258 especies conocidas, de las cuales 114 se pueden encontrar en este país. El nopal puede alcanzar una altura de 1.5 a 3.0 m con tronco leñoso y hojas en forma de cladodio. La especie más conocida de estos cactus es la *Opuntia ficus-indica*.

Los cladodios son de tradición culinaria al ser el ingrediente principal de una diversidad de platillos como ensalada, asado, sopa y guisos. Está compuesto principalmente de agua (95 %) y proporciona fibra, vitaminas (B y C) y minerales (potasio, calcio, magnesio, sodio y hierro) (Finck-Pastrana 2014); de los cuales el potasio y calcio son los más abundantes con un contenido de 257 y 164 mg / 100 g b. h., respectivamente (USDA 2018). Por sus características nutrimentales y funcionales tiene propiedades medicinales relacionadas con el control de glucosa en sangre, obesidad, colesterol y presión arterial. Últimamente ha incrementado el consumo de cladodio fresco en jugo mezclado con otras frutas.

Sin embargo, en ciertas ocasiones el sabor del nopal resulta desagradable para las personas, debido a la presencia del mucílago. Por otro lado, el cladodio es altamente perecedero, su vida de anaquel se limita a 3 días a temperatura ambiente y hasta 7 a 10 días en refrigeración. El secado de nopal ofrece una alternativa conveniente para prolongar su vida de anaquel e impulsa el desarrollo de nuevos productos alimenticios como tortilla, tostadas y botanas, así como productos de belleza y suplementos alimenticios.

El secado por convección es el proceso más antiguo y utilizado para la deshidratación de alimentos al ser versátil y de sencillo manejo (Vázquez-López 2014). El proceso es lento y toma largos periodos de tiempo (Fito y col 2001), por lo que presenta reducción de volumen,

disminuye la capacidad de rehidratación y encogimiento en el producto final (Geankoplis 2016). Diversos autores han reportado que el secado convectivo es una buena alternativa para conservar el nopal (Medina-Torres y col 2007; López y col 2009; Díaz-Ayala y col 2015). A pesar de sus daños irreversibles, estos pueden disminuirse por medio de la optimización (Rodríguez y col 2019).

La optimización del proceso de secado es muy importante para obtener productos nutricionalmente aceptables. La calidad de los alimentos es un equilibrio de varios atributos (sabor, color, textura y contenido nutricional), por lo que la optimización de las condiciones del proceso se vuelve crucial (Rodríguez y col 2019). La Metodología de Superficie de Respuesta (MSR) es una técnica estadística y matemática que se ha utilizado para diseñar, mejorar y optimizar el procesamiento de alimentos donde una o varias respuestas relevantes están influenciadas por múltiples variables independientes (Montgomery 2003). Por lo tanto, para asegurar la calidad de los trozos de nopal, es importante analizar los parámetros fisicoquímicos, nutrimental y enzimático para seleccionar las mejores condiciones de proceso de temperatura y velocidad de aire en el secador convectivo.

Por lo anterior, el objetivo del presente estudio fue optimizar el proceso de secado convectivo de nopal (*Opuntia ficus-indica* L.) en trozos, con base en parámetros fisicoquímicos (diferencia total de color y retención de firmeza), nutrimental (retención de vitamina C) y enzimático (actividad residual de peroxidasa). Se estudiaron los cladodios sin espinas en piezas de 4×4 cm y se retiró toda la cutícula protectora.

### III REVISIÓN DE LA LITERATURA

#### A NOPAL

##### 1 Generalidades

Hace aproximadamente 20 mil años, los primeros pobladores que llegaron a México encontraron diferentes especies de cactus con los que se alimentaban. Esta hortaliza se domesticó hace 9 mil años, fue el alimento principal de los chichimecas y lo llamaron *nohpalli*, pero cuando llegaron los españoles a México, cambiaron el nombre a nopal (SEMARNAP 2017).

##### a Características botánicas

El nopal es una planta de color verde grisácea, con tallos aplanados, puede llegar a medir entre 1.5 y 3.0 m de altura (**Figura 1**) y crece normalmente a través de semillas, pero también pueden expandirse por medio de tallos desprendidos (FAO 2021).

La capa externa del nopal está formada por células verdes, conocidas como clorénquimas. En la capa interna están las células del parénquima, en donde se almacena el mucílago (Torres-Ponce y col 2015).

El nopal es resistente a zonas áridas debido a la presencia del mucilago que es un hidrocoloide en forma de red, estructura capaz de retener grandes cantidades de agua (Zavala-Mendoza 2012). El mucílago es un carbohidrato (heteropolisacárido) complejo, constituido principalmente de L-arabinosa, D-galactosa, D-xilosa y ácido galacturónico (Guardiola de León 2018; González-Rodríguez y col 2020; Reyes-Buendía y col 2020); las proporciones de estos compuestos dependen de la edad del cladodio, especie y manejo del cultivo, lo que afecta las propiedades reológicas para determinar la utilización del mucílago (Zavala-Mendoza 2012).



**Figura 1.** Cladodio de nopal (*Opuntia ficus-indica* L.)

Se han encontrado múltiples usos para este compuesto en la industria alimentaria como: agente espesante, emulsificante, aglutinante de sabores y formación de películas biodegradables (León-Martínez y col 2010; Chocano-Peralta 2019; Reyes-Buendía y col 2020).

### **b Características morfológicas**

El nopal (*Opuntia ficus-indica* L.) es una planta que puede ser rastrera o frutescente, presenta ramificación o arborescente de forma cilíndrica si el cladodio es viejo. También puede presentar hojas en forma de espina, característica particular de las cactáceas. Las espinas del género *Opuntia* son de dos tipos; ahuates (pequeñas espinas agrupadas en gran número) y grandes (hojas modificadas). El nopal es de tronco leñoso y hojas en forma de cladodio o pencas si son adultas (Torres-Ponce y col 2015).

## **2 Contenido nutrimental**

La composición nutrimental del nopal está conformada principalmente de un 90 % de agua y fibra. En comparación con otras frutas y hortalizas, el nopal contiene proteína, fibra, grasa, carbohidratos y minerales (potasio y calcio) en cantidades benéficas (Torres-Ponce y col 2015). Los frutos del nopal cuentan con una alta cantidad de vitaminas y aminoácidos (FAO 2021). En el **Cuadro 1** se muestra el contenido nutrimental del nopal para 100 g de fruto fresco.

### **a Importancia**

El contenido nutrimental en el nopal, en conjunto con los 17 aminoácidos, ayudan a eliminar toxinas provocadas por el alcohol y el humo del cigarro (IMSS 2018). De los carbohidratos presentes en el nopal, el polisacárido que más sobresale es la pectina. Este complejo se encuentra en la pared celular e interviene en la defensa, morfología y crecimiento del nopal (García y col 2016).

**Cuadro 1.** Información nutrimental del nopal (*Opuntia ficus-indica* L.).

<b>Composición</b>	<b>Por 100 g (b.h.)</b>	<b>IDR</b>
<b>Energía (kJ)</b>	66	
<b>Proteína (g)</b>	1.32	
<b>Lípidos (g)</b>	0.09	
<b>Carbohidratos (g)</b>	3.33	
<b>Fibra (g)</b>	2.2	
<b>Azúcares totales (g)</b>	1.15	
<b>Ca<sup>2+</sup> (mg)</b>	164	
<b>Fe<sup>2+</sup> (mg)</b>	0.59	
<b>Na<sup>+</sup> (mg)</b>	21	
<b>Mg (mg)</b>	52	
<b>K (mg)</b>	257	
<b>Zn (mg)</b>	0.25	
<b>Vitamina C (mg)</b>	9.3	90
<b>Vitamina A (UI)</b>	23	5000

**IDR:** Ingesta diaria recomendada (FDA)

**Fuente:** USDA 2018.

La pectina presente se puede utilizar como gelificante y estabilizador para diversos productos, esto proporciona un efecto positivo en la salud humana. Para el manejo de enfermedades como la diabetes mellitus tipo II, puede relacionarse a una dieta con bajo índice glucémico y alto contenido en fibra para disminuir los niveles de glucosa en sangre (García y col 2016).

#### **b Propiedades terapéuticas**

El nopal se considera un alimento funcional al controlar enfermedades como diabetes mellitus, obesidad, desórdenes gastrointestinales y niveles altos de glucosa en sangre. Investigaciones recientes han demostrado que el consumo de ciertas especies de nopal disminuye los niveles de glucosa y lípidos en sangre en virtud del elevado contenido de fibra (IMSS 2018).

### **3 Productos derivados del nopal**

El nopal puede consumirse en fresco, jugo, bebidas, productos deshidratados, mermeladas y concentrados (Sáenz 2006). Además, tiene múltiples usos en distintas áreas como medicinal, forraje para animales, producción de tinte carmín y mejora en la desertificación. En el campo medicinal, el nopal se puede utilizar para la producción de cápsulas para el control de la diabetes mellitus II y obesidad, así como también, jugo de nopal y fibra deshidratada para reducir la cantidad de azúcar en sangre. En tratamientos de belleza en la fabricación de champú, jabón y crema (INEGI 2013).

### **4 Importancia económica**

#### **a Producción mundial**

Los nopales son ahora parte del entorno natural y de los sistemas agrícolas y se considera que *O. ficus-indica* es la cactácea de mayor valor económico en el mundo. Es cultivada en

América, África, Asia, Europa y Oceanía (FAO e ICARDIA 2018). En el continente americano; Argentina posee 1650 ha plantadas, Brasil cubre una extensión de 500 000 ha, en México la producción anual alcanza 53 876 ha. Por otra parte, en África: Argelia cubre más de 30 000 ha, Etiopía posee 360 000 ha y Marruecos con 120 000 ha. Mientras que en Cercano Oriente: Jordania alcanza las 300 ha, Israel cultiva 350 ha. En Europa: Italia produce 500 ha, Portugal 200 ha y España solo cuenta con huertos familiares y jardines (FAO 2018).

### **b Producción nacional**

México en el 2019 obtuvo una producción de 891 821 toneladas, principalmente en la región centro de la República (SADER 2020).

De acuerdo con el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP 2020), Morelos es el principal productor de nopal con una producción de 396 874 t; en segundo lugar, se encuentra la Ciudad de México con 203 888 t y en tercero el Estado de México con 86 672 t.

Se sembró nopal en 13 000 hectáreas, con un valor total de 2 100 millones de pesos, en donde la temporada de abril a junio se cosecha casi el 44 % del volumen total anual (FND 2020).

### **c Exportación**

En 2019, se exportó el 6 % de la producción total de nopal, 55 000 toneladas (5.4 %) fueron para Estados Unidos, mientras que el 0.6 % fue para Europa y Asia (SADER 2020).

Máximos históricos en el volumen y el valor exportado de la hortaliza se registraron en 2016, con incrementos anuales de 5.1 y 10.3 %, respectivamente, el cual se muestra en el **Cuadro 2** (SIAP 2016).

**Cuadro 2.** Volumen y valor anual aproximado exportado de nopal por país de destino.

<b>País</b>	<b>2016</b>	
	Volumen (toneladas)	Valor comercial (dólares)
<b>Australia</b>	1.5	9 175
<b>Bélgica</b>	5.1	28 920
<b>Corea del sur</b>	23.5	25 242
<b>Dinamarca</b>	0.02	648
<b>El salvador</b>	0.8	4 400
<b>Estados Unidos</b>	44 730	13 895 298
<b>Francia</b>	0.4	323
<b>Hong Kong</b>	1.0	7 800
<b>Hungría</b>	1.0	6 500
<b>Japón</b>	2.5	17 291
<b>Países Bajos</b>	1.9	9 501
<b>Reino Unido</b>	0.5	993
<b>Total</b>	<b>44 768.22</b>	<b>14 006 091</b>

**Fuente:** SIAP 2016.

## **B DESHIDRATACIÓN**

Las frutas y hortalizas están compuestas principalmente de lípidos, carbohidratos y proteínas, así como vitaminas y minerales (Arroyo-Uriarte y col 2018). Sin embargo, presentan la desventaja de ser altamente perecederos, ya que su alto contenido de agua (80 - 90 %) provoca una rápida proliferación de microorganismos que afectan las características sensoriales y nutricionales. Una forma de prolongar la vida útil de los alimentos es por métodos de conservación (Carrillo-Inungaray y Reyes-Munguía 2013).

La deshidratación es uno de los métodos más antiguo y utilizado en la conservación de alimentos, con el objetivo de reducir el contenido de humedad hasta una actividad de agua ( $a_w$ ) estable ( $0.3 < a_w < 0.6$ ), para prevenir el crecimiento de microorganismos y minimizar las reacciones bioquímicas (Ochoa-Reyes y col 2012).

La deshidratación disminuye en gran medida la masa y volumen del alimento, lo que reduce los costos de transporte y almacenamiento (Fito y col 2001). También reduce el desperdicio de frutas y hortalizas generado por la sobreproducción; esto mejora la economía y genera un valor agregado (De Michelis y Ohaco 2015).

### **1 Secado**

El secado es una operación unitaria que reduce la humedad hasta un punto en donde el alimento o producto se encuentra relativamente estable químicamente. (Martínez-Soto y col 2010).

Existen algunos parámetros como la contracción, el coeficiente de difusión efectiva ( $D_e$ ) y los coeficientes de transferencia superficial que influyen de manera importante en el secado de los productos alimenticios (Mugi y Chandramohan 2021). Existen diferentes métodos de secado

para eliminar el agua presente en los alimentos como: el secado solar, convectivo, microondas, infrarrojo y lecho fluidizado (Fito y col 2001; Mugi y Chandramohan 2021).

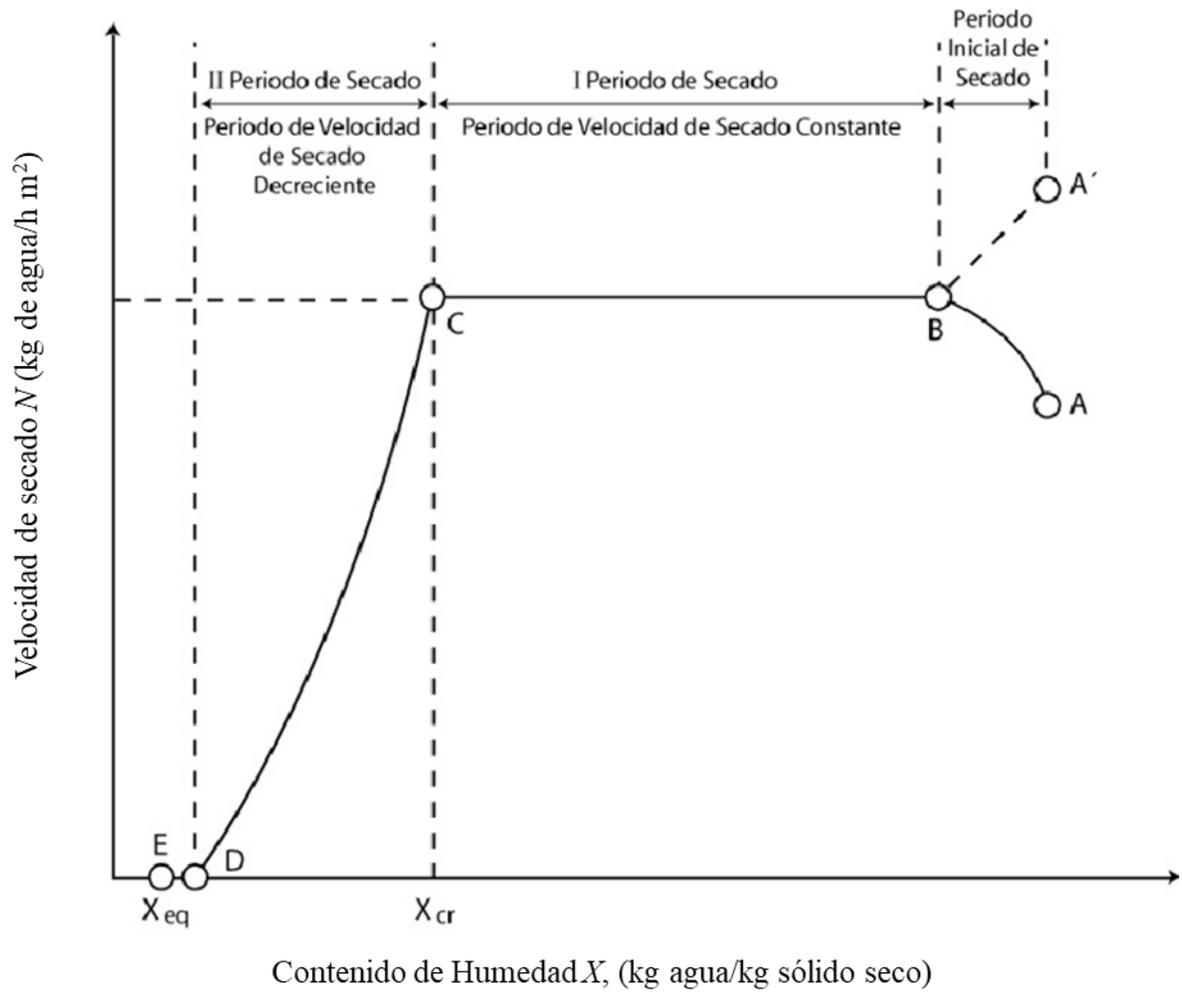
## **2 Secado convectivo**

El secado por convección es el proceso más utilizado para la deshidratación de alimentos al ser de fácil manejo, producir grandes cantidades y tener una amplia versatilidad (Vázquez-López 2014). Este método consiste en transferir el calor por convección a través de aire caliente hacia el producto, para elevar la temperatura del sólido, posteriormente, el contenido de humedad del producto disminuye debido a la evaporación en la superficie (transferencia de masa) y es retirado por la corriente de aire caliente al exterior del secador (García-Pérez 2007). La transferencia de calor y masa durante el secado dependen de variables en la resistencia externa (temperatura y velocidad de aire del secado) y resistencia interna (humedad, estructura del alimento y difusividad) (Contreras 2006).

Normalmente, es un proceso lento que requiere un largo periodo de tiempo (Fito y col 2001), lo que causa encogimiento o reducción de volumen, pardeamiento, pérdida de la capacidad de rehidratación y pérdida de compuestos volátiles en el producto final (Geankoplis 2016).

### **a Curvas de velocidad de secado**

Generalmente, durante el secado ocurren una serie de etapas: A) período de adaptación, B) período de velocidad constante, C) contenido de humedad crítico y D) período de velocidad decreciente (Geankoplis 2016; Mugi y Chandramohan 2021). Se puede obtener mucha información si los datos se expresan en función de la densidad de flujo másico ( $N$ ) y se grafican contra contenido de humedad **Figura 2**. La eliminación inicial de humedad (AB) ocurre cuando los productos y el agua dentro de este, experimentan un ligero aumento de temperatura.



**Figura 2.** Curva típica de rapidez de secado, condiciones de secado constantes (Geankoplis 2016).

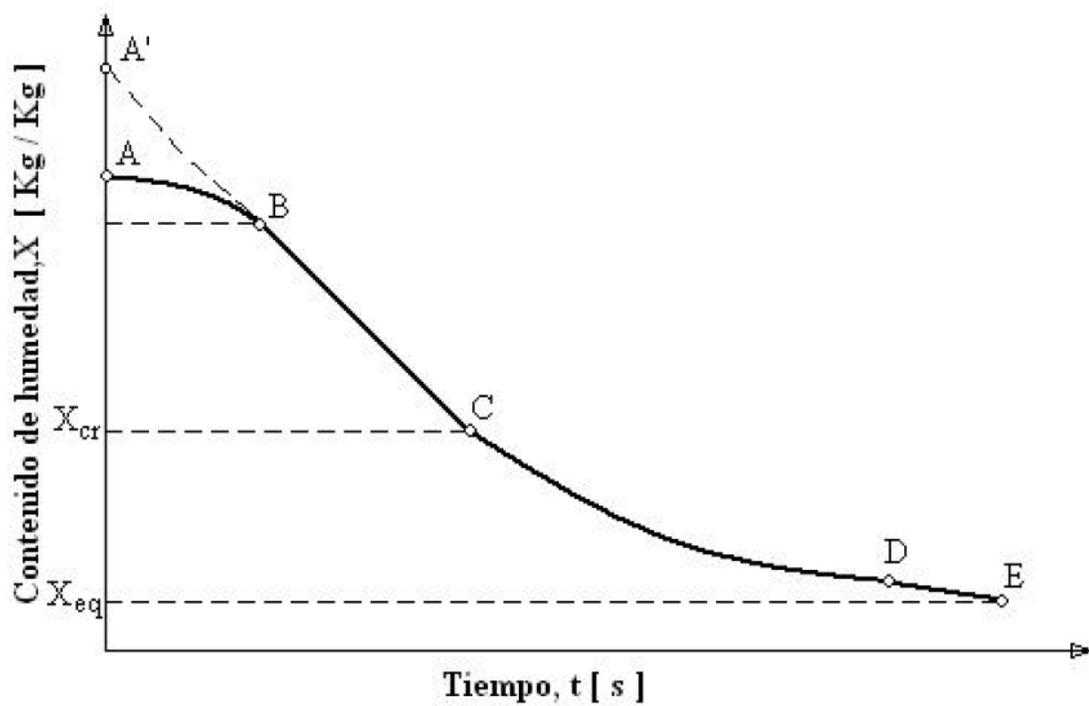
Después de las etapas iniciales de secado, se producen reducciones significativas en el contenido de humedad a una rapidez constante (BC) y a una temperatura constante del producto. En la mayoría de las situaciones, el período de velocidad constante continúa hasta que el contenido de humedad se reduce al contenido de humedad crítico (C). Con contenidos de humedad por debajo del contenido crítico, la rapidez en la que se pierde humedad disminuye con el tiempo, a esto se le conoce como período de velocidad decreciente (CE). El contenido crítico de humedad está bien definido debido al cambio brusco en la velocidad de eliminación de la humedad (Singh y Helman 2009).

### **1) Secado durante el periodo de velocidad constante**

Durante el secado ocurren una serie de etapas, la cual comienza con un periodo de adaptación (punto A), en donde la temperatura del alimento comienza a incrementar hasta alcanzar las condiciones establecidas. En el periodo de velocidad constante, la superficie del sólido se encuentra saturada de agua, observándose una película de agua continua, la humedad que se pierde por evaporación es constante con respecto al tiempo (punto BC) (**Figura 3**). Esa capa de agua libre actúa como si el sólido no estuviera presente. La velocidad de evaporación durante el periodo de velocidad constante es independiente del sólido y dependiente de las condiciones del aire presente en el secado (Geankoplis 2016).

### **2) Contenido de humedad crítico**

El contenido de humedad crítico ( $X_c$ ) se encuentra entre el periodo de velocidad constante y decreciente. El  $X_c$  es el punto C que se observa en la **Figura 3**. Este punto aparece cuando la humedad en la superficie del sólido se ha reducido por evaporación y deja de estar saturada.



**Figura 3.** Curva de contenido de humedad ( $X$ ) como función del tiempo, condiciones de secado constantes (Geankoplis 2016).

Algunos autores (Vázquez-López 2014; Sáez-Ceniceros 2019) mencionan que el  $X_c$  se puede determinar por diversos métodos, de los cuales la apreciación visual, la medición de la temperatura y el estadístico son los más utilizados.

La apreciación visual como su nombre lo indica es una técnica que se basa en la visualización de la curva de secado. El contenido de humedad crítico se determina cuando aparecen zonas secas en la superficie (Vázquez-López 2014; Sáez-Ceniceros 2019).

Por otro lado, la medición de la temperatura se basa en medir la temperatura de la superficie del sólido, en donde, el  $X_c$  se establece cuando la temperatura de esa zona incrementa (Vázquez-López 2014; Sáez-Ceniceros 2019).

Por último, el estadístico consiste en aplicar una ecuación cuadrática en donde el tiempo se considera una variable independiente. Una vez que el término cuadrático deje de ser significativo ( $p > 0.05$ ); ese punto es el  $X_c$  (Vázquez-López 2014; Sáez-Ceniceros 2019).

### **3) Secado durante el periodo de velocidad decreciente**

En este punto la superficie del sólido se encuentra sin agua suficiente para mantener la pérdida de humedad continua. La superficie del sólido al perder la capa de agua continua empieza a perder menos humedad durante el periodo de velocidad decreciente hasta secarse completamente en el punto D de la **Figura 3** (Geankoplis 2016).

La cantidad de humedad que se elimina en el periodo de velocidad decreciente es muy pequeña y el tiempo que se requiere para perder esa humedad es prolongado (Geankoplis 2016).

Cuando la humedad del interior del sólido se desplaza hacia la superficie, la difusión controla los fenómenos de transferencia de masa interna en el producto (Bezerra y col 2015).

Hay diferentes teorías en donde se explican los mecanismos de movimiento y los tipos de curva en el periodo de velocidad constante y decreciente, como:

1. Teoría de la difusión del líquido: La difusión ocurre cuando hay un gradiente de concentración entre el sólido y la superficie. Normalmente se presenta en sólidos no porosos como gelatina, pasta y pegamento. En el caso de productos alimenticios la difusividad sucede durante el periodo de velocidad decreciente y se explica con las ecuaciones de difusión en estado no estacionario (Geankoplis 2016).
2. Movimiento capilar en los sólidos porosos: Cuando se están secando, los poros y canales interconectados, generan una tensión superficial y ésta, impulsa la humedad libre hacia la superficie por medio de acción capilar. Los poros grandes minimizan la fuerza de este mecanismo, en cambio, los poros pequeños producen fuerzas mayores. Algunos ejemplos de sólidos granulares y porosos son la arena, minerales, pintura y tierra (Geankoplis 2016).
3. Efecto de la contracción: Una de las causas más comunes que afecta la velocidad de secado es la contracción de los sólidos cuando se elimina la humedad. Los sólidos que tienen una constitución rígida no se encogen tanto, pero las sustancias coloidales y fibrosas como las frutas y otros alimentos sí lo hacen. Cuando la superficie del sólido pasa por tiempos prolongados a temperaturas muy altas forma un endurecimiento en la superficie que impide la salida del agua líquida o gaseosa y disminuye la velocidad de secado. En otras ocasiones cambia la estructura y deforma el material del alimento (Geankoplis 2016).

### **3 Calidad de los alimentos deshidratados**

La definición de calidad no está unificada, sino que depende de la perspectiva en la que se evalúa, ya que difiere de la percepción de los consumidores (Sadilek 2019). En la actualidad, los consumidores buscan productos alimenticios de alta calidad y transfieren esta calidad en

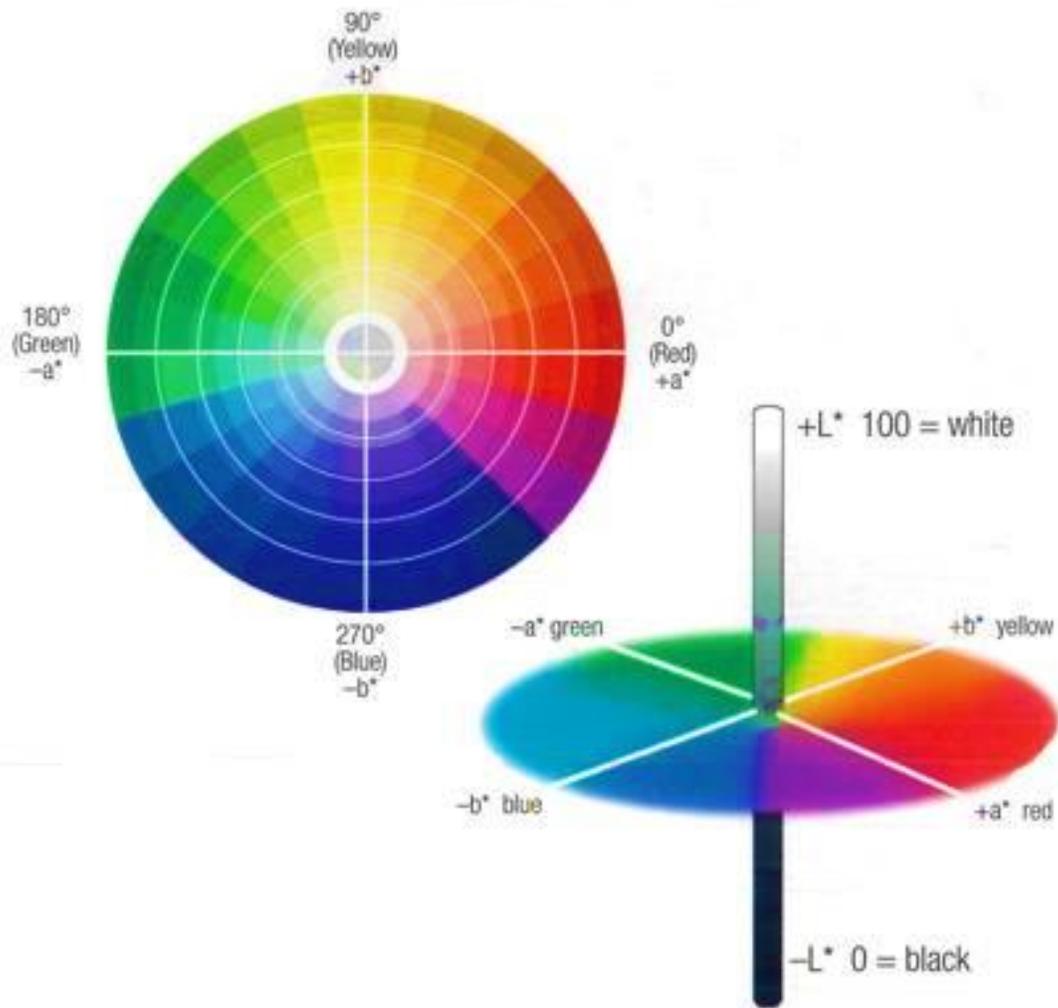
función de un determinado grupo de atributos, que se clasifican en términos de apariencia, presentación, frescura, oportunidad, así como valor nutritivo, sanidad e inocuidad (Mascarello y col 2015). Además, desean obtener productos que mantengan los parámetros de calidad cercano a los frescos (Inocente-Quiroz 2020). Aunque la deshidratación puede causar daños irreversibles, estos pueden simplificarse por medio de optimizaciones (Rodríguez y col 2019).

Los alimentos deshidratados se han presentado como ingrediente para la producción de barras energéticas, harinas, dulces y suplementos alimenticios (Tapia-Pazmiño 2020); por ello, el interés de conservar la calidad de este tipo de productos lo más parecido a los alimentos frescos.

#### **a Color**

El color es un parámetro fisicoquímico que se evalúa por el sentido de la vista y constituye una fuente de información para el consumidor: cómo la maduración de fruto o hortaliza y la idoneidad. Desde el primer contacto visual con el producto, el potencial consumidor elige llevar o rechazar el alimento (Mathias-Retting y Ah-Hen 2014). La medición del color se utiliza como control para determinar la calidad del producto alimenticio para su posterior uso. Los datos se reportan en escala CIELAB (**Figura 4**) que indica la luminosidad ( $L^*$ ) en un rango de 0 – 100, la variación entre rojo - verde ( $a^*$ ) y la variación entre amarillo - azul ( $b^*$ ) (Quintero-Ruiz 2015).

En la deshidratación de alimentos el color cambia durante el secado dependiendo de las condiciones de proceso: temperaturas altas dañan significativamente el color de la muestra, afectando a los componentes más termolábiles de manera positiva o negativa.



**Figura 4.** Escala del color por medio del CIELAB con valores de  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$  (Cubillas y Japitana 2016).

Diego-Zazueta y col (2021) obtuvieron pérdida de clorofila al utilizar nopal en polvo para la elaboración de salchicha Viena. Por otro lado, Gómez-Gómez (2009) deshidrató rodajas de tomate en un secador de charolas a diferentes temperaturas (45, 50 y 60 °C), a medida que aumentaba esta variable, el licopeno se incrementó, lo que beneficia la coloración roja del vegetal. En el transcurso de este proceso, la evaporación del agua, las reacciones enzimáticas y no enzimáticas generan efecto sobre el color (Rojas y Duran 2011).

### **b Textura**

La textura se puede definir como las manifestaciones sensoriales y funcionales de las propiedades estructurales, mecánicas y superficiales de los alimentos que se perciben a través de sensaciones visuales, auditivas, táctiles y cinestésicas (Puma-Isuiza y Núñez-Saavedra 2018). Los consumidores sienten la textura a partir del primer bocado hasta el momento de deglución, así como también de manera táctil, y si ésta presenta algún problema la queja es inmediata (Batlle y col 2016).

El secado de los alimentos tiene como propósito reducir el contenido de humedad, pero este proceso modifica la textura. El contenido de humedad y las altas temperaturas durante el secado afectan la estructura del producto al disminuir la turgencia en las células, pierde permeabilidad en la membrana protoplasmática, oxida los componentes inestables y desnaturaliza las proteínas; esto genera cambios en el tamaño original de la muestra. En ciertas ocasiones, el secado forma encogimiento superficial, lo cual es provocado por la ruptura de la corteza y la contracción de células (Hernández-Rodríguez y Quinto-Diez 2004; Moreno-Guarín y col 2012).

### **c Ácido ascórbico (vitamina C)**

La vitamina C es esencial para los seres humanos, la deficiencia de esta puede provocar la enfermedad llamada escorbuto. El ácido ascórbico se encuentra de forma natural en frutas y

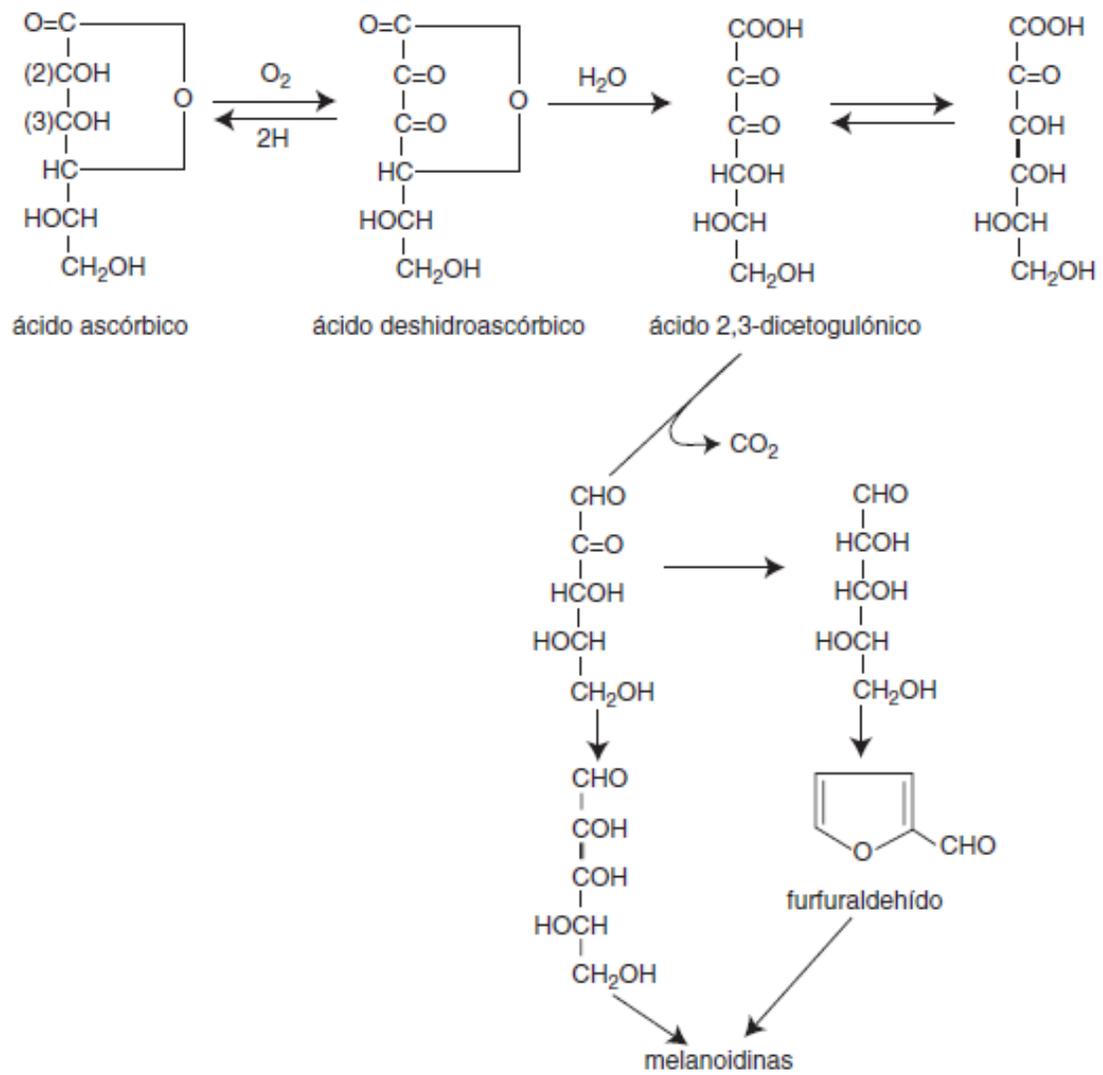
hortalizas, además de contener antioxidantes, carotenos y compuestos fenólicos (Gutiérrez y col 2007).

El ácido ascórbico está constituido por seis moléculas de carbono, ocho de hidrógeno y seis de oxígeno (**Figura 5**), tiene una masa molar de 176.13 Da (Serra y Cafaro 2007). Es una vitamina hidrosoluble sensible al calor, a los rayos ultravioleta y al oxígeno (Fain 2004). La ingesta diaria es de 45 a 60 mg/día. Las frutas y verduras cuentan con un alto contenido de vitamina C, los más conocidos son los cítricos como las naranjas, toronja, limón; así como pimiento rojo y kiwi.

Diferentes autores han estudiado la degradación de esta vitamina (Badui 2006), bajo distintas condiciones térmicas en jugo y frutas naturales. Por ejemplo, cuando el ácido ascórbico pierde electrones y se transforma en ácido dehidroascórbico o dicetogulónico pierde la actividad vitamínica, motivo por el cual, el conocer la variación en la concentración de vitamina C en alimentos es importante para establecer los factores que afectan la estabilidad (**Figura 5**) (Gutiérrez y col 2007).

#### **d Inactivación enzimática**

La peroxidasa es una proteína hemo o hierro-porfirina que pertenece a una gran familia de enzimas llamadas oxidoreductasas. Su función es principalmente oxidar moléculas a expensas del peróxido de hidrógeno. Están ampliamente distribuidas en los organismos vivos y, por lo general, muestran una formación dramática de productos de color como resultado de su efecto catalítico (Chukwudi y col 2021). Las células vivas generan peróxidos, los cuales son controlados por la peroxidasa para evitar el aumento de radicales libres (Mendoza y Herrera 2012).



**Figura 5.** Degradación de ácido ascórbico a ácido 2,3 – dicetogulónico.

La peroxidasa es utilizada como indicador de calidad para tratamientos térmicos, debido a la resistencia térmica que presenta esta enzima en comparación con otras enzimas, además, es fácil determinar la actividad enzimática de la peroxidasa (Mendoza y Herrera 2012).

La estructura de la proteína determina la función de la enzima y cualquier cambio en ella modifica su actividad; por ejemplo, las altas temperaturas. Las enzimas peroxidadas son altamente termoestables, pero cuando alcanzan la temperatura de 50 °C comienza la desnaturalización de la estructura terciaria, y esto, modifica la configuración y altera los sitios alostéricos. Las enzimas sujetas a desnaturalización a altas temperaturas pierden irreversiblemente su capacidad catalítica porque las débiles fuerzas de unión se ven interrumpidas por el aumento de las vibraciones térmicas, lo que afecta la estructura terciaria (Jiménez-Sánchez 2018).

## **C OPTIMIZACIÓN**

La optimización está relacionada con la investigación operativa, la cual consiste en la aplicación de métodos matemáticos para analizar problemas complejos, con el fin de optimizar su funcionamiento, como los procesos y la evaluación de inversiones (Falco y col 2018).

La problemática de la optimización se compone normalmente de tres puntos: la función objetivo, variables y restricciones (Ramos y col 2010).

1. **Función objetivo:** Son las mediciones cuantitativas de la función del sistema que se está optimizando (incrementar o disminuir). Ejemplo de estas funciones son: el incremento o disminución de las variables de calidad en algún producto alimenticio; o bien, minimizar los ingredientes necesarios para la producción de un alimento y minimizar los costos de manutención en una planta de energía (Ramos y col 2010).

2. Variables: Es una característica que puede influir en la función objetivo. Las variables pueden ser independientes y dependientes; deben poder variar mínimamente en dos valores (Ramos y col 2010; Oyola-García 2021). En el caso de un proceso de secado sus variables pueden ser la temperatura y velocidad de aire: en el periodo de velocidad constante y decreciente puede ser el contenido de humedad, el coeficiente individual de transferencia de masa y la difusividad efectiva.
3. Restricciones: Delimita el conjunto de relaciones que las variables están obligadas a cumplir (Ramos y col 2010).

El método de superficie de respuesta es la colección de técnicas matemáticas y estadísticas empleada para estudiar la relación de las variables de control y las de respuestas diseñadas para optimizar la variable de respuesta (Yaguas 2017). Dicha metodología se logra a través de experimentos secuenciales, es decir, con los datos obtenidos de cada variable se crea un diseño complejo que se acerque a la región de interés.

## **1 Introducción a la metodología de superficie de respuesta**

En diversos problemas se presentan dos o más variables que pueden estar relacionadas, y el interés del estudio se centra en modelar y explorar esta relación (Montgomery 2003).

En general, suponiendo que hay una sola variable dependiente o de respuesta y que depende de  $k$  variables independientes, por ejemplo,  $x_1, x_2, \dots, x_k$ . La relación que existe entre estas variables se caracteriza por un modelo matemático llamado modelo de regresión. Dicho modelo se ajusta a un conjunto de datos muestrales. En ocasiones el experimentador conoce la forma exacta de la verdadera relación funcional entre  $y$  y  $x_1, x_2, \dots, x_k$ . Sin embargo, en la mayoría de los casos no se conoce la verdadera relación funcional, y el experimentador elige una función

apropiada para aproximar. Los modelos polinomiales de orden inferior son de uso generalizado como funciones de aproximación (Montgomery 2003).

La metodología de superficie de respuesta, o MSR, es una colección de técnicas matemáticas y estadísticas útiles en el modelado y el análisis de problemas en los que una respuesta de interés recibe influencia de diversas variables y donde el objetivo es optimizar esta respuesta (Montgomery 2003).

En la mayoría de los problemas MSR, la forma de la relación entre la respuesta y las variables independientes es desconocida. Por lo tanto, el primer paso de la MSR es encontrar una aproximación adecuada de la verdadera relación funcional entre  $y$  y el conjunto de variables independientes. Por lo general, se emplea un polinomio de orden inferior en alguna región de las variables independientes (Montgomery 2003). Si la respuesta está bien modelada por una función lineal de las variables independientes, entonces la función de aproximación es el modelo de primer orden:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon$$

Si hay curvatura en el sistema, entonces debe usarse un polinomio de orden superior, tal como el modelo de segundo orden (Montgomery 2003).

En casi todos los problemas MSR se usa uno de estos modelos, o ambos. Desde luego, es probable que un modelo polinomial sea una aproximación razonable de la verdadera relación funcional en el espacio completo de las variables independientes, pero para una región relativamente pequeña suelen funcionar bastante bien (Montgomery 2003).

Por lo general, la superficie de respuesta se representa gráficamente. Para ayudar a visualizar la forma de una superficie de respuesta, con frecuencia se grafican los contornos de

la superficie de respuesta. En la gráfica de contornos se trazan las líneas de respuesta constante en el plano  $x_1, x_2$ . Cada contorno corresponde a una altura particular de la superficie de respuesta. El objetivo último de la MSR es determinar las condiciones de operación óptimas del sistema o determinar una región del espacio de los factores en la que satisfagan los requerimientos de operación (Montgomery 2003).

## **D ANTECEDENTES**

El nopal es una fuente rica en vitaminas (B y C), fibra y minerales (principalmente potasio y calcio) (Martínez y col 2007; Ayadi y col 2009; Martínez y col 2015; Rodríguez y col 2019). Además, cuenta con una masa de 38 g, una longitud de 2.2 cm, anchura de 1 cm, acidez titulable (ácido málico) de 0.2 % y clorofila de 0.46 mg/100 g, de acuerdo con Makí-Díaz y col (2014). Mientras que Ayadi y col (2009) reportan que el nopal tiene una humedad del 90 %, una actividad de agua ( $a_w$ ) de 0.76, pH de 4.02, acidez (% de ácido málico) de 0.72 y proteína total de 8.74 g/100 g<sub>ff</sub>. Por sus excelentes cualidades nutricionales, la ingesta de nopal brinda beneficios a la salud; como prevención de diabetes, obesidad y anticancerígeno (Torres-Ponce y col 2015).

Los cladodios del nopal cuentan con una baba viscosa llamada mucílago, esta sustancia es hidrocoloide, con estructura de polielectrolito y ramificada, y heteropolisacárido, es decir, cuenta con polisacáridos neutros y ácidos: arabinosa, galactosa, ramnosa y xilosa (Vargas-Rodríguez y col 2016). Varios autores han estudiado la extracción y composición del mucílago debido a sus múltiples usos en la industria alimenticia (emulsificante, mejorador de textura, sustituto de grasas, aglutinante de sabor, formador de geles) (Rodríguez-Henao 2017; Huerta-Hernández 2018) y comercial (purificador de aguas, adhesivo, pinturas y fertilizante) (García-Favela 2013; Villa-Uvidia y col 2020).

Por esta razón, está el interés de desarrollar e innovar nuevas tecnologías para recopilar información sobre los parámetros fisicoquímicos, nutrimentales y enzimáticos del nopal para su uso en nuevas investigaciones (Nazareno y Padrón-Pereira 2011).

Las industrias alimentarias han tomado interés en los cladodios de nopal, al utilizarlo en diferentes productos, dependiendo del proceso y la edad de este. Se han estudiado diferentes métodos para deshidratar nopal, como es el caso de López y col (2009) quien realizó cinéticas de secado en nopales enteros sin remover la cutícula y con remoción parcial en un secador de túnel a distintas condiciones de temperatura (35, 45 y 60 °C) y velocidad de aire (1.5 y 3.0 m/s). Los resultados mostraron una mayor reducción del tiempo de secado en la temperatura de 60 °C y velocidad de aire de 3.0 m/s, así como en la reducción de cutícula en el nopal. Entre los factores de temperatura y velocidad de aire, el primero influyó más en la velocidad de secado. Esto, coincide con el estudio realizado por Medina-Torres y col (2007), quienes observaron que la rapidez de secado aumenta con una mayor temperatura del aire de secado y una mayor rapidez de flujo de aire de secado. El trabajo mostró las cinéticas de secado y el efecto de tres métodos de secado en la textura del nopal deshidratado. Los estudios se realizaron en un secador convectivo a temperaturas de 45 y 65 °C y velocidad de aire de 3.0 y 5.0 m/s; mientras que el secador osmótico utilizó glucosa a 40 y 60 °Brix, a temperaturas de 25 y 45 °C. Las muestras tratadas en el secador convectivo obtuvieron mayor cohesión que las muestras tratadas solamente con secado osmótico: en el secador osmótico las muestras se volvieron más elásticas. De los tres métodos, el secador por convección mostró menos alteración en las propiedades de la textura, siendo el mejor resultado en las condiciones experimentales. Al igual que los autores anteriores, Díaz-Ayala y col (2015) deshidrataron nopal en un secador convectivo y presentaron el efecto de la temperatura y velocidad de aire en el tiempo de secado. En el secador convectivo se utilizaron temperaturas de 35, 45 y 60 °C, y velocidades de aire de 1.0, 1.5 y 2.0 m/s en tiras

de nopal con un espesor de 4 mm. Los resultados indican que la velocidad de aire tiene una menor influencia en el proceso de secado que la temperatura. Además, en las tiras de nopal, el tiempo de secado se redujo un 90 % en comparación de nopales enteros; y una reducción del 50 % en muestras cilíndricas de nopal de 25 mm. Para la creación de la curva de secado se utilizaron diferentes modelos de capa fina, pero el modelo que mejor se ajustó fue el de Midilli.

Contreras-Padilla (2011) realizó una evaluación en los parámetros de calidad para determinar los cambios en las características nutricionales en polvos de cladodio en tres diferentes estados de madurez (50, 100 y 150 días), por medio de tres procesos de secado: horno de aire caliente, liofilizado y túnel. Los resultados mostraron que el proceso de liofilización retuvo un mayor contenido de proteína, fibra soluble y grasa; además, obtuvo menor efecto en el color. Pero no hubo diferencia significativa entre los tres procesos de secado para el contenido de fibra insoluble, croma y luminosidad.

Por otro lado, Torres y col (2016) agregaron reflectores a un secador solar para potenciar la energía y obtener temperaturas entre 26 a 37 °C para deshidratar tiras de nopal. Con los datos que adquirieron elaboraron la curva de secado utilizando el modelo exponencial y el contenido de humedad se redujo en un promedio de 71 %.

Martínez-Soto y col (2010) analizaron tiras de nopal en un secador por lecho fluidizado en temperaturas de 50, 60, 70 y 80 °C y velocidad de aire de 0 a 13 m/s, con un previo escaldado a 80 °C por 3 min. Las curvas de secado se representan como la razón de la humedad adimensional con respecto al tiempo, en donde se observó que el incremento de la temperatura tuvo un efecto significativo en la velocidad de secado y, por ende, en el tiempo de secado. También, informaron que la difusividad efectiva estuvo en un rango de  $0.818 \times 10^{-7}$  a  $3.25 \times 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s, la energía de activación sin escaldado fue de 35.85 kJ/mol y con escaldado 28.21 kJ/mol.

Rodríguez y col (2019) utilizaron el diseño experimental Box-Behnken para optimizar la deshidratación osmótica (DO) como pretratamiento antes del secado convectivo. Los factores que se estudiaron en la DO fueron: las concentraciones de sacarosa (30, 40 y 50 °Brix), lactato de calcio (1, 2 y 3 %) y tiempo de inmersión (1.5, 2.5 y 3.5 h). De los tres factores, la sacarosa y los tiempos de inmersión fueron las variables que afectaron más. La combinación del pretratamiento con el secado convectivo redujo el contenido de humedad en un rango de 23 a 30 % en comparación con el secador convectivo solo.

Sin embargo, no se encontraron estudios sobre evaluación de parámetros ingenieriles, retención de vitamina C y optimización en un secado de túnel para nopal.

#### IV JUSTIFICACIÓN

El nopal (*Opuntia ficus-indica* L.) es una hortaliza conocida por sus características nutrimentales y medicinales, alto contenido de fibra, minerales y vitaminas. En México, se producen anualmente 891 821 toneladas de nopal, principalmente en la región centro de la República (FND 2020). Sin embargo, el daño físico causado durante el transporte, principalmente a zonas distantes, incrementa la respiración y producción de etileno, el oscurecimiento oxidativo, pérdida de agua, de firmeza y reducción de vida de anaquel. A su vez, la elevada oferta de temporada causa que el precio y valor comercial disminuyan. Por ello, es importante estudiar el secado convectivo como método de conservación para reducir pérdidas y obtener productos de valor agregado. El secado es un método de conservación utilizado para alargar la vida de anaquel, que incrementa las oportunidades de comercialización y disminución de los costos de transporte y almacenamiento. Existen estudios que reportan el deshidratado de nopal con secadores solares, de túnel y liofilizadores, pero no se evalúan los parámetros ingenieriles, retención de vitamina C y optimización en un secado de túnel en nopal.

Con base en lo anterior, el presente trabajo se enfocó en optimizar el secado convectivo de nopal (*Opuntia ficus-indica* L.) en trozos en función de la temperatura y velocidad de aire para encontrar las mejores condiciones de proceso y evaluar el efecto del tratamiento sobre parámetros de calidad.

## V HIPÓTESIS

El secado convectivo bajo condiciones óptimas de temperatura y velocidad de aire permite obtener trozos de nopal (*Opuntai ficus-indica* L.) con propiedades de calidad fisicoquímicas y nutrimental cercanas a las del producto fresco y con baja actividad residual enzimática.

## VI OBJETIVOS

### A OBJETIVO GENERAL

Optimizar el proceso de secado convectivo de nopal (*Opuntia ficus-indica* L.) en trozos con base en parámetros fisicoquímicos (diferencia total de color y retención de firmeza), nutrimental (retención de vitamina C) y enzimático (actividad residual de peroxidasa).

### B OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1 Construir la cinética de secado de nopal (*Opuntia ficus-indica* L.) en trozos bajo diferentes condiciones de temperatura (55 a 80 °C), velocidad de aire (0.5 a 1.5 m/s) y humedad de aire constante.

2 Determinar el contenido de humedad crítico ( $X_c$ ) y evaluar los parámetros ingenieriles: densidad de flujo de masa ( $N_c$ ) y coeficiente local de transferencia de masa ( $k\gamma$ ) en el periodo de velocidad constante.

3 Evaluar el contenido de humedad en el equilibrio ( $X_{eq}$ ) y modelar la cinética de secado mediante la solución analítica a la segunda ley de Fick al considerar la difusividad efectiva constante y variable.

4 Optimizar el secado de nopal (*Opuntia ficus-indica* L.) en trozos con base en parámetros fisicoquímicos (diferencia total de color y retención de firmeza), nutrimental (retención de ácido ascórbico) y enzimático (actividad residual de peroxidasa).

5 Contrastar los parámetros fisicoquímicos, nutrimental y enzimático predichos bajo condiciones óptimas de proceso, con los resultados experimentales.

## VII MATERIALES Y MÉTODOS

### A MATERIALES

#### 1 Materia prima

En esta investigación se utilizó nopal (*Opuntia ficus-indica* L.) fresco y desespinado, libre de daños físicos y con apariencia uniforme. La materia prima se obtuvo de un mercado local de Culiacán, Sinaloa.

### B MÉTODOS

Los nopales se lavaron con agua potable e hipoclorito de sodio a 100 ppm, posteriormente, se secaron con papel absorbente y se almacenaron a 10 °C hasta ser utilizados. Previamente al secado, los nopales desespinaados se retiraron del refrigerador y se cortaron en trozos de 40×40 mm de manera manual con un espesor promedio de 5 mm, este se determinó con un vernier (Truper, estándar, México) y por último se retiró de manera manual la cutícula protectora.

#### 1 Secado convectivo

El secado se llevó a cabo de acuerdo con la metodología de Sáez-Ceniceros (2019); en un secador de túnel se deshidrataron los trozos de nopal, se utilizaron temperaturas en el intervalo de 55 a 80 °C y velocidad de aire de 0.5 a 1.5 m/s. Los trozos de nopal se colocaron en estructuras metálicas con mallas de alambre con orificios de 4×4 mm.

En el secador de túnel se colocan las estructuras metálicas con capacidad de 12 trozos de nopal con una base de 4×4 cm.

El secador de túnel está constituido por una fibra de vidrio y ventilación centrífuga (S&P, CK-50, Chicago, EUA) de 120 V, se modera con un regulador de voltaje de ajuste (resistencia variable) de 400 W y 120 V (Econodimer, DE4M-7-400W, México) (Sáez 2019). La velocidad de aire caliente se mide a través de un termo-anemómetro (Extech, 451126, México).

El equipo se enciende 30 min antes de realizar el proceso de secado, esto con el fin de acondicionar el secador a la temperatura y velocidad de aire deseado. Después de transcurrir el tiempo de acondicionamiento, se colocan las muestras en las estructuras metálicas para luego ser depositado en la cámara del secador y comenzar con el proceso.

Posterior a la finalización del proceso de secado de las muestras, se determina la masa de sólidos secos, parámetros fisicoquímicos, nutrimental y enzimático. Con respecto a la masa de sólidos secos, una porción de la muestra se coloca en una estufa a 110 °C hasta masa constante y luego se introduce en un desecador para que adquiriera la temperatura ambiente: el resto de la muestra de nopal se utiliza para el análisis fisicoquímico (diferencia total de color y retención de firmeza), nutrimental (vitamina C) y enzimático (peroxidasa).

## **2 Parámetros fisicoquímicos**

### **a Color y diferencia total de color ( $\Delta E$ )**

De acuerdo con la metodología descrita por Rodríguez y col (2019) se midió la diferencia total de color por medio de un colorímetro triestímulo (Minolta, CR-400, Osaka, Japón), en donde se determinan los parámetros  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$ . El instrumento se calibra mediante una placa reflectora blanca estándar, en donde se realizan 3 disparos para obtener por medio del equipo el registro de los parámetros predefinidos de  $Y = 93.5$ ,  $x = 0.3139$  y  $y = 0.3196$ . El cabezal del colorímetro se coloca en la superficie de los trozos de nopal fresco (control) y deshidratado, se aplicaron tres disparos a cada una de las muestras (12 trozos de nopal fresco y 12 trozos de nopal deshidratado).

A través de la ecuación siguiente se calcula la diferencia total de color:

$$\Delta E = \left[ (L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2 \right]^{1/2} \quad (1)$$

Dónde:

$\Delta E$  = Diferencia total de color.

$L_0^*$ ,  $a_0^*$  y  $b_0^*$  = Parámetros de color para la muestra control.

$L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$  = Parámetros de color de las muestras tratadas.

## **b Firmeza**

La retención de firmeza se evaluó siguiendo la metodología reportada por Barrera y col (2012). En un penetrómetro (Chatillon TCD200, Florida, EUA) con punta plana (2 mm de diámetro), la muestra se coloca en posición horizontal con respecto al equipo. La punta del penetrómetro se sitúa ligeramente (rozándola) sobre la superficie de la muestra, después, tres milímetros de la punta se introducen dentro del trozo de nopal a una velocidad de penetración de 17.2 mm/min. Este proceso se repite en cinco posiciones diferentes de la muestra. Se realizan tres réplicas para cada tratamiento. Los resultados se reportan como la fuerza de compresión máxima para penetrar la muestra expresada en Newton (N).

## **c pH**

El pH se determinó de acuerdo con la metodología de Yanchaguano y col (2020), la cual se basa en la técnica 981.12 de la AOAC (2012). Un potenciómetro digital (Hanna instruments, HI 2211, EUA) se sumerge en un vaso de precipitado que contiene 10 mL de la disolución; ésta se elabora a través de una mezcla perfecta de 10 g de nopal fresco y 50 mL de agua destilada para asegurar la uniformidad, se filtra y afora a 100 mL. Antes de usar el potenciómetro es necesario calibrarlo con buffer de pH 4.0 y 7.0.

## **d Acidez titulable**

La acidez titulable se determinó de acuerdo al método 942.15 de la AOAC (2012) mediante la titulación volumétrica con hidróxido de sodio (NaOH) 0.1 N y fenolftaleína como indicador.

De la homogenización obtenida para la medición de pH se toma una alícuota de 20 mL y se titula con NaOH 0.1 N hasta obtener un pH de  $8.1 \pm 0.2$ . Los resultados se expresan como porcentaje de ácido málico (González 2020).

$$AT(\%) = \frac{[(V_G)(mEqA)(N)(V)]}{[(m_m)(V_A)]} (100) \quad (2)$$

Donde:

$AT$  = Acidez titulable (% ácido málico).

$V_G$  = Volumen de NaOH gastado (mL).

$mEqA$  = Miliequivalente del ácido málico (0.067 g/mmol).

$N$  = Normalidad del NaOH (0.1 N).

$V$  = Volumen total de la disolución (mL).

$m_m$  = Masa de la muestra (g).

$V_A$  = Volumen de la alícuota de la muestra (mL).

### **e Sólidos solubles totales (SST)**

Acorde a la metodología planteada por la AOAC 932.12 (2012) se determinó el contenido de sólidos solubles totales con un refractómetro (Abbe, 300001, Sper Scientific, China). Se combinan el nopal (muestra fresca y deshidratada optimizada) y el agua destilada hasta formar una mezcla uniforme, se filtra y se coloca una gota en el refractómetro. El resultado se observa de manera óptica y se representa en °Brix.

## **3 Parámetro nutrimental**

### **a Ácido ascórbico (vitamina C)**

Se analiza la concentración de ácido ascórbico (vitamina C) en los trozos de nopal fresco y deshidratado basándose en la metodología propuesta por Iribe–Salazar y col (2015).

Inicialmente se genera una curva de calibración, se utilizan soluciones estándar de ácido ascórbico a concentraciones conocidas (1, 5, 10, 20, 30, 40 y 50 ppm) y 2,6-diclorofenolindofenol (DCPI). Estos dos compuestos se reducen y producen el gráfico de absorbancia ( $L_1-L_2$  contra concentración de vitamina C) para conformar la curva de calibración.

Previo a la medición de las muestras de vitamina C se obtiene la absorbancia para el DCPI total ( $L_1$ ) al mezclar 1 mL de ácido oxálico (0.4 % p/v) + 1 mL de acetato de sodio como solución buffer + 8 mL de DCPI.

El extracto se obtiene al homogeneizar 0.5 g de muestra y 15 mL de ácido oxálico al 0.4 % p/v, se utiliza un homogenizador (Ultra-Turrax IKA, T18 basic S1, Alemania) por 1 min y se filtra con tela organza constituida por 4 capas. La absorbancia se determina con un espectrofotómetro (Thermo Electron Corporation Genesys 10uv, Madison, EUA). De acuerdo con el método, el 2,6-diclorofenolindofenol se reduce al interaccionar con la vitamina C. Se obtienen las mediciones de absorbancia a 520 nm.

La absorbancia de las muestras se obtiene por medio de un espectrofotómetro (Thermo Electron Corporation Genesys 10uv, Madison, EUA), el cual se calibra en cero al utilizar 1 mL de muestra a analizar + 1 mL de acetato de sodio como solución buffer + 8 mL de agua desionizada. Posteriormente, se obtiene el DCPI residual ( $L_2$ ) a través de la absorbancia de la muestra, se emplea 1 mL de muestra a analizar + 1 mL de acetato de sodio como solución buffer + 8 mL de DCPI. La reducción entre el ácido ascórbico y el DCPI produce una absorbancia, la cual se obtiene de la resta entre  $L_1$  y  $L_2$ ; este dato se sustituye en la ecuación de la curva de calibración para obtener la concentración de vitamina C presente en la muestra (mg a. a./100 gff).

## **4 Parámetro enzimático**

### **a Actividad residual de peroxidasa (% *POD*)**

Para la determinación de la actividad residual de la peroxidasa se utilizó el método de Gastelum (2021), el cual consiste en la oxidación del guayacol y peróxido de hidrógeno como donador para formar tetraguayacol en presencia de peroxidasa.

Para la determinación de absorbancia se requiere con anticipación el extracto enzimático de las muestras, de igual modo la preparación del sustrato para que ocurra la reacción enzimática.

El extracto se obtiene al generar una mezcla homogénea a partir de 10 g de nopal (muestra fresca y deshidratada) + 0.5 g de Polivinilpolipirrolidona + 25 mL de fosfato de sodio como solución buffer 0.05 M, pH = 7. La mezcla homogénea se mantiene 2 h en la oscuridad a 4 °C en un homogenizador serológico de vaivén (Único, TTR-200, EUA), se filtra y se centrifuga a 11000×g por 25 min a 4 °C. El sobrenadante obtenido de la centrifugación se decanta en otro recipiente y se obtiene el extracto enzimático.

La mezcla de la muestra enzimática se elabora al incorporar 2.7 mL de fosfato de sodio como solución buffer 0.05 M, pH = 6.5 + 0.1 mL de peróxido de hidrógeno al 0.1 % v/v en agua + 0.15 mL de guayacol al 4 % v/v en agua + 0.15 mL de extracto enzimático (Elsayed y col 2018). Los cambios de absorbancia se obtienen a 25 °C y 470 nm, a lo largo de 3 min en intervalos de 10 s en un espectrofotómetro (Thermo Electron Corporation Genesys, 10uv, Madison, EUA). Las mediciones de la actividad residual de peroxidasa se realizan por triplicado.

De la pendiente obtenida en el gráfico de absorbancia ( $A$ ) contra el tiempo de reacción ( $t$ ) se cuantifica la actividad volumétrica ( $a_v$ ) de la peroxidasa, como se muestra a continuación:

$$a_v = \frac{\left(\frac{\Delta A}{t}\right) V_T}{\varepsilon l V_{Extr.}} \quad (3)$$

Donde:

$\Delta A/t$  = Pendiente ( $\text{min}^{-1}$ ) del gráfico absorbancia ( $A$ ) contra tiempo ( $t$ ).

$\varepsilon$  = Coeficiente de extinción molar del guayacol ( $25.5 \text{ mM}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ ).

$l$  = Espesor de la celda (1 cm).

$V_T$  = Volumen total (3.1 mL).

$V_{Extr.}$  = Volumen del extracto enzimático (0.15 mL).

## 5 Parámetros ingenieriles

### a Modelo de transferencia de masa para el proceso de secado

Los trozos de nopal se representaron como una placa infinita a la cual se le aplicó un secado convectivo por medio de un secador de túnel. El aire caliente que se utiliza en la operación pasa por la superficie inferior y superior de los trozos de nopal fresco.

### b Curvas de secado

Para llevar a cabo las curvas de secado se monitorea la masa de los 18 trozos de nopal cada 3 min con una balanza electrónica (Sartorius, TE1502S, Alemania) vinculada a una computadora, la cual está equipada con el software Sartocollect V-1.0.

Con la información obtenida en la operación de secado se grafica la pérdida de humedad ( $X$ , kg agua/ kg s. s.) a través del tiempo ( $t$ , min) transcurrido durante la deshidratación. Para determinar el contenido de humedad en base seca se utiliza la ecuación (Geankoplis 2016):

$$\bar{X} = \frac{m - m_{ss}}{m_{ss}} \quad (4)$$

Dónde:

$m$  = Masa de sólido húmedo (kg totales).

$m_{ss}$  = Masa del sólido seco (kg).

$\bar{X}$  = Contenido de humedad en base seca (kg agua/kg s. s.).

### **c Contenido de humedad crítico ( $X_c$ )**

Para determinar el contenido de humedad crítico ( $X_c$ ) se asume que la curva de secado se comporta de forma cuadrática, de acuerdo con la ecuación:

$$X = \beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 t^2 \quad (5)$$

Con los datos de humedad se realizan varias regresiones hasta encontrar que el término cuadrático ( $\beta_2$ ) deje de ser significativo ( $p > 0.05$ ); cuando eso ocurra, los datos representan una recta que corresponde al período de velocidad constante y se ubica el contenido de humedad crítico ( $X_c$ ).

### **d Densidad de flujo de masa ( $N_c$ ) y coeficiente local de transferencia de masa ( $k_Y$ )**

La densidad de flujo de masa ( $N_c$ ) se calcula a partir de la ecuación proporcionada por Geankoplis (2016):

$$N_c = \left( \frac{m_{ss}}{A} \right) \left( - \frac{dX}{dt} \right) \quad (6)$$

Dónde:

$m_{ss}$  = Masa de sólido seco (kg s. s.).

$A$  = Área superficial expuesta al secado ( $m^2$ ).

$X$  = Contenido de humedad en base seca (kg agua/ kg s. s.).

$t$  = Tiempo (min).

A continuación, se calcula el coeficiente de transferencia de masa por medio de la ecuación:

$$k_Y = \frac{N_c}{Y_s - Y} \quad (7)$$

Dónde:

$Y_s$  = Humedad de saturación del aire a la temperatura superficial del agua (kg H<sub>2</sub>O/kg aire seco).

$Y$  = Humedad del aire (kg H<sub>2</sub>O/kg aire seco).

$k_Y$  = Coeficiente individual de transferencia de masa (kg H<sub>2</sub>O/m<sup>2</sup>s ΔY).

### e Difusividad efectiva ( $D_e$ ) constante

Se utiliza la segunda ley de Fick para una placa plana infinita, en donde se emplea la siguiente ecuación para calcular la difusividad efectiva (Crank 1975).

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_e \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} \quad (8)$$

Dónde:

$X$  = Contenido de humedad (kg de agua/kg s. s.).

$t$  = Tiempo de secado (s).

$D_e$  = Difusividad efectiva (m<sup>2</sup>/s).

$x$  = Dimensión espacial.

Para analizar la difusividad efectiva en el periodo de velocidad decreciente se necesita la segunda ley de Fick, la cual está asociada a una condición inicial y dos de frontera, donde la solución es:

$$\frac{\bar{X} - X_{eq}}{X_c - X_{eq}} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} e^{-\frac{(2n-1)^2 \pi^2 F_o}{4}} \quad (9)$$

$F_o$  es el número de Fourier de masa que es igual a  $\frac{D_c}{L^2} t$ , se representa como:

$$\frac{\bar{X} - X_{eq}}{X_c - X_{eq}} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} e^{-\frac{(2n-1)^2 \pi^2 D_e t}{4L^2}} \quad (10)$$

### 1) Método de pendientes por subperiodos

Para la difusividad efectiva constante se parte de la solución de placa infinita con un solo término de la serie, se reduce la **Ecuación (9)** en:

$$\frac{\bar{X} - X_{eq}}{X_c - X_{eq}} = \frac{8}{\pi^2} e^{-\frac{(2n-1)^2 \pi^2 D_e t}{4L^2}} \quad (11)$$

El primer miembro de la igualdad se define como Fracción de Humedad No Alcanzada (FHNA).

Al obtener un solo término de la serie, se procede a linealizar la ecuación, se aplica el operador  $\ln$  a ambos miembros de la expresión:

$$\ln\left(\frac{\bar{X} - X_{eq}}{X_c - X_{eq}}\right) = -\frac{\pi^2 D_e t}{4L^2} + \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) \quad (12)$$

A partir de la pendiente se obtiene la difusividad efectiva para cada período, en donde a cada segmento le corresponde una difusividad efectiva constante.

De acuerdo a lo mencionado por Caro-Corrales y col (2005), al despreciar los demás términos de la serie infinita, el método de pendientes por subperiodos solo está permitido para números  $F_0$  mayores de 0.2 con un error del 2 % en la FHNA.

### 2) Método de aproximaciones sucesivas

Al asumir que la difusividad efectiva es constante se utiliza el método de aproximaciones sucesivas para calcularla. Se comienza a partir de la solución para placa infinita con 10 términos de la serie, como se muestra en la **Ecuación (9)**.

Después se requiere resolver el número de Fourier de masa por medio del método de Newton de segundo orden, el cual comienza con el cálculo de la Fracción de Humedad No Alcanzada (FHNA):

$$FHNA = \frac{\bar{X} - X_{eq}}{X_c - X_{eq}} \quad (13)$$

Enseguida se sustituye en la siguiente función:

$$f(F_o) = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{10} \frac{1}{(2n-1)^2} e^{\frac{-(2n-1)^2 \pi^2 F_o}{4}} - FHNA \quad (14)$$

Además, se necesita calcular la primera y segunda derivada de la función:

Dedución de la Primera derivada:

$$f'(F_o) = -2 \sum_{n=1}^{10} e^{\frac{-(2n-1)^2 \pi^2 F_o}{4}} \quad (15)$$

Dedución Segunda derivada:

$$f''(F_o) = \frac{\pi^2}{2} \sum_{n=1}^{10} e^{\frac{-(2n-1)^2 \pi^2 F_o}{4}} * (2n-1)^2 \quad (16)$$

Una vez obtenida la función, la primera y segunda derivada se sustituyen en el Método de Newton de segundo orden para conocer el nuevo número de Fourier de masa ( $F_{on}$ ), como se ve en la siguiente ecuación:

$$F_{on} = F_o - \frac{f(F_o)}{f'(F_o) - \frac{f(F_o)f''(F_o)}{2f'(F_o)}} \quad (17)$$

Una vez conocido este nuevo número de Fourier de masa, se obtiene la difusividad efectiva de la definición de  $F_o$ , esta queda de la siguiente manera:

$$D_e = \frac{L^2 F_o}{t} \quad (18)$$

## f Difusividad efectiva variable

### 1) Difusividad efectiva como una función cuadrática del tiempo

La materia de origen vegetal cuando se deshidrata tiende a presentar una difusividad efectiva variable. Ese comportamiento se debe a que el coeficiente de difusión tiende a aumentar por factores estructurales tales como: la porosidad, la presurización del aire y vapor del agua. De acuerdo con Iribe-Salazar y col (2018) para poder incluir esos cambios en la difusividad efectiva variable se utiliza la segunda ley de Fick para la difusión unidimensional como una función cuadrática del tiempo.

$$\frac{\partial X}{\partial t} = (D_0 + D_1 t + D_2 t^2) \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} \quad (19)$$

La **Ecuación (19)** se puede resolver con el método de separación de variables al establecer  $dT$  como:

$$dT = (D_0 + D_1 t + D_2 t^2) dt \quad (20)$$

Donde  $D_0$  es la difusividad efectiva inicial,  $D_1$  es la velocidad inicial de cambio de la difusividad efectiva  $D'_e = D_1 + 2D_2 t$ . El aumento ( $D_2 > 0$ ) o reducción ( $D_2 < 0$ ) de la rapidez de cambio para el coeficiente de difusión  $D''_e = 2D_2$  depende de  $D_2$ , el cual está vinculado con la distribución del número de poros y del tamaño de poro y, principalmente, con la dilatación de poros.

Después, se normaliza la segunda ley de Fick con la condición inicial y de frontera a partir de la FHNA =  $(X - X_{eq}) / (X_c - X_{eq})$ , la coordenada espacial adimensional,  $\xi = x / L$ , y el tiempo adimensional,  $\tau = T / L^2$ , para obtener:

$$\frac{\partial \psi}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \psi}{\partial \xi^2} \quad \begin{aligned} \psi(\xi, 0) &= 1 \\ \psi(-1, \tau) &= 0 \\ \psi(1, \tau) &= 0 \end{aligned} \quad (21)$$

Mediante el método de separación de variables se tiene la siguiente solución:

$$\psi = (A \cos \lambda \xi + B \operatorname{sen} \lambda \xi) e^{-\lambda^2 \tau} \quad (22)$$

A la **Ecuación (22)** se le aplican las condiciones de frontera, se obtiene el resultado  $B = 0$

y:

$$\lambda_n = (2n-1) \frac{\pi}{2} \text{ para } n = 1, 2, 3, \dots \quad (23)$$

La ley de Fick es una ecuación diferencial parcial lineal que, al emplear el principio de superposición, la solución general queda como:

$$\psi = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos \lambda_n \xi \exp(-\lambda_n^2 \tau) \quad (24)$$

Al considerar la condición inicial se calcula  $A_n$  por medio de la siguiente integración:

$$\int_{-1}^1 \cos \lambda_m \xi d\xi = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \int_{-1}^1 \cos \lambda_m \xi \cos \lambda_n \xi d\xi \quad (25)$$

Debido a la ortonormalidad, al usar  $\lambda_n = (2n-1) \frac{\pi}{2}$  para  $n = 1, 2, 3, \dots$ , la única solución diferente a cero para el segundo término de la **Ecuación (25)** es cuando  $m$  es igual a  $n$ , por lo tanto:

$$\psi = \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1}}{2n-1} \cos(2n-1) \frac{\pi}{2} \xi \exp\left[-\frac{\pi^2(2n-1)^2}{4} \tau\right] \quad (26)$$

Al resolver la integral de la **Ecuación (20)** se obtiene:

$$T = \left(D_0 + \frac{1}{2} D_1 t + \frac{1}{3} D_2 t^2\right) t \quad (27)$$

Al cambiar la **Ecuación (26)** en términos de sus variables originales,  $\psi = (X - X_{eq}) / (X_c - X_{eq})$ , la coordenada espacial adimensional,  $\xi = x/L$ , y el tiempo adimensional,  $\tau = T/L^2$ , en función del contenido de humedad para una difusividad efectiva variable con un comportamiento cuadrático del tiempo se tiene:

$$\frac{X - X_{eq}}{X_c - X_{eq}} = \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{2n-1} \cos \frac{(2n-1)\pi x}{2L} \exp \left[ -\frac{(2n-1)^2 \pi^2 (D_0 + \frac{1}{2} D_1 t + \frac{1}{3} D_2 t^2) t}{4L^2} \right] \quad (28)$$

Para calcular el contenido de humedad promedio de manera adimensional se integra la **Ecuación (26)** entre  $\bar{\psi} = \int_{-1}^1 \psi d\xi / \int_{-1}^1 d\xi$ , y se obtiene:

$$\bar{\psi} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \exp \left[ -\frac{(2n-1)^2 \pi^2}{4} \tau \right] \quad (29)$$

Al escribir los términos en sus variables originales se transforma en una solución analítica para el contenido de humedad promedio ( $\bar{X}$ ) en función del tiempo.

$$\frac{\bar{X} - X_{eq}}{X_c - X_{eq}} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \exp \left[ -\frac{(2n-1)^2 \pi^2 (D_0 + \frac{1}{2} D_1 t + \frac{1}{3} D_2 t^2) t}{4L^2} \right] \quad (30)$$

El tiempo adimensional,  $\tau = T/L^2$  se expresa como:

$$\tau = \frac{(D_0 + \frac{1}{2} D_1 t + \frac{1}{3} D_2 t^2) t}{L^2} \quad (31)$$

A cada tiempo adimensional se le asigna un número de Fourier de masa a partir del método de Newton de segundo orden, en el cual se utilizan 10 términos de la serie infinita. Se reorganiza el tiempo adimensional como:

$$\frac{\tau L^2}{t} = D_0 + \frac{1}{2} D_1 t + \frac{1}{3} D_2 t^2 \quad (32)$$

Donde los parámetros  $D_0$ ,  $D_1$  y  $D_2$  se obtienen por medio de regresión lineal.

## 6 Diseño experimental

Se utilizó un diseño central compuesto rotatable con dos factores: temperatura (55 a 80 °C) y velocidad de aire (0.5 a 1.5 m/s) con cinco niveles de variación, con un total de 13 tratamientos, para obtener la optimización de los trozos de nopal (*Opuntia ficus-indica* L.) por secado convectivo (**Cuadro 3**) (Montgomery 2003).

### a Análisis de datos

Para cada variable de respuesta se aplicó un análisis de regresión, los términos no significativos ( $p > 0.05$ ) se eliminaron, y se recalculó un nuevo modelo de predicción, con la finalidad de obtener un modelo con mejor ajuste. El análisis de datos y la obtención de los gráficos de superficie de respuesta y de contorno se realizó a partir del software *Design Expert* 7.0, *Stat-Ease, Inc.*, 2005.

Para que un modelo de predicción se considere adecuado y reproducible, se requiere cumplir con cuatro condiciones: significancia del modelo menor al 5 % ( $p < 0.05$ ), coeficiente de determinación ajustado mayor al 80 % ( $R_{aj}^2 > 0.80$ ), coeficiente de variación menor a 0.10 (C.V. < 10 %) y significancia de la prueba de falta de ajuste mayor al 5 % ( $p_{FDA} > 0.05$ ) ( Milán-Carrillo y col 2006; Milán-Carrillo y col 2002).

### b Optimización

La optimización se realizó por el método numérico, se empleó la metodología reportada por Derringer-Suich (1980), con la finalidad de obtener las condiciones óptimas de proceso de secado para generar un producto de calidad, las variables utilizadas fueron: diferencia total de color, retención de firmeza, retención de ácido ascórbico y actividad residual de peroxidasa.

**Cuadro 3.** Combinación de temperatura y velocidad de aire para la optimización del proceso de secado.

$x_1$	$x_2$	Temperatura	Velocidad de aire
codificada	codificada	(°C)	(m/s)
-1	-1	58.7	0.6
1	-1	76.3	0.6
-1	1	58.7	1.4
1	1	76.3	1.4
-1.4142	0	55.0	1.0
1.4142	0	80.0	1.0
0	-1.4142	67.5	0.5
0	1.4142	67.5	1.5
0	0	67.5	1.0
0	0	67.5	1.0
0	0	67.5	1.0
0	0	67.5	1.0
0	0	67.5	1.0

El método consiste en modificar las variables dependientes en una simplificación de una variable, la cual se obtiene por medio de una función de deseabilidad para cada variable de respuesta, que se mide en cada sitio de la región experimental. Al obtener las deseabilidades individuales, considerada para cada punto, se obtiene una medida de la simultaneidad de las variables en ese punto. El punto donde esa deseabilidad global es óptimo es el punto donde la deseabilidad de cada respuesta es adecuada.

### **c Contraste de nopal deshidratado óptimo con respecto al fresco**

Se utilizó una prueba *t* de *Student* con una  $\alpha = 0.05$  para comparar las medias de las variables de respuesta (color, firmeza, ácido ascórbico y peroxidasa). El factor fue la condición de la hortaliza con dos niveles (nopal fresco y deshidratado en condiciones óptimas). Se llevaron a cabo 5 réplicas de cada variable en el software estadístico STARGRAPHICS XVI.I (Montgomery 2003).

## VIII RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### A PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS, NUTRIMENTAL Y ENZIMÁTICO EN TROZOS DE NOPAL FRESCO

#### 1 Parámetros fisicoquímicos

##### a Color

Los parámetros de color obtenidos en trozos de nopal fresco ( $L^* = 50 \pm 0.9$ ,  $a^* = -27.5 \pm 0.3$  y  $b^* = 42 \pm 0.7$ ), corresponden en conjunto a un color verde brillante. Ortiz-Rodríguez (2010) evaluó el color en nopal fresco y reportó una tonalidad verde oscuro y luminosidad opaca ( $L^* = 31.42 \pm 0.04$ ,  $a^* = -13.96 \pm 0.15$  y  $b^* = 22.76 \pm 0.20$ ). Esta variación en los parámetros de color se puede deber al contenido de clorofila y tasa fotosintética, la cual cambia con la edad del cladodio.

En hortalizas verdes, una de las características más importantes para el consumidor con respecto a la aceptación es la apariencia y coloración, durante la senescencia esta última cambia debido a la degradación de clorofila (Maki-Díaz y col 2015).

##### b Firmeza

La firmeza de nopal fresco obtenida durante el análisis fue de  $5.9 \pm 0.62$  N. García-Osuna (2013) reportó una firmeza de 7.23 a 8.66 N en cladodio sin espina. Por otro lado, Rodríguez-Félix y Fortiz-Hernández (2016) obtuvieron una firmeza de 3.6 N en nopal fresco. Los autores mencionan que las diferencias de firmeza pueden estar influenciadas por la interacción del vegetal con el ambiente y por factores genéticos.

Referente a los factores genéticos, la firmeza puede estar determinada por la anatomía del tejido, la turgencia, el espesor de las paredes celulares y la presencia de la lámina media, misma que se encuentra abundantemente en los nopales (González-Hernández 2022).

### **c pH**

El pH obtenido fue de  $4.41 \pm 0.34$ , y resultó similar a lo reportado por Contreras-Padilla y col (2011) de 4.6 en cladodio de nopal. Galicia-Villanueva y col (2017) reportaron un pH de 3 a 3.5 en nopal. La variación en el pH se puede explicar por la cantidad de ácidos orgánicos (ácido málico, cítrico y oxálico), estos se ven afectados por el manejo del cultivo y la edad del cladodio (Contreras-Padilla y col 2011).

### **d Acidez titulable (AT)**

La acidez titulable presente en trozos de nopal fresco fue de  $0.42 \pm 0.14$  % de ácido málico, misma que difiere con lo reportado por Ayadi y col (2009) ( $0.65 \pm 0.06$  % de ácido málico). Por otra parte, Osorio-Córdoba y col (2011) obtuvieron  $0.82 \pm 0.02$  % de ácido málico, los autores mencionan que las variaciones asociadas a la acidez se pueden atribuir a la edad del cladodio, el área de producción y la hora de cosecha, debido a que el nopal es una planta con metabolismo tipo CAM, durante la noche absorben dióxido de carbono y lo almacena en forma de ácido málico en la vacuola (Maki-Díaz 2015).

La acidez influye en el sabor del nopal, sin embargo, esta característica no está definida en la norma NMX-FF-068-SCFI-2006 que establece las condiciones y características que debe tener el nopal para el consumo humano, solamente indica que deben cumplir con el tamaño, grado de calidad y variedad.

### **e Sólidos solubles totales (SST)**

El contenido de SST encontrado en trozos de nopal fresco fueron de  $3.4 \pm 0.47$  °Brix. Kaur y col (2017) reportaron un contenido de sólidos solubles totales similares de  $3.6 \pm 0.10$  °Brix en nopal fresco. Por otro lado, Legrine y col (2020) obtuvieron sólidos solubles totales superiores ( $5.5 \pm 0.5$  °Brix) en nopal fresco. Esta variación se puede atribuir a la edad del cladodio y al

riego de cultivo; en cladodios igual o menor a 2 años existe una mejor absorción de nutrientes y dióxido de carbono, cuando existe una gran humedad en el suelo del cultivo (Legrine y col 2020).

## **2 Parámetro nutrimental**

### **a Ácido ascórbico (vitamina C)**

La vitamina C obtenida en trozos de nopal fresco fue de  $9.3 \pm 0.8$  mg de a. a./100 g<sub>ff</sub>. Chartier y col (2016) obtuvieron resultados similares 9.3 mg de a. a./100 g<sub>ff</sub> en cladodio fresco. En cambio, Rivera (2016) reportó resultados superiores 19.8 mg de a. a./100 g<sub>ff</sub>. Probablemente, las diferencias en el contenido de vitamina C entre lo encontrado en el presente estudio y lo reportado por los autores mencionados estén asociadas al manejo del cultivo, ya que este puede generar un estrés en la planta e incrementar el estado de oxidación de la célula, aumentando la síntesis de ácido ascórbico para contrarrestar los efectos de dicha oxidación (Mora-Herrera y col 2011).

## **3 Parámetro enzimático**

### **a Actividad de peroxidasa**

La actividad volumétrica de peroxidasa en trozos de nopal fresco fue de  $2.0 \times 10^{-2} \pm 2.5 \times 10^{-4}$  U/mL. Aguilar y col (2005) reportaron una actividad de 2.88 U/mL. Por otro lado, Kohaich y Baaziz (2015) analizaron diferentes tipos de ecotipos de nopal, evaluaron la actividad de la peroxidasa con dos tipos de sustratos; guayacol y o-Dianisidina y reportaron actividad enzimática entre 0.39 a 130.1 U/mL. Esta diferencia se debe principalmente al comportamiento cinético particular llamado “tiempo de retraso”, donde la reacción de la peroxidasa puede tardar más en comenzar después de la inicialización con el peróxido de hidrógeno, esto depende del ecotipo y el sustrato utilizado (Kohaich y Baaziz 2015).

## **B MODELO DE REGRESIÓN DE PARÁMETROS FISCOQUÍMICOS, NUTRIMENTAL Y ENZIMÁTICO EN TROZOS DE NOPAL DESHIDRATADO EN UN SECADOR CONVECTIVO**

### **1 Análisis fisicoquímico**

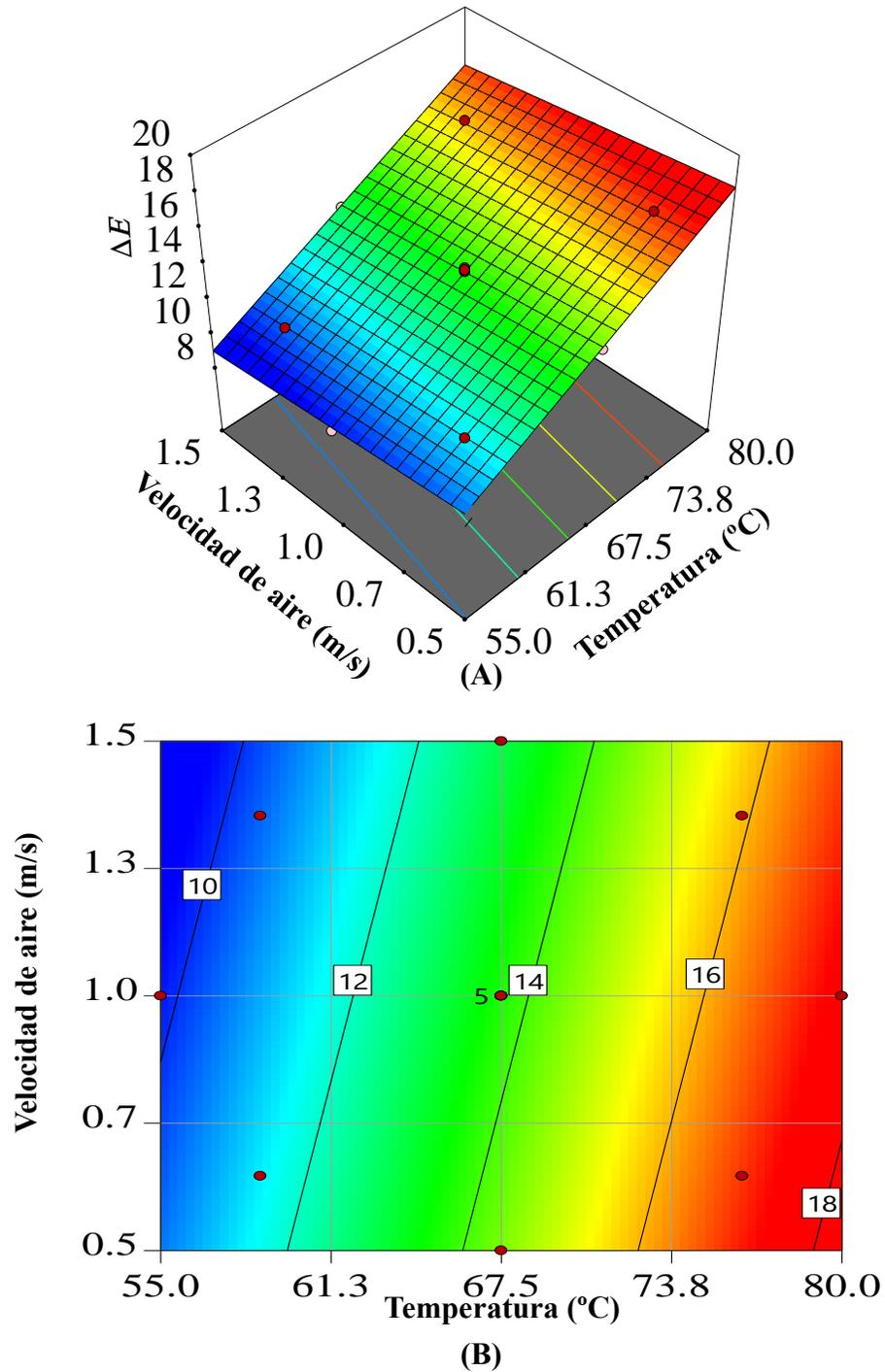
#### **a Diferencia total de color ( $\Delta E$ )**

En la **Figura 6** se muestra el efecto de los factores con respecto a la diferencia total de color ( $\Delta E$ ); en el eje  $x_1$  se presenta la temperatura,  $x_2$  la velocidad de aire y en el eje vertical la variable de respuesta ( $\Delta E$ ). De acuerdo con las condiciones de secado, la diferencia total de color mayor (17.3) se encontró a temperatura elevada y velocidad de aire baja ( $T = 80$  °C y  $v = 0.5$  m/s), se localiza en la zona en color rojo del gráfico; mientras que la  $\Delta E$  menor (9.6) se ubica en la región azul a temperatura baja (55 °C) y velocidad de aire alta (1.5 m/s).

Con la finalidad de analizar adecuadamente los efectos de los factores (temperatura y velocidad de aire) sobre las variables de respuesta, los modelos se presentan con factores codificados. A continuación, se presenta el modelo de predicción correspondiente a la diferencia total de color ( $\Delta E$ ). Un modelo lineal, fue el que mejor explicó el comportamiento de los resultados:

$$\Delta E = 13.69 + 2.75T - 0.53v$$

La magnitud del coeficiente de regresión para la temperatura (2.75) es mayor que el de la velocidad del aire (0.53), es decir, el factor temperatura tuvo un mayor efecto en la variable de respuesta, si se compara con el que ejerció la velocidad del aire. Por otro lado, el signo que le precede a la temperatura, al ser positivo (+), indica que el incremento en este factor aumenta la variable de respuesta.



**Figura 6.** Gráfico de superficie de respuesta (A) y contornos (B) que muestran el efecto de la temperatura y velocidad de aire sobre la diferencia total de color ( $\Delta E$ ) en trozos de nopal deshidratados en un secador convectivo.

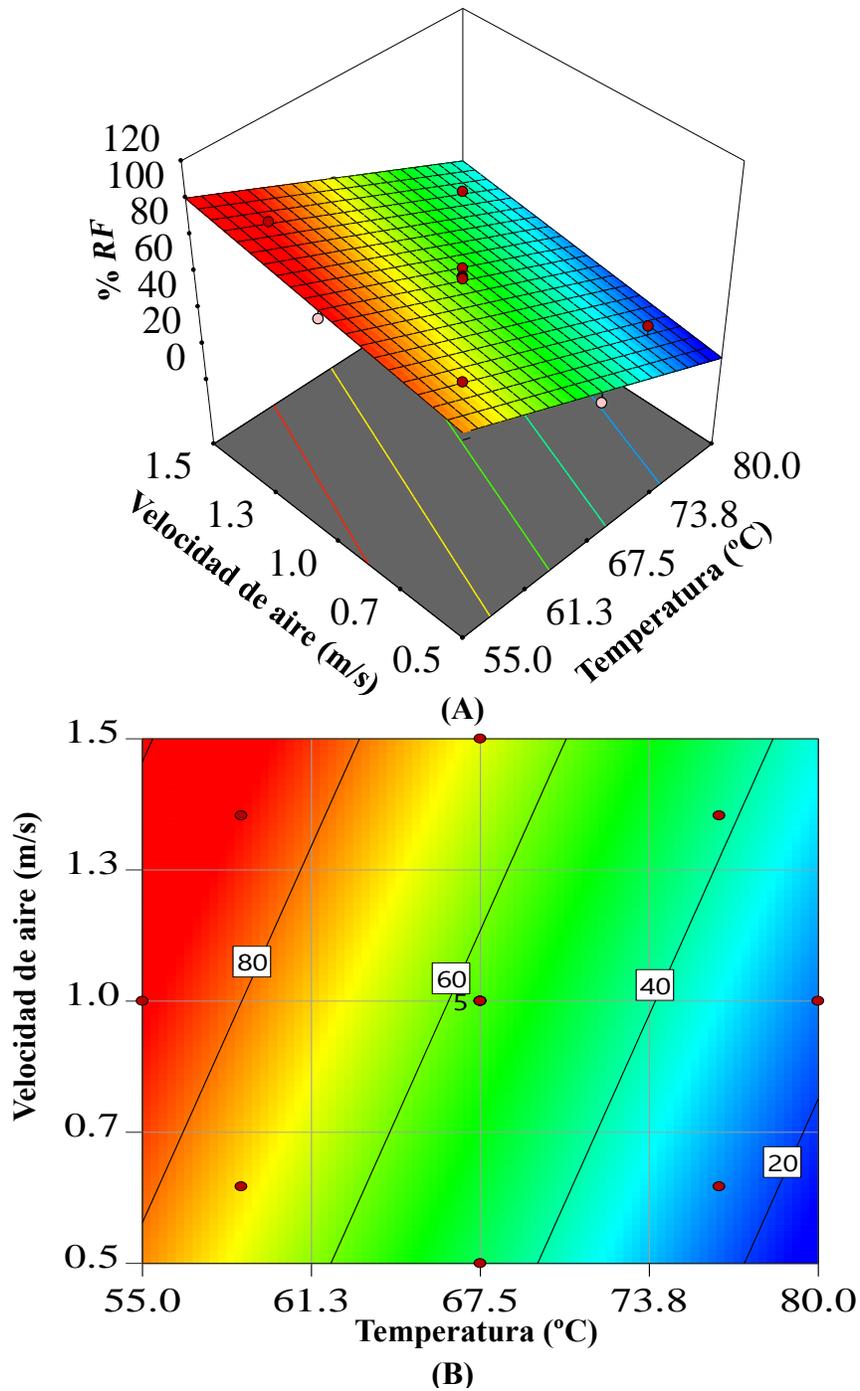
Al presentarse un signo negativo (–) antes del factor (temperatura o velocidad de aire), el incremento del factor disminuiría la variable de respuesta, en este caso, la diferencia total de color.

El modelo se considera adecuado y reproducible debido a que explicó más del 80 % (99 %) de la variación total de los resultados experimentales, la significancia del modelo fue menor a 0.05 ( $p < 0.0001$ ), pasó la prueba de falta de ajuste pues la significancia de la prueba fue mayor a 0.05 ( $p_{FDA} = 0.07$ ) y el coeficiente de variación fue menor al 10 % (1.18 %).

Estos resultados indican que el color del nopal deshidratado da una tonalidad verde-amarilla con alta luminosidad. Huerta-Medina y col. (2020) reportaron una  $\Delta E$  de 4.3 al secar tiras de nopal en un secador solar con convección forzada a 65 °C. Por otro lado, Pérez-Servín (2021) deshidrató cubos de nopal en un secador convectivo, y observó que, al aumentar la temperatura, la luminosidad y la tonalidad amarilla ( $b^*$ ) disminuían, mientras que la tonalidad verde ( $a^*$ ) incrementaba ligeramente.

Este comportamiento se puede deber a que el aumento de la temperatura y tiempo de secado incrementa la pérdida de clorofila presente en el nopal, la cual se degrada durante el procedimiento, pierde un átomo de magnesio formándose feofitina, el cual cambia de color verde brillante a verde olivo con tonos marrones (Diego-Zarate y col 2021).

El color es uno de los factores que más influye en la percepción del consumidor al momento de adquirir los alimentos. También suele ser una forma para valorar la calidad del alimento de manera visual, pero no siempre se cumple con este criterio (Mathias-Retiig y Ah-Hen 2014).



**Figura 7.** Gráfico de superficie de respuesta (A) y contorno (B) que muestran el efecto de la temperatura y velocidad de aire sobre la retención de firmeza (% *RF*) en trozos de nopal deshidratados en un secador convectivo.

## **b Retención de firmeza (% *RF*)**

El comportamiento de la retención de firmeza con respecto a la temperatura y la velocidad de aire se observa en la **Figura 7**. En la **Figura 7 A**, se muestra el gráfico de superficie de respuesta de la retención de firmeza.

El % *RF* se encontró en un rango de 16.2 a 88.6 %. La mayor retención se obtuvo en el tratamiento con  $T = 58.7$  °C y  $v = 1.4$  m/s, así mismo, la menor retención se obtuvo a una  $T = 80$  °C y  $v = 1.0$  m/s. Este comportamiento puede ser debido a que un incremento de la temperatura del aire y un prolongado tiempo de secado disminuyen la retención de firmeza.

La significancia del estadístico *F* para el modelo (109.4) fue menor a 0.05 ( $p < 0.0001$ ):

$$\%RF = 56.92 - 23.11T + 8.05v$$

El coeficiente de variación fue de 8.22 %, este es aceptable de acuerdo con lo recomendado (< 10 %). Pasó la prueba de falta de ajuste ( $p_{Fda} = 0.06$ ) y aclaró el 96 % de la variabilidad de los resultados experimentales, por lo tanto, se considera apropiado y reproducible. En el gráfico de superficie de respuesta, el factor temperatura presenta una mayor pendiente que el factor velocidad del aire, esto significa que la temperatura tuvo un mayor efecto sobre la respuesta retención de firmeza. Este comportamiento también se puede determinar a partir de la magnitud de los coeficientes de los factores en el modelo matemático con factores codificados.

Marín y col (2006) secaron papaya y pimiento rojo a distintas temperaturas (40 a 80 °C), ambos productos mostraron la misma tendencia, es decir, a medida que aumentó la temperatura de secado disminuyó la retención de la firmeza respecto al fresco. Esta tendencia se podría atribuir al daño en la pared celular; se ocasiona una destrucción y solubilización de los componentes debido a la elevada temperatura de secado (Santacruz-Vázquez y col 2008); además, la membrana citoplasmática y el volumen intracelular se ven reducidos, al igual que la lámina media y la cutícula cerosa de las células epidérmicas (Marín y col 2006).

## 2 Análisis nutrimental

### a Retención de ácido ascórbico (% RAA)

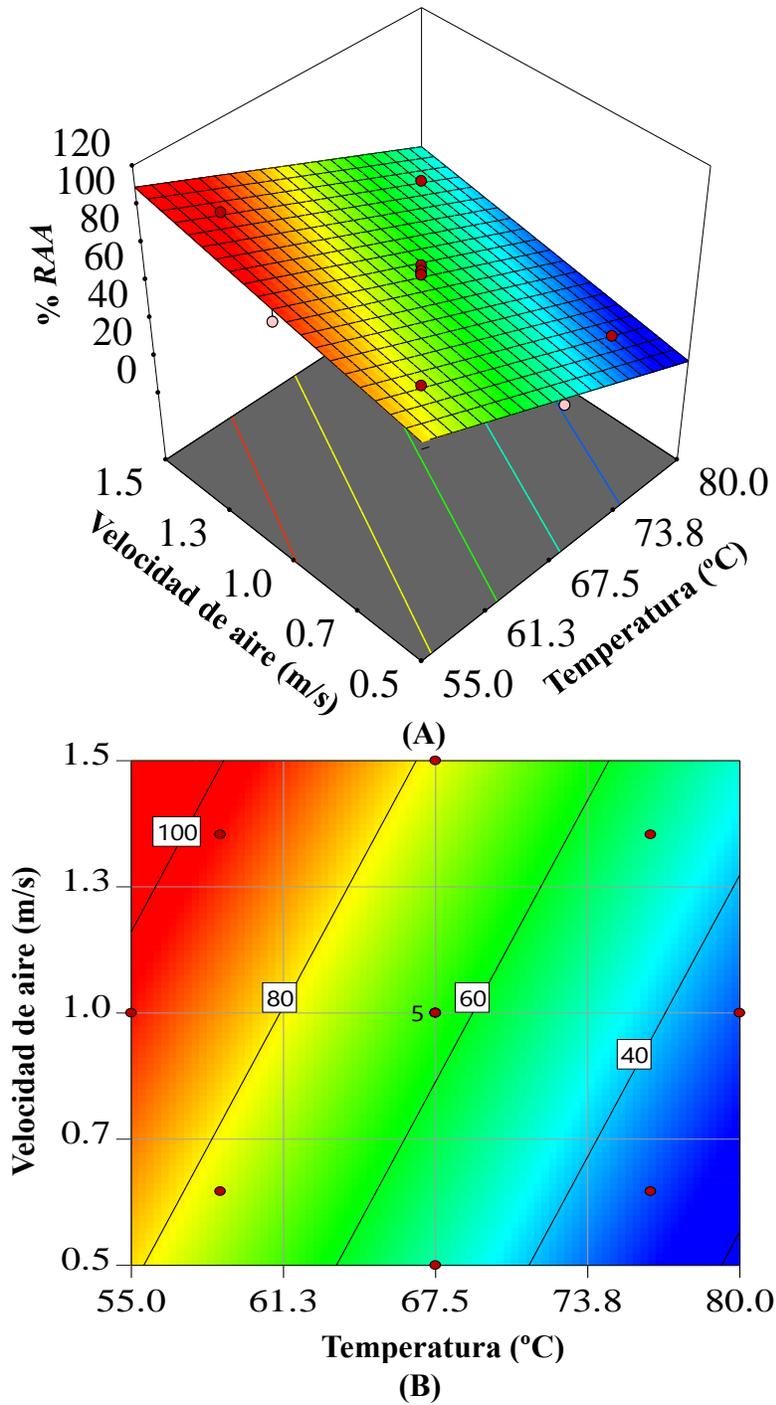
La retención de ácido ascórbico se presenta en la **Figura 8**. El % RAA se encontró en un rango de 27 – 97 %. En el gráfico de superficie de respuesta se puede apreciar que la retención de ácido ascórbico en trozos de nopal disminuye al incrementar la temperatura a una velocidad de aire baja, también, se observa un aumento de esta variable cuando se incrementa gradualmente la velocidad de aire a una baja temperatura. Esto indica que, al aumentar la temperatura y el tiempo de secado, disminuye el contenido de ácido ascórbico.

En el siguiente modelo de predicción, los términos lineales de la temperatura y velocidad de aire resultaron significativos ( $p < 0.0001$ ), la temperatura presentó un mayor efecto sobre el % RAA:

$$\% RAA = 63.85 - 22.34T + 10v$$

No presentó falta de ajuste de  $p_{Fda} = 0.06$ , el coeficiente de variación fue de 6.20 % y logró explicar el 97 % de la variación de los resultados experimentales, por lo que se considera un modelo adecuado y reproducible.

Ramallo y Mascheroni (2012) secaron rodajas de piña mediante un secador convectivo con aire caliente a temperatura constante (45, 60 y 75 °C) obtuvieron retenciones de ácido ascórbico entre 73 a 94 %. Los bajos porcentajes de retención quizás se deban a que la vitamina C es un componente muy termosensible, esta es degradada por el calor y la oxidación. Por otra parte, Castañeda y col (2010) compararon la pérdida de ácido ascórbico en chalarina (zapote) al utilizar diferentes métodos de secado como: deshidratación osmótica al vacío, secado convectivo y liofilización. Los resultados en dicho estudio fueron: 23.7 a 79.4 %.



**Figura 8.** Gráfico de superficie de respuesta (A) y contorno (B) que muestran el efecto de la temperatura y velocidad de aire sobre la retención de ácido ascórbico (% RAA) en trozos de nopal deshidratado en un secador convectivo.

De acuerdo con los resultados anteriores, durante el secado convectivo, ocurre una destrucción en la estructura celular de la hortaliza debido a la deshidratación, esto provoca la liberación del ácido ascórbico, y al estar en presencia de oxígeno se oxida transformándose en ácido dehidroascórbico (Adekunte y col 2010; Haile 2013).

### **3 Análisis enzimático**

#### **a Actividad residual de peroxidasa (% *POD*)**

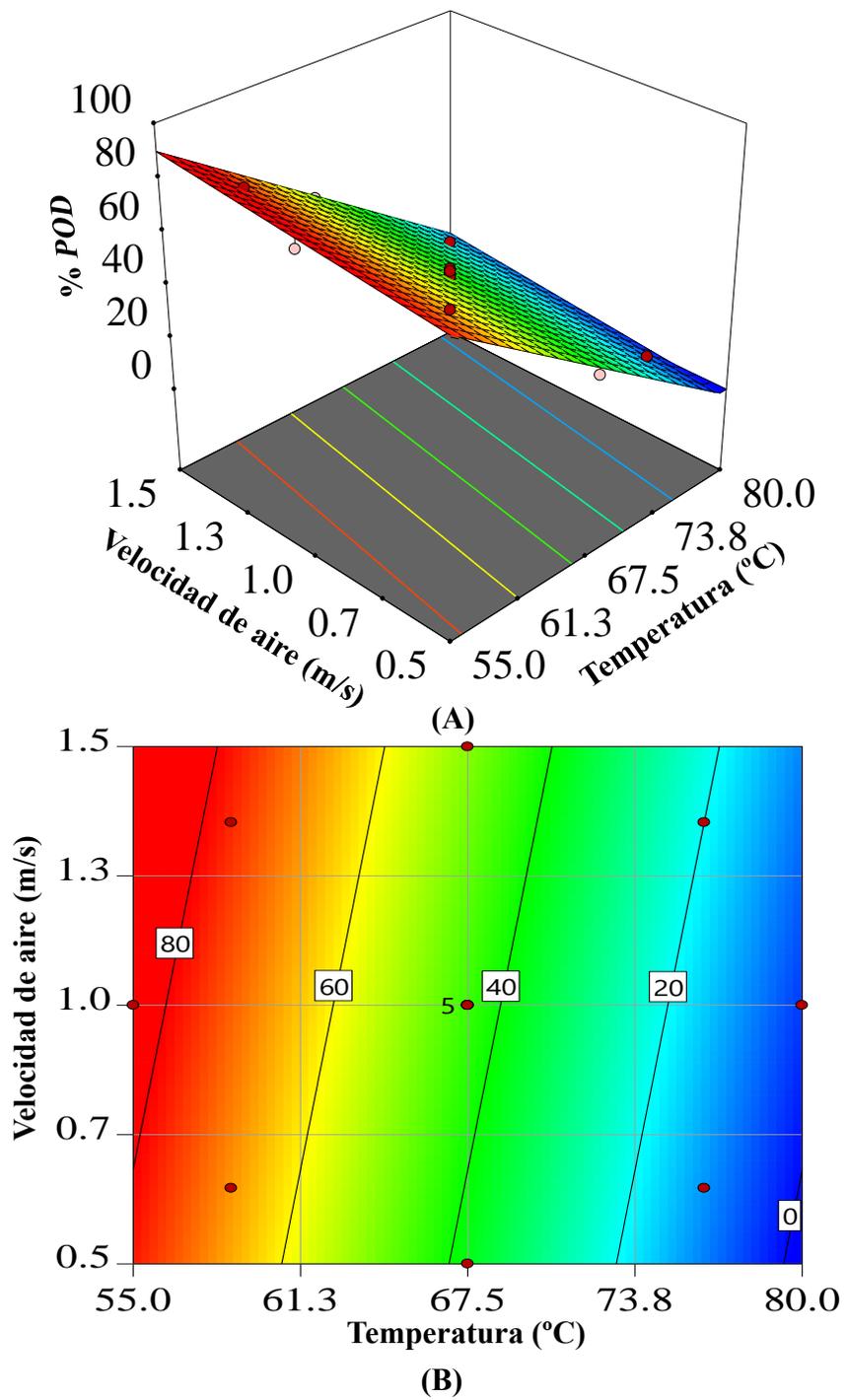
Los resultados de actividad residual de peroxidasa se muestran en la **Figura 9**. El % *POD* estuvo en el intervalo de 0 a 80 %. En el gráfico de superficie de respuesta se observa para el factor temperatura una pendiente muy pronunciada, esto indica que este factor tuvo un mayor efecto sobre el % *POD* (**Figura 9 A**). Además, se observa que una alta temperatura y una baja velocidad de aire, provoca una disminución en el % *POD*. Lo mismo se puede apreciar en la **Figura 9 B**, el aumento de la temperatura, así como la disminución de la velocidad de aire, genera un descenso de la variable de respuesta.

$$\%POD = 43.92 - 28.27T + 4.35v$$

El modelo mostró una tendencia lineal, explicó una variación total de resultados experimentales del 99 %, no presentó falta de ajuste ( $p_{Fda} = 0.06$ ) y el coeficiente de variación fue menor (5.73) al 10 %.

La peroxidasa pertenece a las enzimas oxidorreductasas y cataliza la oxidación de diversos compuestos a través del peróxido de hidrógeno (Chukwudi y col 2021). Al ser una enzima resistente al calor, se utiliza como indicador de calidad para los tratamientos térmicos.

Hamedi y col (2021) reportaron que el incremento de temperatura de 50 a 70 °C disminuye la actividad enzimática en rábano y que a una temperatura de 80 °C se eliminó toda la actividad enzimática presente en el alimento.



**Figura 9.** Gráfico de superficie de respuesta (A) y contorno (B) que muestran el efecto de la temperatura y velocidad de aire sobre la actividad residual de peroxidasa (% *POD*) en trozos de nopal deshidratado en un secador convectivo.

Este comportamiento se puede atribuir a que las altas temperaturas degradan la estructura terciaria de la peroxidasa inactivando su función y haciendo irreversible su regeneración (Hamedi y col 2021).

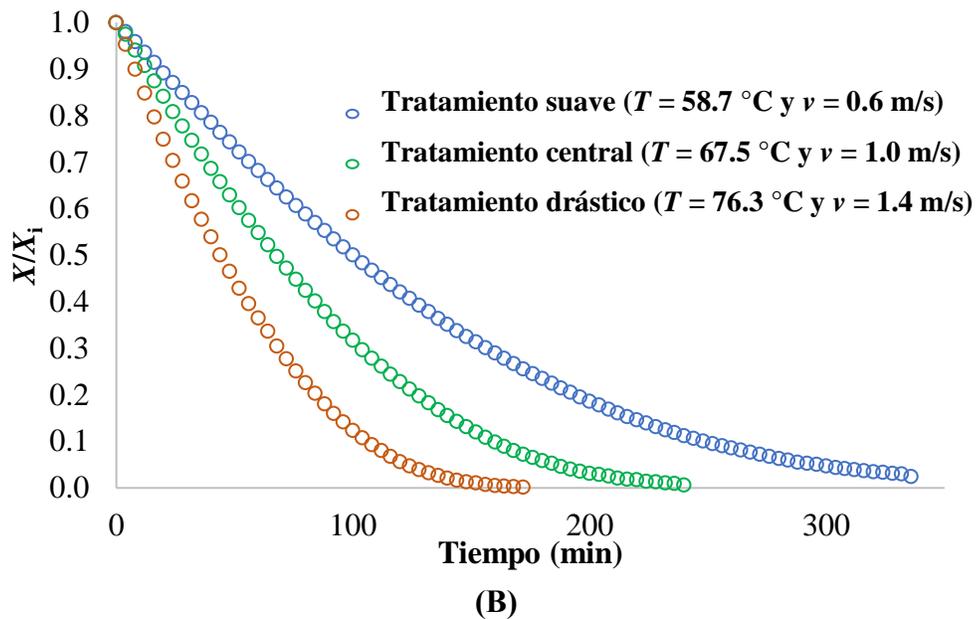
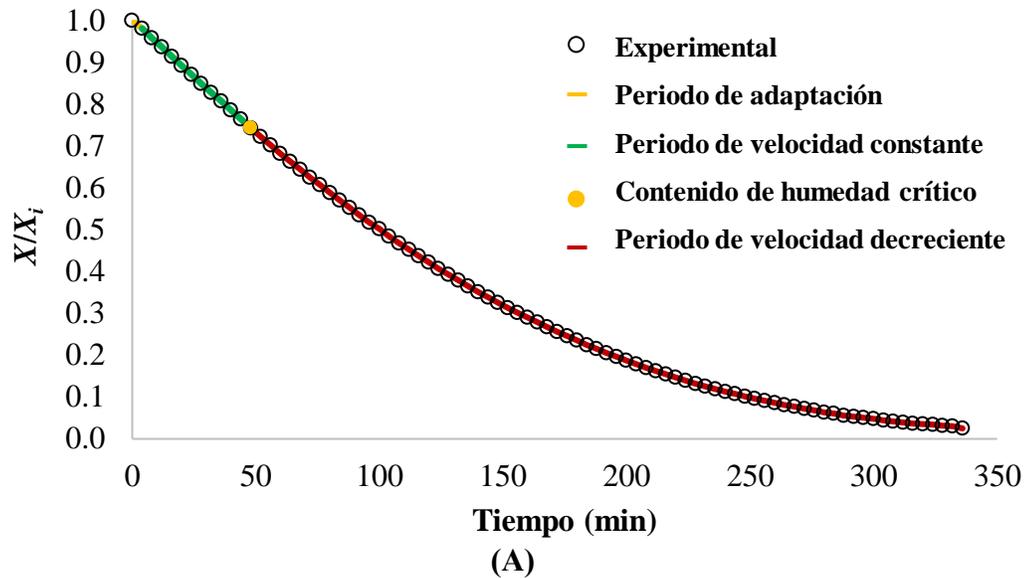
## **C PARÁMETROS INGENIERILES**

### **1 Curvas de secado en trozos de nopal**

En el gráfico de la **Figura 10 A**, se muestra la curva de secado del tratamiento suave, en donde se observa una pérdida constante de agua con respecto al tiempo, la cual se define con línea verde; esa etapa se llama período de velocidad constante (PVC). Después de un tiempo, la pérdida de agua decreció progresivamente, hasta llegar a una masa constante, esta fase se llama periodo de velocidad decreciente (PVD); se puede distinguir en línea roja.

En un secador convectivo se secaron trozos de nopal en condiciones diferentes de temperatura y velocidad de aire (**Figura 10 B**). En el gráfico se puede observar que tanto la temperatura y velocidad de aire afectan el tiempo de secado.

Los efectos de la temperatura y velocidad de aire sobre el tiempo de secado en nopal fueron similares al estudio previo realizado por López y col (2009), quienes observaron que tanto la temperatura como la velocidad de aire tuvieron una influencia sobre la reducción del tiempo de secado, en el que sobresale la temperatura. Además, en la cinética de secado ellos no observaron ningún periodo de velocidad constante en los diferentes tratamientos. Estos resultados difieren con lo obtenido en el presente trabajo, debido a que los cladodios tienen una cutícula que recubre toda la superficie, de esta manera, el agua presente en el alimento se retiene y no presenta humedad en la corteza, entonces al pasar por el procedimiento de secado el periodo de velocidad constante no se aprecia (López y col 2009; Martínez-Soto y col 2010).



**Figura 10.** (A) Etapas de la cinética de secado en trozos de nopal en un secador convectivo en el tratamiento suave ( $T = 58.7\text{ °C}$  y  $v = 0.6\text{ m/s}$ ) y (B) Efecto de la temperatura y velocidad de aire sobre las cinéticas de secado en el tratamiento suave ( $T = 58.7\text{ °C}$  y  $v = 0.6\text{ m/s}$ ), central ( $T = 67.5\text{ °C}$  y  $v = 1.0\text{ m/s}$ ) y drástico ( $T = 76.3\text{ °C}$  y  $v = 1.4\text{ m/s}$ ) en trozos de nopal.

Las observaciones coinciden con el comportamiento de un alimento durante el secado (Geankoplis 2016).

**a Contenido de humedad crítico ( $X_c$ )**

El contenido de humedad inicial ( $X_i$ ) en los nopales utilizados en cada tratamiento de secado varió de 18.36 a 22.29 kg de agua/kg de s. s., debido a esta variabilidad, en cada tratamiento se utilizó la razón entre el contenido de humedad crítico ( $X_c$ ) y el contenido de humedad inicial ( $X_i$ ) correspondiente a ese  $X_c$ . Esta razón para el contenido de humedad crítico correspondiente para cada condición de proceso (temperatura y velocidad de aire) durante el secado convectivo de trozos de nopal se presenta en el **Cuadro 4**. Los  $X_c/X_i$  estuvieron en un rango de 0.67 a 0.76 ( $X_c$  desde 12.9 a 15.3 kg de agua/kg de s. s.). El  $X_c$  menor se encontró a una temperatura de 80 °C y a una velocidad de aire de 1.0 m/s, mientras que el  $X_c$  mayor a 55 °C y 1.0 m/s. El contenido de humedad crítico disminuye al aumentar la temperatura; esta tendencia se le puede atribuir a que a mayor temperatura de secado es más rápida la pérdida de agua en la superficie del alimento por el incremento del movimiento molecular, facilitando su movilidad, el cual no depende de la resistencia interna (Treybal 1991; Caro-Corrales y col 2005). Este comportamiento es similar a lo reportado por Sáez-Ceniceros (2019) en un estudio para modelar la difusividad efectiva y optimizar la deshidratación de rodajas de pera en un secador convectivo en diferentes condiciones de temperatura (60 a 80 °C) y velocidad de aire (1.0 a 2.0 m/s).

Han y Kim (2018), reportaron contenidos de humedad crítico semejantes ( $X_c/X_i$  de 0.62 a 0.95), la investigación consistió en secar frutos de palma con distintas condiciones de temperatura (200 a 280 °C) y velocidad de aire (0.79 a 1.09 m/s).

**Cuadro 4.** Contenido de humedad crítico respecto al contenido de humedad inicial de trozos de nopal deshidratado en un secador convectivo con diferentes temperaturas y velocidades de aire.

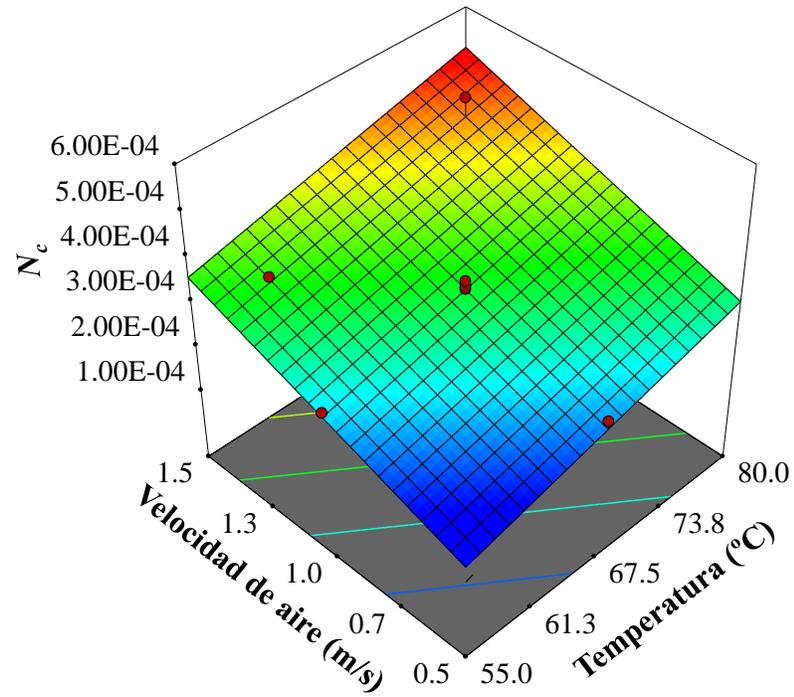
<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Velocidad de aire (m/s)</b>	<b><math>X_c/X_i</math></b>
55.0	1.0	0.76
58.7	0.6	0.74
58.7	1.4	0.69
67.5	0.5	0.70
67.5	1.0	0.68
67.5	1.5	0.74
76.3	0.6	0.69
76.3	1.4	0.7
80.0	1.0	0.67

Además, Corréa y col (2012), encontraron un contenido de humedad crítico de 2.97 kg de agua/ kg de s. s. ( $X_c/X_i$  de 0.23) al secar rodajas de tomate en un secador infrarrojo a una potencia de 300 W y una distancia fija de 15 mm; resultados que difieren a lo reportado en este trabajo. Por otro lado, Barroca y col (2020) deshidrataron *Sarcocornia perennis* en un secador convectivo a 40, 50, 60 y 70 °C, donde el contenido de humedad crítico estuvo entre 5.22 a 7.22 kg de agua/kg de s. s. Estos autores mencionan que la variación del contenido de humedad crítico se debe a diversos factores, principalmente el tipo y estructura del alimento, la temperatura y la velocidad de aire.

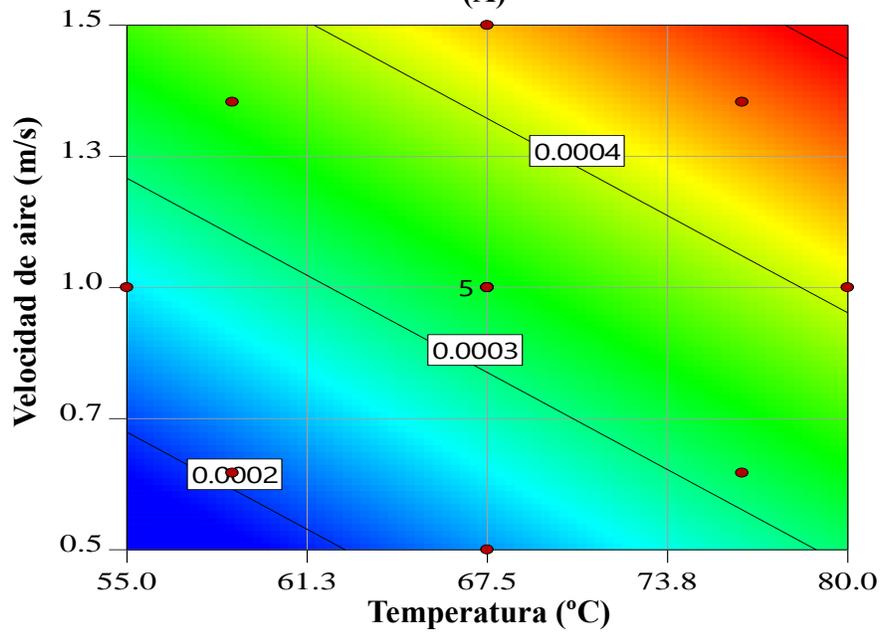
El nopal está conformado principalmente de mucílago (componente principal de la fibra dietética), es un polisacárido que forma estructuras moleculares que brindan la capacidad de retener el agua; quizás durante el secado la presencia de este polímero en el nopal contribuye a la pérdida de agua lentamente en comparación a otros frutos y vegetales, y por ello, no se presenta el periodo de velocidad constante ni el contenido de humedad crítico (López y col 2009; Martínez-Soto y col 2010).

#### **b Densidad de flujo másico ( $N_c$ )**

La densidad de flujo másico se presenta en la **Figura 11**. La densidad de flujo másico en trozos de nopal deshidratado estuvo entre  $1.84 \times 10^{-4}$  a  $4.98 \times 10^{-4}$  kg agua/m<sup>2</sup>s. Durante el secado, a medida que aumentan los factores (temperatura y velocidad de aire) se observa un incremento de la  $N_c$ ; en el tratamiento drástico ( $T = 76.3$  °C y  $v = 1.4$  m/s) se obtuvo la  $N_c$  más alta, por otro lado, la  $N_c$  menor en el tratamiento suave ( $T = 58.7$  °C y  $v = 0.6$  m/s).



(A)



(B)

**Figura 11.** Gráfico de superficie de respuesta (A) y contorno (B) que muestran el efecto de la temperatura y velocidad de aire sobre la densidad de flujo de masa ( $N_c$ ) en trozos de nopal deshidratados en un secador convectivo.

Los resultados obtenidos pueden compararse con la densidad de flujo másico reportada por Sáez-Ceniceros (2019), quien obtuvo una  $N_c$  entre  $2.27 \times 10^{-4}$  a  $3.86 \times 10^{-4}$  kg agua/m<sup>2</sup>s al deshidratar rodajas de pera en un secador convectivo, con temperaturas de 60 a 80 °C y velocidades de aire de 1.0 a 2.0 m/s. Por otro lado, Vázquez-López (2014) deshidrató chiles poblanos enteros en un secador de microondas a diferentes temperaturas (32.5 a 42.5 °C) y velocidad de aire (0.8 a 2.2 m/s), reportó una  $N_c$  en el intervalo de  $2.03 \times 10^{-4}$  a  $8.31 \times 10^{-4}$  kg agua/m<sup>2</sup>s. En ambos estudios se observó un incremento de la  $N_c$  al aumentar la temperatura y velocidad de aire, este comportamiento se puede relacionar con la temperatura y la velocidad de aire, la primera aumenta el flujo de calor hacia la superficie de la muestra y el flujo de aire remueve las moléculas de vapor de agua dentro de la película gaseosa, esto favorece la transferencia de masa externa de la película gaseosa, por ende, incrementa la densidad de flujo de masa (Sáez-Ceniceros 2019). A continuación, se presenta el modelo de predicción:

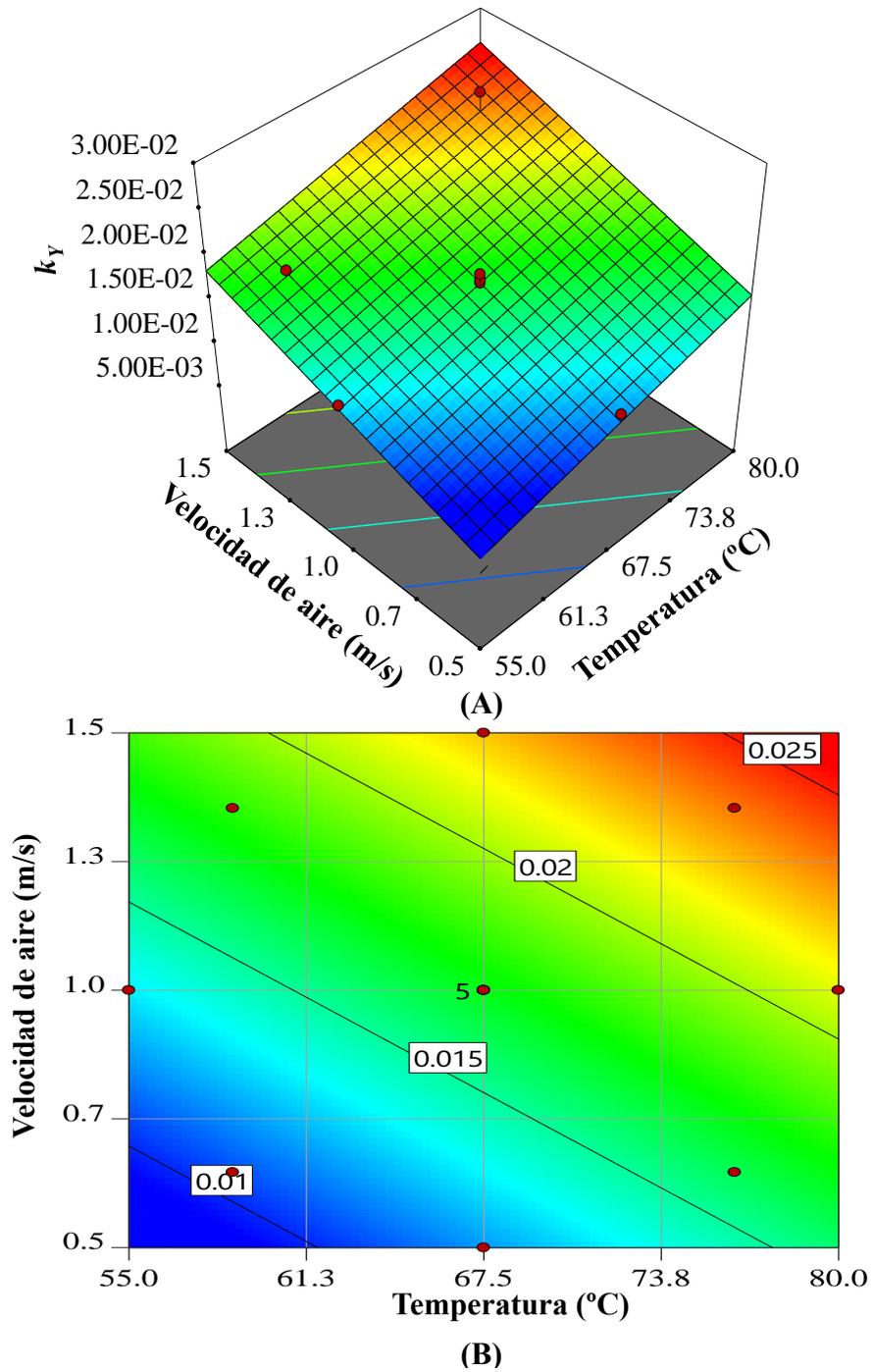
$$N_c = 3 \times 10^{-4} + 1 \times 10^{-4} T + 1 \times 10^{-4} v$$

El estadístico  $F$  (71.6) obtenido para el modelo, implica que el modelo resultó significativo ( $p < 0.0001$ ). El modelo presentó un comportamiento lineal, explicó una variación total de resultados experimentales del 93 %, no presentó falta de ajuste ( $p_{Fda} = 0.065$ ) y el C.V. fue de 6.44 %.

### c Coeficiente individual de transferencia de masa ( $k_Y$ )

En la **Figura 12** se muestra el comportamiento del coeficiente individual de transferencia de masa, a las diferentes temperaturas y velocidades del aire. Los resultados experimentales están en un rango de  $9.0 \times 10^{-3}$  a  $2.5 \times 10^{-2}$  kg agua/m<sup>2</sup>s $\Delta Y$ . Al incrementarse ambos factores del proceso provocaron un aumento de esta variable.

$$k_Y = 1.71 \times 10^{-2} + 2.80 \times 10^{-3} T + 3.70 \times 10^{-3} v$$



**Figura 12.** Gráfico de superficie de respuesta (A) y contorno (B) que muestran el efecto de la temperatura y velocidad de aire sobre el coeficiente individual de transferencia de masa ( $k_y$ ) en trozos de nopal deshidratados en un secador convectivo.

El estadístico  $F$  para el modelo (69.83), implica que el modelo es significativo ( $p < 0.0001$ ). En el modelo aparecen los términos de temperatura y velocidad de aire lineales, los cuales fueron significativos. El modelo de predicción se considera adecuado y reproducible, porque explicó el 93 % de la variación de los resultados experimentales, paso la prueba de falta de ajuste ( $p_{FDA} = 0.065$ ) y el C.V. fue de 6.5 %.

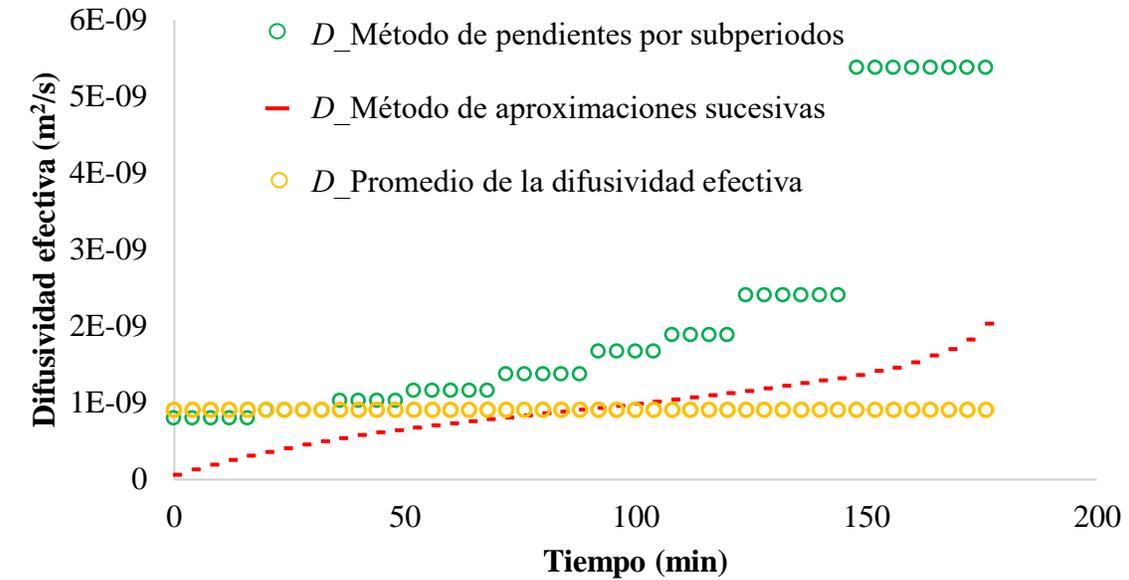
Allier-González (2012) deshidrató rodajas de papa en un secador convectivo a temperatura constante (60 °C), humedad relativa constante (30 %) y cuatro niveles de velocidad de aire (1.0, 1.4, 1.8 y 2.2 m/s). Dicho autor obtuvo resultados en un rango de  $4.87 \times 10^{-3}$  a  $7.24 \times 10^{-3}$  kg agua/  $m^2 s \Delta Y$ , en donde observó que al aumentar la velocidad de aire el  $k_Y$  incrementaba.

El aumento de la temperatura incrementa la capacidad de retención de agua en el aire y crece la movilidad de las moléculas de agua presentes en la superficie de la muestra, facilitando el retiro de estas con el flujo de aire (Sáez-Ceniceros 2019).

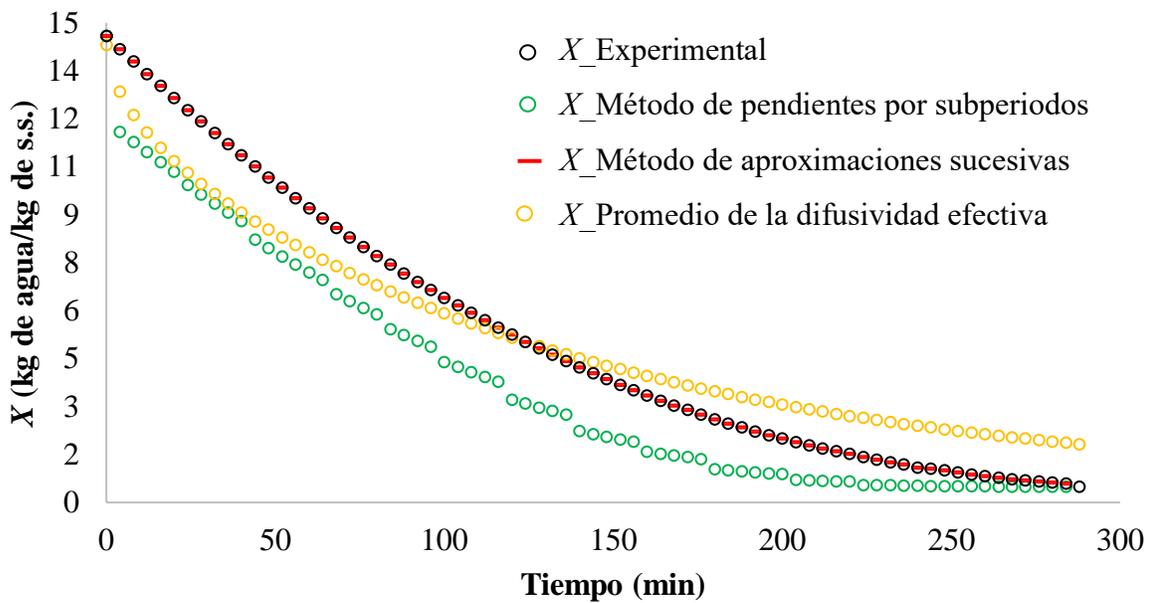
## **2 Periodo de velocidad decreciente**

### **a Difusividad efectiva ( $D_e$ ) constante**

El efecto del tratamiento suave sobre la difusividad efectiva al ser considerarla constante y sobre las cinéticas de secado a partir del periodo de velocidad decreciente; la cual se calcula por el método de pendientes por subperiodos, método de aproximaciones sucesivas y promedio de las difusividades obtenidas con este último método, se puede observar en la **Figura 13**. La  $D_e$  que se aprecia con el método de pendientes por subperiodos estuvo en un rango de  $5.16 \times 10^{-10}$  a  $3.52 \times 10^{-9}$   $m^2/s$ , en donde se observa que la difusividad efectiva aumenta a medida que transcurre el tiempo, pero se mantiene la  $D_e$  constante en cada subperiodo (**Figura 13 A**).



(A)



(B)

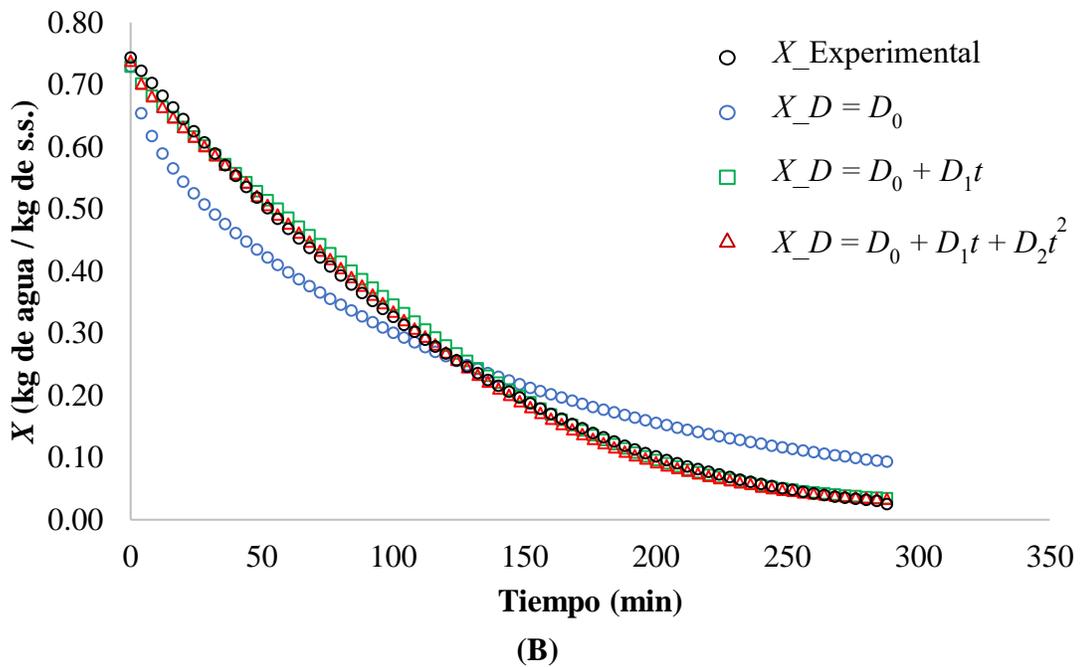
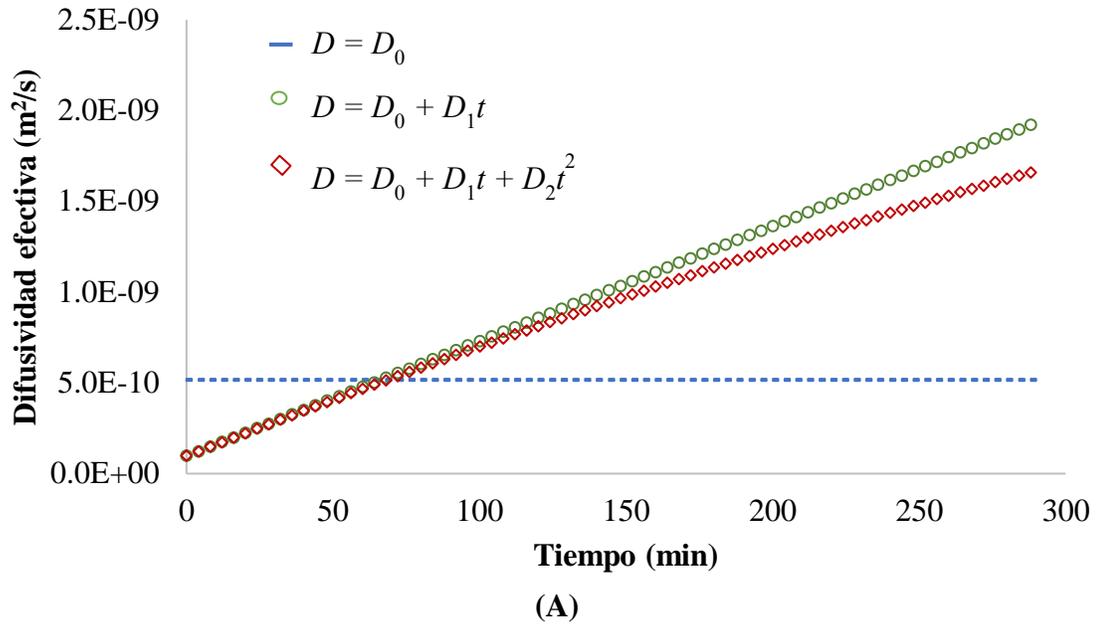
**Figura 13.** Difusividad efectiva estimada (A) y cinéticas de secado experimental (B), predichas con el método de pendientes por subperiodos, método de aproximaciones sucesivas y promedio de estas últimas para trozos de nopal en el tratamiento suave ( $T = 58.7 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $v = 0.6 \text{ m/s}$ ), considerando una  $D_e$  constante.

Al igual que en el método anterior, en el método de aproximaciones sucesivas la  $D_e$  incrementó en relación con el tiempo; los resultados estuvieron en un intervalo de  $2.09 \times 10^{-11}$  a  $1.16 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s. Pero no se considera adecuado, debido a que la difusividad incrementa indefinidamente con respecto al tiempo. La  $D_e$  promedio fue de  $5.23 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s. La  $D_e$  considerada constante se encontró dentro del rango reportado por San Miguel y col (2022) de  $4.75 \times 10^{-10}$  a  $3.01 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s: dichos autores deshidrataron cladodio (*Opuntia ficus-indica*) en un secador convectivo a 50, 60 y 70 °C.

Los resultados experimentales del contenido de humedad promedio se comparan con el contenido de humedad obtenido en cada método: de pendiente por subperiodos, aproximaciones sucesivas y promedio (**Figura 13 B**). El contenido de humedad promedio de los resultados experimentales se comparó con los métodos correspondientes a la  $D_e$  constante; el método de aproximaciones sucesivas no presentó buen ajuste ( $R^2 = 0.990$ ) durante todo el procedimiento de secado, ya que solamente se utilizó un solo término en la solución analítica y la difusividad efectiva se consideró constante en cada pendiente. El método de aproximaciones sucesivas dio una solución satisfactoria, al ajustarse perfectamente a los resultados experimentales del periodo de velocidad decreciente.

#### **b Difusividad efectiva ( $D_e$ ) variable**

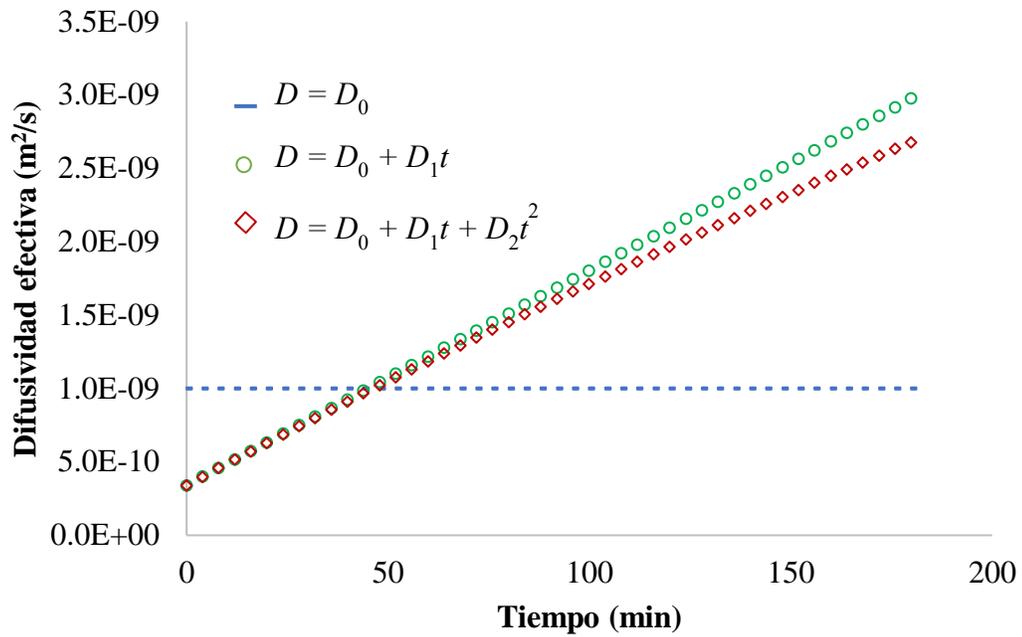
El comportamiento de la difusividad efectiva ( $D_e$ ) considerada variable y la cinética de secado experimental y estimada en el periodo de velocidad decreciente para trozos de nopal deshidratado en el tratamiento suave ( $T = 58.7$  °C y  $v = 0.6$  m/s), se aprecia en la **Figura 14**.



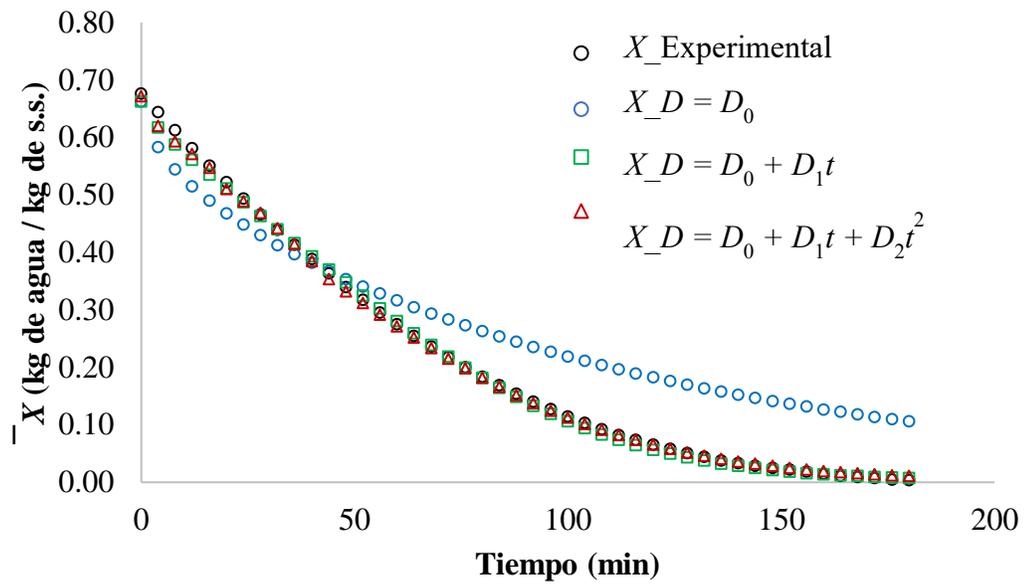
**Figura 14.** Difusividades efectivas estimadas (A) y cinéticas de secado experimental (B), predichas considerando una  $D_e$  variable en función del tiempo con un comportamiento constante ( $D = D_0$ ), lineal ( $D = D_0 + D_1t$ ) y cuadrático ( $D = D_0 + D_1t + D_2t^2$ ) para el secado convectivo en trozos de nopal en el tratamiento suave ( $T = 58.7$  °C y  $v = 0.6$  m/s).

La difusividad efectiva variable se calculó al considerar una función cuadrática del tiempo: a partir de la Ecuación (32) se realizó un análisis de regresión para obtener los resultados de difusividad efectiva inicial ( $D_0$ ), velocidad de cambio inicial ( $D_1$ ) y disminución de la velocidad de cambio ( $D_2$ ); en donde  $D_0 = 9.92 \times 10^{-11}$  m<sup>2</sup>/s,  $D_1 = 1.06 \times 10^{-13}$  m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup> y  $D_2 = -8.76 \times 10^{-19}$  m<sup>2</sup>/s<sup>3</sup>. En la **Figura 14A, 15A y 16A** se puede observar una difusividad efectiva promedio ( $D = D_0$ ), la cual se mantuvo constante durante todo el periodo de secado: En el tratamiento suave ( $T = 58.7$  °C y  $v = 0.6$  m/s), se obtuvo  $D_0$  de  $5.19 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s, tratamiento central ( $T = 67.5$  °C y  $v = 1.0$  m/s)  $D_0$  de  $1.00 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s y el tratamiento drástico ( $T = 76.3$  °C y  $v = 1.4$  m/s) fue de  $8.47 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s. Por otro lado, la difusividad efectiva lineal ( $D = D_0 + D_1t$ ) aumentó de manera proporcional con respecto al tiempo, con un rango de  $9.92 \times 10^{-11}$  a  $1.01 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s para el tratamiento suave (TS),  $3.42 \times 10^{-10}$  a  $1.66 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s en el tratamiento central (TC) y  $1.91 \times 10^{-10}$  a  $2.96 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s en el tratamiento drástico (TD). La difusividad efectiva como función cuadrática del tiempo ( $D = D_0 + D_1t + D_2t^2$ ) tuvo un comportamiento en forma de parábola, pero al no caer la curva, se consideró asintótica: El intervalo fue de  $9.92 \times 10^{-11}$  a  $9.24 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s en el TS;  $3.42 \times 10^{-10}$  a  $1.66 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s en el TC; y  $1.91 \times 10^{-10}$  a  $2.69 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s en el TD. Los resultados indican que existe una relación directa entre la temperatura y la difusividad efectiva variable, muestran que el aumento de la temperatura conduce al aumento de la  $D_e$  variable.

La  $D_e$  muestra qué tan rápido se transfiere la humedad en los productos alimenticios. Además, está fuertemente relacionada con las temperaturas del aire y de la muestra.

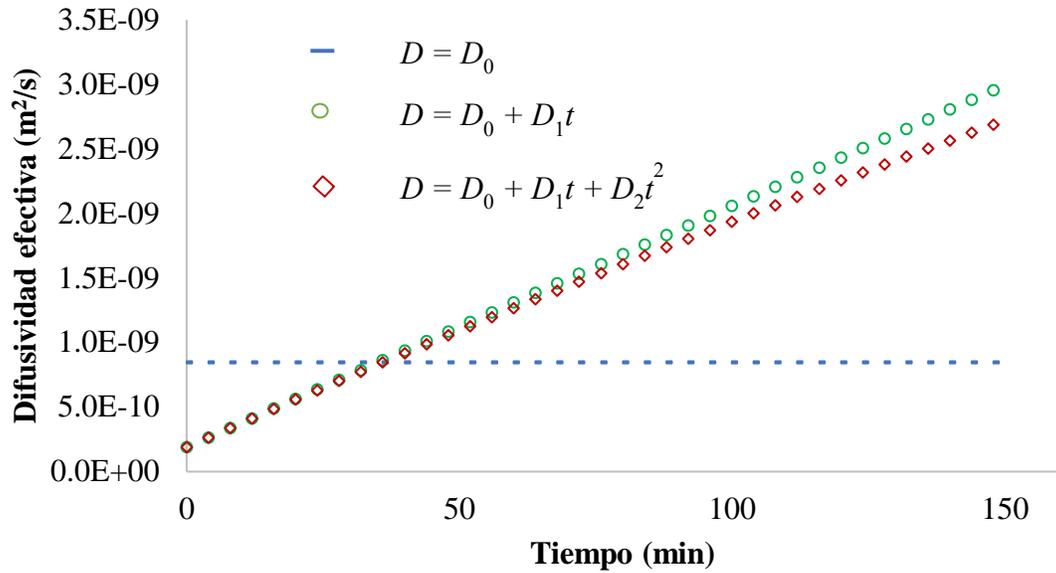


(A)

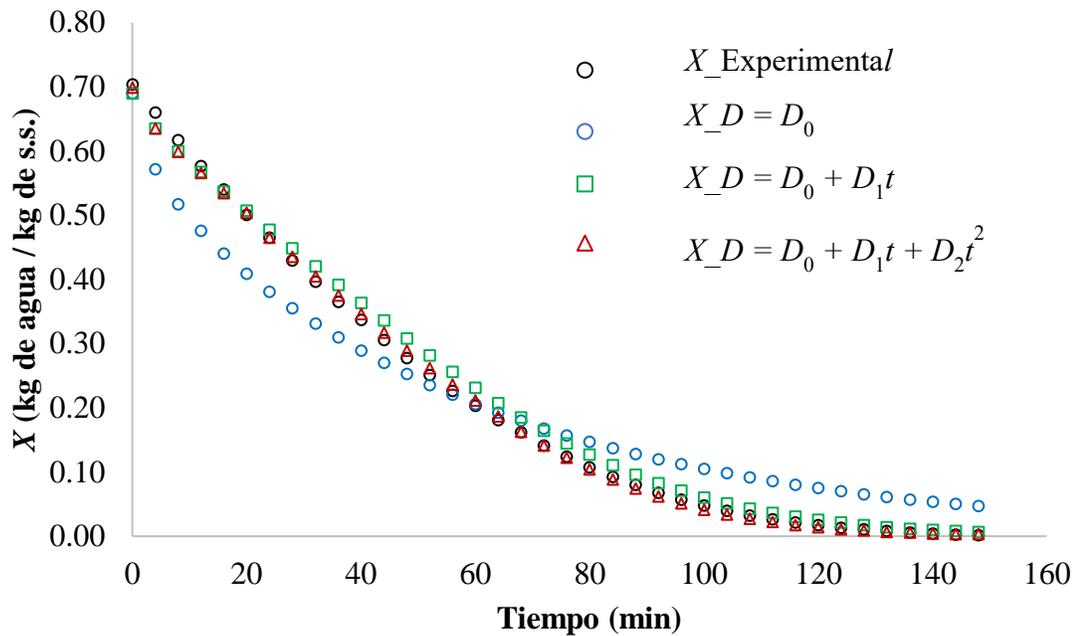


(B)

**Figura 15.** Difusividades efectivas estimadas (A) y cinéticas de secado experimental (B), predichas considerando una  $D_e$  variable en función del tiempo con un comportamiento constante ( $D = D_0$ ), lineal ( $D = D_0 + D_1t$ ) y cuadrático ( $D = D_0 + D_1t + D_2t^2$ ) para el secado convectivo en trozos de nopal en el tratamiento central ( $T = 67.5$  °C y  $v = 1.0$  m/s).



(A)



(B)

**Figura 16.** Difusividades efectivas estimadas (A) y cinética de secado experimental (B), predichas considerando una  $D_e$  variable en función del tiempo con un comportamiento constante ( $D = D_0$ ), lineal ( $D = D_0 + D_1 t$ ) y cuadrático ( $D = D_0 + D_1 t + D_2 t^2$ ) para el secado convectivo en trozos de nopal en el tratamiento drástico ( $T = 76.3 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $v = 1.4 \text{ m/s}$ ).

La difusividad efectiva aumenta con la temperatura del aire de secado, sin importar el espesor de la muestra y la velocidad del flujo de aire. A medida que aumenta la temperatura, crece el calor suministrado a los productos alimenticios y migra más rápido la humedad desde el interior hacia la superficie de la muestra. Inicialmente la  $D_e$  aumenta lento, y posteriormente acelera su difusión a un ritmo más rápido, pero al final del proceso de secado éste disminuye. Este comportamiento se puede deber a la porosidad y a la estructura compleja del alimento que genera que la difusión varíe con respecto al tiempo (Sáez-Ceniceros 2019).

En las **Figuras 14B, 15B y 16B** se observa el contenido de humedad promedio ( $\bar{X}$ ) de los resultados experimentales y cómo ajusta al  $\bar{X}$  al utilizar la  $D_e$  promedio, lineal y cuadrática con respecto al tiempo. La  $D_e$  promedio y la difusividad lineal presentaron un ajuste adecuado de  $R^2_{\text{promedio}} = 0.987$  y  $R^2_{\text{lineal}} = 0.997$ , respectivamente en el tratamiento suave, lo mismo ocurre con el tratamiento central ( $R^2_{\text{promedio}} = 0.988$  y  $R^2_{\text{lineal}} = 0.999$ ) y tratamiento drástico ( $R^2_{\text{promedio}} = 0.983$  y  $R^2_{\text{lineal}} = 0.996$ ). Sin embargo, el modelo que presentó mejor ajuste a los resultados experimentales fue la  $D_e$  como función cuadrática del tiempo con un coeficiente  $R^2 = 0.999$  en los tres tratamientos aplicados.

## **D CONDICIONES ÓPTIMAS EN EL PROCESO DE SECADO CONVECTIVO DE TROZOS DE NOPAL DESHIDRATADO.**

### **1 Optimización del secado convectivo (secado en túnel).**

La optimización del proceso de secado se realizó bajo las mejores condiciones, que permitan obtener la menor diferencia total de color ( $\Delta E$ ), mayor retención de firmeza (%  $RF$ ), mayor retención de ácido ascórbico (%  $RAA$ ) y menor actividad residual de peroxidasa (%  $POD$ ). Para la variable de  $\Delta E$  se asignó una importancia de tres (+ + +), mientras que para las demás fue de

cinco (+ + + +). La ponderación varió para cada variable de respuesta:  $\Delta E$  (0.25), %  $RF$  (0.1), %  $RAA$  (1.5) y %  $POD$  (1.0).

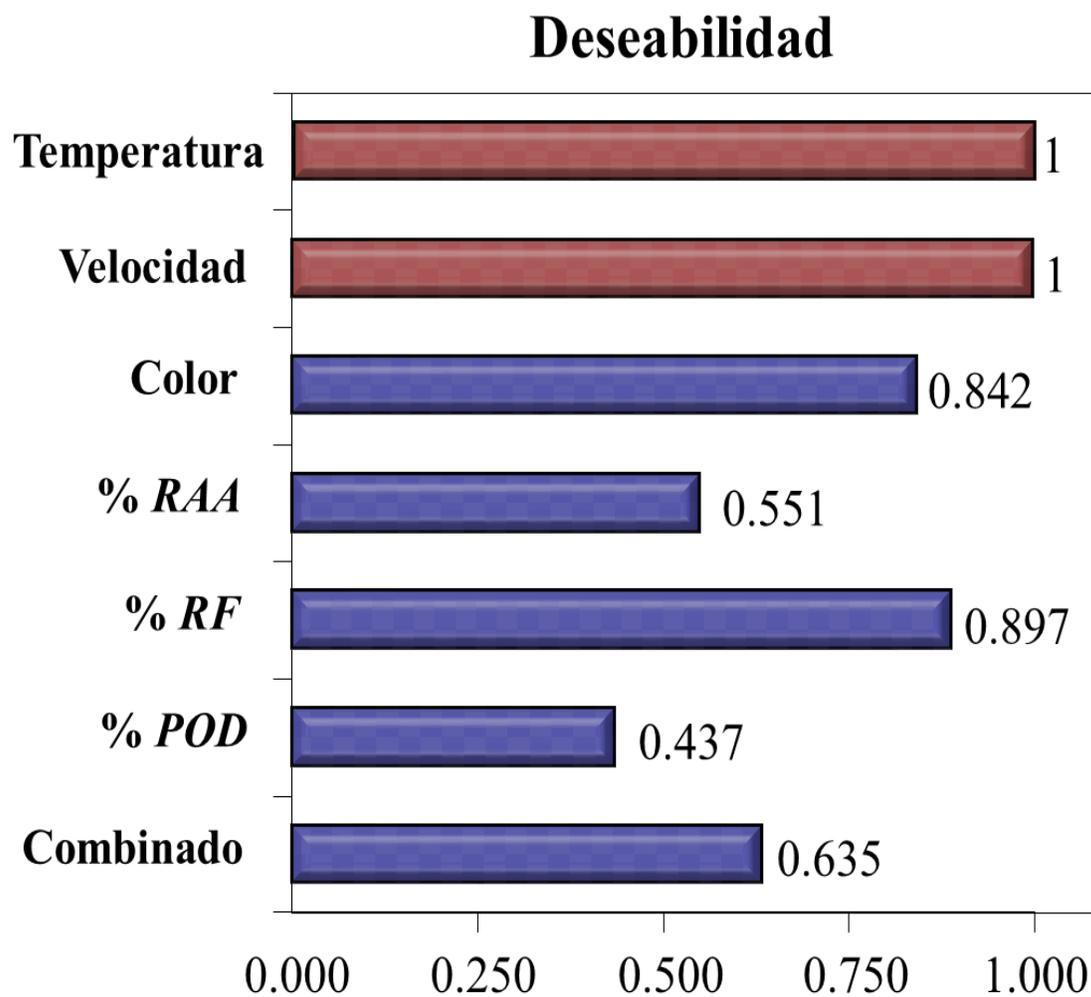
La ponderación permite incrementar o disminuir la importancia que tiene la variable de respuesta en la optimización, la ponderación mínima es de 0.1. El índice de deseabilidad (ID) es un enfoque de optimización multicriterio que se utiliza para mostrar cuan deseables son las distintas respuestas. El ID oscila entre 0 y 1, siendo 0 el menos deseable, mientras que 1 es el más deseable. Como se puede apreciar en la **Figura 17**, la deseabilidad global fue de 0.635, que corresponde a una temperatura de 69.1 °C y una velocidad de aire de 1.5 m/s. Por otro lado, las deseabilidades individuales para la diferencia total de color, retención de firmeza, retención de ácido ascórbico y actividad residual de peroxidasa fueron de 0.84, 0.90, 0.55 y 0.44, respectivamente. Lazié (2004) considera que una deseabilidad global mayor a 0.60 corresponde a un producto satisfactorio con la mejor calidad comercial.

## **2 Parámetros fisicoquímicos, nutrimental y enzimático**

Los resultados experimentales que se encuentran en el **Cuadro 5** representan la media de cinco réplicas realizadas para cada variable de respuesta. Las condiciones óptimas de secado se obtuvieron a partir del paquete estadístico *Design Expert* (2011).

Los rangos mínimo y máximo establecidos por el modelo matemático para  $\Delta E$ , %  $RF$ , %  $RAA$  y %  $POD$  fue de 13.1 a 13.9, 51.7 a 75.8 %, 63.4 a 83.7 % y 38.0 a 50.9 %, respectivamente. Estos resultados estimados están cerca a los resultados experimentales obtenidos, por lo que se considera un modelo adecuado y reproducible.

El modelo en condiciones de secado óptimo para trozos de nopal se puede emplear como información base para obtener un producto satisfactorio que cumpla con buenos parámetros de calidad.



**Figura 17.** Deseabilidad individual y global de las variables de respuesta en condiciones óptimas del proceso de secado convectivo de trozos de nopal deshidratado.

**Cuadro 5.** Condiciones óptimas de las variables de respuesta en trozos de nopal deshidratados en un secador convectivo.

Variable de respuesta	Resultados experimentales	Óptimo		
		Exacto	Mínimo	Máximo
Diferencia total de color ( $\Delta E$ )	$13.4 \pm 0.07$	13.4	13.1	13.9
Retención de Firmeza (% <i>RF</i> )	$57.4 \pm 3.97$	64.2	51.7	75.8
Retención de ácido ascórbico (% <i>RAA</i> )	$70.0 \pm 3.60$	74.0	63.4	83.7
Actividad residual de peroxidasa (% <i>POD</i> )	$44.4 \pm 0.50$	45.1	38.0	50.9

En el **Cuadro 6** se muestra el contraste del nopal fresco con respecto al deshidratado en condiciones óptimas ( $T = 69.1$  °C y  $v = 1.5$  m/s). Se encontró diferencia significativa para todas las variables al comparar las medias de cada una de ellas con la prueba de  $t$  de *Student*. Se obtuvo una diferencia total de color de 13.4, se logró retener el 46 % de la firmeza, el 70 % de ácido ascórbico y una inactivación del 58 % de la actividad de peroxidasa.

Estos resultados se consideran buenos, se sabía que el proceso generaría cambios en el color, la firmeza, el contenido de ácido ascórbico y la actividad de la peroxidasa. La diferencia total de color de esta magnitud es perceptible por el consumidor, pero no es muy elevada; el nopal deshidratado en condiciones óptimas presenta buena firmeza y contenido de vitamina C. Aunque la actividad residual de peroxidasa fue de 42 % esto representa una cantidad muy pequeña para la enzima, y esta al verse afectada, también el resto de las enzimas disminuyen su actividad.

**Cuadro 6.** Comparación de los resultados experimentales en nopal fresco y deshidratado en condiciones óptimas para el color, firmeza, ácido ascórbico y peroxidasa.

<b>Variable</b>	<b>Fresco</b>	<b>Óptimo</b>	<b>Comparación</b>
<b>Color</b>	$L^* = 53.5^a \pm 2.1$ $a^* = -27.86^a \pm 0.4$ $b^* = 41.72^a \pm 1.5$	$L^* = 58.0^b \pm 1.4$ $a^* = -19.9^b \pm 0.5$ $b^* = 33.45^b \pm 1.5$	$\Delta E = 13.4$
<b>Firmeza (N)</b>	$6.3^a \pm 0.2$	$2.9^b \pm 0.2$	46 % <i>RF</i>
<b>Ácido ascórbico (mg a. a./ 100 gr)</b>	$9.3^a \pm 0.2$	$6.5^b \pm 0.3$	70 % <i>RAA</i>
<b>Peroxidasa (U/mL)</b>	$0.0165^a \pm 0.0002$	$0.007^b \pm 0.0001$	42 % <i>POD</i>

## IX CONCLUSIONES

La caracterización fisicoquímica del nopal fresco resultó similar a lo reportado en la literatura.

El incremento de la temperatura y velocidad de aire disminuyeron los tiempos de secado en trozos de nopal bajo diferentes condiciones del proceso.

El contenido de humedad crítico y los parámetros ingenieriles correspondientes al periodo de velocidad constante (densidad de flujo de masa y coeficiente local de transferencia de masa) aumentaron al incrementar la temperatura y velocidad de aire, por lo que también aumentó la velocidad de secado.

Los modelos utilizados en el periodo de velocidad decreciente al considerar la difusividad efectiva constante no proporcionaron una predicción adecuada de la cinética de secado. La difusividad de la humedad durante el secado de nopal se comporta de manera variable y de acuerdo con los resultados experimentales, el modelo de predicción que mejor se ajustó fue cuando la difusividad efectiva de la humedad se considera como una función cuadrática del tiempo.

Las condiciones óptimas para obtener trozos de nopal deshidratados con buenos parámetros de calidad por secado convectivo fueron: 69.1 °C y 1.5 m/s, con una deseabilidad global de 0.635. Las variables de respuesta obtenidas en forma experimental bajo condiciones óptimas para el secado convectivo en trozos de nopal estuvieron dentro del rango predicho por los modelos de la diferencia total de color, retención de firmeza, retención de ácido ascórbico y actividad residual de peroxidasa, por lo tanto, fueron adecuados y reproducibles.

Los parámetros fisicoquímicos, nutrimental y enzimático en trozos de nopal bajo condiciones óptimas con respecto al fresco, presentaron una coloración aceptable, buena

retención de firmeza y ácido ascórbico y la actividad residual de la peroxidasa se redujo más de la mitad.

La solución analítica obtenida para el contenido de humedad promedio considerando la función cuadrática del tiempo estimó de manera satisfactoria la difusividad del alimento durante el secado convectivo. Esto conseguiría mejorar el proceso de secado para alimentos con buenos parámetros de calidad que otorguen productos aceptables para los consumidores.

## X BIBLIOGRAFÍA

- Adekunte A, Tiwari B, Cullen P, Scannel, A, O'Donnell C. 2010. Effect of sonication on colour, ascorbic acid and yeast inactivation in tomato juice. *Food Chemistry*. 122: 500-507.
- Aguilar D, Gutiérrez N, Navarro A. 2005. Inhibición del pardeamiento enzimático en nopales frescos desespinaados. Mérida, Yucatán: XI Congreso Nacional de Biotecnología y Bioingeniería.
- Allier-González AL. 2012. Análisis de los periodos y mecanismos de transporte durante el secado de papa por convección de aire forzado [Tesis de maestría]. Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca: Instituto Politécnico Nacional. 109 p.
- AOAC. 2012. Official Methods of Analysis, Association of Official Analytical Chemists, Washington, DC: AOAC INTERNATIONAL.
- Arroyo-Uriarte P, Mazquiaran-Bergera L, Rodríguez-Alonso P, Valero-Gaspar T, Ruiz-Moreno E, Ávila-Torres JM y Varela-Moreiras G. 2018. Informe de estado de situaciones sobre “frutas y hortalizas: Nutrición y salud en la España del s. XXI”. España: Fundación Española de la Nutrición (FEN). 183 p.
- Ayadi MA, Abdelmaksoud W, Ennouri M, Attia H. 2009. Cladodes from *Opuntia ficus indica* as a source of dietary fiber: Effect on dough characteristics and cake making. *Industrial Crops and Products*. 30:40–47 p.
- Badui S. 2006. Química de los alimentos. 4ª ed. México: Pearson Educación. 716 p.
- Barrera GN, Bassi E, Reyes Martínez RJ, León AE, Ribotta PD. 2012. Efectos de diferentes fracciones de harinas de trigo pan obtenidas con molino industrial sobre la calidad de galletitas dulces. *Agriscientia*. 2:69-79.
- Barroca MJ, Guiné RPF, Amado AM, Ressurreicao S, Moreira da Silva A, Marques MPM, Batista de Carvalho LAE. 2020. The drying process of *Sarcocornia perennis*: impact on

- nutritional and physico-chemical properties. *Journal Food Science Technology*. 57(12):4443–4458.
- Battle TA, Zaniolo SM, Leporati JL, Balmaceda ML, Bomben RM, Malka MT. 2016. Influencia de las variables de secado en la calidad organoléptica de bocaditos salados a base de amaranto. *Avances en Ciencias e Ingeniería*. 7(4):47-56.
- Bezerra CV, Meller Da Silva LH, Corrêa DF, Rodríguez AMC. 2015. A modeling study for moisture diffusivities and moisture transfer coefficients in drying of passion fruit peel. *Int. Journal Heat Mass Transference*. 85:750–755.
- Caro-Corrales JJ, Zazueta-Niebla JA, Ordorica-Falomir CA, Zazueta-Morales JJ. 2005. Controlled low-temperature vacuum dehydration and tunnel drying: a comparative study. *International Journal of Food Properties*. 8:259-542.
- Carrillo-Inungaray ML, Reyes-Munguía A. 2013. Vida útil de los alimentos. *Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias*. 2(3):32-56.
- Castañeda J, Arteaga H, Siche R y Rodríguez G. 2010. Estudio comparativo de la pérdida de vitamina C en chalarina por cuatro métodos de deshidratación. *Scientia Agropecuaria*. 1:75-80.
- Chartier N, Morales R, Raddats J, Smith MJ. 2016. Determinación de vitamina C en nopal y sus beneficios. Colombia: Universidad de los Andes.
- Chocano-Peralta NR. 2019. Propiedades físicas y mecánicas de una biopelícula formulada con almidón de papa (*Solanum tuberosum*) y mucilago de nopal (*Opuntia ficus*) [Tesis de Licenciatura]. Apurímac, Perú: Universidad Nacional José María Arguedas. 80 p.
- Chukwudi I, Onyetugo C, Amarachi I. 2021. Peroxidase, and example of enzymes with numerous applications. *Asian Journal of Chemical Sciences*. 10(2):11–22.
- Crank J. 1975. *The mathematics of diffusion*. 2a ed. Oxford: Oxford University Press. 414 p.

- Contreras, C. 2006. Influencia del método de secado en parámetros de calidad relacionados con la estructura y el color de manzana y fresa deshidratadas [Tesis de doctorado]. Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia. 215 p.
- Contreras-Padilla M, Gutiérrez-Cortez E, Valderrama-Bravo M, Rojas-Molina I, Espinosa-Arbeláez D, Suárez-Vargas R, Rodríguez-García M. 2011. Effects of Drying process on the physicochemical properties of nopal cladodes at different maturity stages. *Plant Foods Human Nutrition*. 67:44–49.
- Corréa PC, Horta de Oliveira GH, Machado-Baptistini F, Silva-Diniz MDM, Almeida da Paixão A. 2012. Tomato infrared drying: Modeling and some coefficients of the dehydration process. *Chilean Journal of Agricultural Research*. 72(2):262–267.
- Cubillas JE, Japitana M. 2016. Ortho image classification of benthic habitats in hinatuan, surgiao del sur, Philippines using cielab, color constancy and intensity as features. Butuan, Philippines: Caraga State University.
- De Michelis A, Ohaco E. 2015. Deshidratación y desecado de frutas, hortalizas y hongos: Procedimientos hogareños y comerciales de pequeña escala. México: INTA. 73 p.
- Díaz-Ayala F, Álvarez-García G, Simá-Moo E. 2015. Cinética de secado de tiras de cladodios de nopal (*Opuntia ficus-indica*) en un secador convectivo de flujo transversal. *Agrociencia*. 49:845-857.
- Diego-Zarate LM, Méndez-Zamora G, Rivera-De Alba JA, Flores-Girón E. 2021. Efecto del nopal (*Opuntia* spp) deshidratado en polvo sobre las propiedades fisicoquímicas y sensoriales de salchichas Viena. *Revista de Ciencias Biológicas y de la Salud XXIII*. (2):89-95.

- Elsayed AM, Hegazy UM, Hegazy MG, Abdel-Ghany SS, Salama WH, Salem AM, Fahmy AS. 2018. Purification and biochemical characterization of peroxidase isoenzymes from *Ficus carica* latex. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. 16:1-9.
- Falco M, Núñez I, Tanzi F, Muñoz LP. 2018. Abordando el análisis de usabilidad de tanziflex, una herramienta web para investigación operativa. *Revista Ibérica de sistemas y tecnologías de información*. 30:91-106.
- Fain O. 2004. Carences en vitamine C. *La Revue de Médecine Interne* 25(12):872-880. doi:10.1016/j.revmed.2004.03.009
- [FAO] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. 2021. Cultivos tradicionales; Nopal. Roma, Italia. FAO. Disponible de: <http://www.fao.org/traditional-crops/cactuspear/es/>. Consultado el 21 de marzo de 2021.
- [FAO e ICARDA] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura y Centro Internacional de Investigaciones Agrícolas en Zonas Áridas. 2018. Ecología del cultivo, manejo y usos del nopal. Disponible de <http://www.fao.org/3/i7628es/I7628ES.pdf>. Consultado el 21 de marzo de 2021.
- Finck-Pastrana AG. 2014. Nopal (*Opuntia lasiacantha*) drying using an indirect solar dryer. *Energy Procedia*. 57:2984–2993. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.334>.
- Fito P, Andrés A, Barát J, Abors A. 2001. Introducción al secado de alimentos por aire caliente. Editorial Universidad Politécnica de Valencia.
- [FND] Financiera Nacional de Desarrollo Agropecuario, Rural, Forestal y Pesquero. 2020. El nopal, un alimento muy mexicano. México. Disponible de: <https://www.gob.mx/fnd/articulos/el-nopal-un-alimento-muy-mexicano?idiom=es>. Consultado el 11 de marzo de 2021.

- Galicia-Villanueva S, Escamilla-García P, Alvarado-Raya H, Aquino-González L, Serna-Álvarez H, Hernández-Cruz L. 2017. Plantación experimental de nopal para evaluación de sistemas de fertilización y extracción de mucílago. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 8(5):1087–1099.
- García A, Reyes LA, Mosqueda S, Mendoza JM, Ramírez JR, González SD. 2016. Estudio nutricional del nopal (*Opuntia ficus-indica* L. Miller) en sus diferentes tipos de cocción. México: Universidad Nacional Autónoma de México. Disponible de: [https://www.researchgate.net/publication/313248137\\_Estudio\\_nutricional\\_del\\_nopal\\_Opuntia\\_ficus-indica\\_L\\_Miller\\_en\\_sus\\_diferentes\\_tipos\\_de\\_coccion](https://www.researchgate.net/publication/313248137_Estudio_nutricional_del_nopal_Opuntia_ficus-indica_L_Miller_en_sus_diferentes_tipos_de_coccion). Consultado el 21 de marzo de 2021.
- García-Favela B. 2013. Mucílago de nopal (*Opuntia* spp.) sobre propiedades micromorfológicas y estructurales del suelo en trigo [Tesis de doctorado]. Montecillo, Texcoco, México: Colegio de postgraduados. 143 p.
- García-Pérez JV. 2007. Contribución al estudio de la aplicación de ultrasonidos de potencia en el secado convectivo de alimentos [Tesis de doctorado]. Valencia, España: Universidad Politécnica de valencia. 316 p.
- García-Osuna, H. 2013. Identificación de pectinas y mucílago de cuatro variedades de nopal (*Opuntia ficus-indica* L.) Miller y validación de su actividad hipoglucémica [Tesis de Doctorado] San Nicolás de los Garza, Nuevo León: UANL. 159 p.
- Geankoplis CJ. 2016. Procesos de transporte y principios de procesos de separación. 4<sup>a</sup> ed. México: PATRIA. 589-591 p.
- Gómez-Gómez MS. 2009. Deshidratado de tomate saladette en un secador de charolas giratorias [Tesis de licenciatura]. Huajuapán de León, Oaxaca: Universidad Tecnológica de la Mixteca. 76 p.

- González-Hernández A. 2022. Manejo alternativo de plagas y enfermedades del nopal verdura (*Opuntia ficus-indica*) en Tlalnepantla, Morelos [Tesis de doctorado]. Tlalnepantla, Morelos: Universidad Autónoma del Estado de Morelos. 160 p.
- González M. 2020. Simulación de la Transferencia de Calor durante el Escaldado de Pimiento Rojo (*Capsicum annuum* L.) [Tesis de maestría]. Culiacán, Sinaloa: Universidad Autónoma de Sinaloa. 124 p.
- González-Rodríguez F, Chavez-Polanco DA, González-de la Torre S, González-Govea M, Suárez-Medina EA, Soltero-Sánchez JR, Castañeda-Aguirre E, Trejo-Perea NA, Luna-Díaz JJ. 2020. Determinación del valor bromatológico y contenido de mucílago en el nopal (*Opuntia* spp.) de cerro y de invernadero, del estado de Michoacán. Investigación y Desarrollo en Ciencias y Tecnología de Alimentos. 5:184-188.
- Guardiola de León AJ. 2018. Extracción y caracterización de mucílago del nopal (*Opuntia ficus indicata* (L.) Miller) de cinco cultivares, en tres estados de maduración [Tesis de maestría]. Nuevo León, México: Universidad Autónoma de Nuevo León. 57 p.
- Gutiérrez T, Hoyos O, Páez M. 2007. Determinación del contenido de ácido ascórbico en uchuva (*Physalis peruviana* L.), por cromatografía líquida de alta resolución (clar). Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial: BSAA. 5:70-79.
- Hamedi S, Afsahi MM, Riahi-Madvar A, Mohebbi A. 2021. Modeling and optimization of radish root extract drying as peroxidase source using spouted bed dryer. Scientific reports. 11: 14362.
- Han J, Kim J. 2018. Process simulation and optimization of 10-MW EFB power plant. Computer Aided Chemical Engineering. 43:723–729.

- Haile M. 2013. Microwave-vacuum drying effect on drying kinetics, lycopene, and ascorbic acid content of tomato slices. *Journal of Stored Products and Postharvest Research*. 4:11-22.
- Hernández WN, Hernández FJ, Vargas Z, Rodríguez G, García MA. 2013. Coffee grain rotary drying optimization. *Revista mexicana de ingeniería química*. 12(2), 315-325. Disponible de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S16652738201300020011&lng=es&tlng=en](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S16652738201300020011&lng=es&tlng=en). Consultado el 20 de marzo de 2021.
- Hernández-Rodríguez J, Quinto-Diez P. 2004. Secado de medios porosos: una revisión a las teorías actualmente en uso. *Científica*. 9(2):63-71.
- Huerta-Hernández J. 2018. Desarrollo de geles mucílago de nopal-Alginato de sodio conteniendo aceite de ajonjolí mediante gelación iónica [Tesis de licenciatura]. Toluca, México: Universidad Autónoma del Estado de México. 75 p.
- Huerta-Medina H, Castillo-Téllez B, Marzoug R, Castillo-Téllez M. 2020. Solar drying of nopal (*Opuntia Ficus-indica*) using direct technologies. *Advances in solar thermal food processing: Third International conference CONSOLFOOD 2020*. Universidad de Guadalajara.
- [IMSS] Instituto Mexicano del Seguro Social. 2018. Nopal, auxiliar en el control de la diabetes y la hiperglucemia: IMSS. México: IMSS. Disponible de: <http://www.imss.gob.mx/prensa/archivo/201810/265>. Consultado el 21 de marzo de 2021.
- [INEGI] Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 2013. Características principales del cultivo de nopal en el Distrito Federal. Caso Milpa Alta. Censo Agropecuario 2007. México: INEGI.
- Inocente-Quiroz FE. 2020. Alimentos mínimamente procesados: pasado, presente y futuro [Tesis de licenciatura]. Lima, Perú: Universidad Peruana Unión. S/N.

- Iribe-Salazar R, Caro-Corrales J, Hernández-Calderón O, Zazueta-Niebla J, Gutiérrez-Dorado R, Carrasco-Escalante M, Vázquez-López Y. 2015. Heat transfer during blanching and hydrocooling of broccoli florets. *Journal of Food Science*. 80(12):E2774-E2781.
- Iribe-Salazar R, Gutiérrez-Dorado R, Ríos-Iribe É, Carrasco-Escalante M, Vázquez-López Y, Hernández-Calderón O, Caro-Corrales J. 2018. Modeling of effective moisture diffusivity in corn tortilla baking. *Journal of Food Science*. 0:1-9.
- Jiménez-Sánchez H. 2018. Cinética de inactivación enzimática y degradación de color de alimentos [Tesis de licenciatura]. Iquito, Perú: Universidad Nacional de la Amazonía Peruana. 62 p.
- Kaur T, Olvera-Cervantes J, Corona-Chávez A, Rojas-Laguna R, Sosa-Morales M. 2017. Dielectric properties of guava, mamey sapote, prickly pears, and Nopal in the microwave range. *International Journal of food Properties*. 12:2944–2953.
- Kohaich K, Baaziz M. 2015. New investigations on the guaiacol peroxidase of *Opuntia ficus indica* L. and its modulation by ascorbic acid and copper. Towards and optimization of quantitative and qualitative test. *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic*. 119:26-32.
- Lazié ZR. 2004. Design of Experiments in Chemical Engineering. WILEY-VCH. Germany.
- Legrine K, Benaouana D, Abdessemed D. 2020. Physicochemical characterization and sensory analysis of jams produced from *Opuntia ficus-indica* cladodes. *Asian Journal of Pharmaceutical and Clinical Research*. 13:69–72.
- León-Martínez FM, Méndez-Laguna LL, Rodríguez-Ramírez J. 2010. Spray drying of nopal mucilage (*Opuntia ficus-indica*): Effects on powder properties and characterization. *Carbohydrate Polymers*. 81:864-870.

- López R, de Ita A, Vaca M. 2009. Drying of prickly pear cactus cladodes (*Opuntia ficus indica*) in a forced convection tunnel. *Energy Conversion and Management*. 50:2119-2126.
- Maki-Díaz G, Peña-Valdivia C, García-Nava R, Arévalo-Galarza M, Calderón-Zavala G, Anaya-Rosales S. 2015. Características físicas y químicas de nopal verdura (*Opuntia ficus-indica*) para exportación y consumo nacional. *Agrociencia*. 49:31-51.
- Marín E, Lemus R, Flores V, Vega G. 2006. La rehidratación de alimentos deshidratados. *Revista Chilena de Nutrición*. 33:527-538.
- Martínez G, Celis F, Hernández T, Paredes O. 2015. Effect of drying methods on the nutraceutical potential of cactus cladodes (*Opuntia spp.*). *International Journal Food Nutrition Science*. 2(6):1- 6.
- Martínez-Soto G, Flores-Ortega A, Mercado-Flores J, López-Orozco M. 2010. Características de secado de nopal (*Opuntia ficus-indica*) por lecho fluidizado. *Acta Universitaria*. 20:70-76. Disponible de <http://www.actauniversitaria.ugto.mx/index.php/acta/article/view/61>. Publicado el 1 de diciembre de 2010.
- Mascarello G, Pinto A, Parise N, Crovato S, Ravarotto L. 2015. The perception of food quality. Profiling Italian consumers, *Appetite*. 89:175-182.
- Mathias-Rettig K, Ah-Hen K. 2014. El color en los alimentos un criterio de calidad medible. *Agrosur*. 42(2):57-66.
- Medina-Torres L, Gallegos-Infante JA, González-Laredo RF, Rocha-Guzmán NE. 2007. Drying kinetics of nopal using three different methods and their effect on their mechanical properties. *Food Science and Technology*. 41:1183-1188.
- Mendoza R, Herrera AO. 2012. Cinética de Inactivación de la Enzima Peroxidasa, Color y Textura en Papa Criolla (*Solanum tuberosum* Grupo phureja) sometida a tres

- Condiciones de Escaldado. Información tecnológica. 23(4):73-82. Disponible de <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642012000400009>.
- Milán CJ, Gutiérrez DR, Perales SJ, Cuevas RE, Ramírez WB, Reyes MC. 2006. The optimization of the extrusion process when using maize flour with a modified amino acid profile for making tortillas. *International Journal of Food Science & Technology* 41(7):727-736.
- Milán CJ, Reyes MC, Camacho HI, Rouzaud SO. 2002. Optimization of extrusion process to transform hardened chickpeas (*Cicer arietinum* L.) into a useful product. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 82(14):1718-1728.
- Montgomery DC. 2003. *Design and analysis of experiments*, 8ed. EUA: John Wiley & Sons, Inc. 724 p.
- Mora-Herrera ME, Peralta-Velázquez JP, López-Delgado HA, García-Velasco R, González-Díaz JG. 2011. Efecto del ácido ascórbico sobre crecimiento, pigmentos fotosintéticos y actividad peroxidasa en plantas de crisantemo. *Revista Chapingo Serie Horticultura*. 13(2):73-81.
- Moreno-Guarín D, Sierra-Hoyos H, Díaz-Moreno C. 2012. Color y textura, características asociadas a la calidad de tomate deshidratado. *Vitae*. 19(1):201-203.
- Mugi VR, Chandramohan VP. 2021. Shrinkage, effective diffusion coefficient, surface transfer coefficients and their factors during solar drying of food products – A review. *Solar Energy*. 229:84–101.
- Nazareno MA, Padrón-Pereira CA. 2011. Nuevas tecnologías desarrolladas para el aprovechamiento de las cactáceas en la elaboración de alimentos. *Componentes*

- funcionales y propiedades antioxidantes. *Revista Venezolana de Ciencia y Tecnología de Alimentos*. 2(1):202-238.
- Ortíz-Rodríguez L. 2010. Efecto de la deshidratación osmótica sobre las propiedades fisicoquímicas, mecánicas y sensoriales del nopal (*Opuntia spp*) liofilizado [Tesis de maestría]. Xalapa, Veracruz: Universidad Veracruzana. 68 p.
- Osorio-Córdoba J, Pelayo-Zaldívar C, Verde-Calvo JR, Ponce-Valadez M, Díaz de León-Sánchez F, Bosquez-Molina E, Rodríguez-Huezo ME. 2011. Conservación de nopal verdura “Milpa Alta” (*Opuntia ficus indica* Mill.) desespinado en envases con atmósfera modificada. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. 10:93-104.
- Oyola-García AE. 2021. La variable. *Revista del Cuerpo Médico Hospital Nacional Almanzor Aguinaga Asenjo*, 14(1), 90-93. <https://dx.doi.org/10.35434/rcmhnaaa.2021.141.905>.
- Pérez-Servín I. 2021. Caracterización de los principales componentes del nopal forrajero (*Opuntia ficus-indica*) deshidratado [Tesis de maestría]. Morelia, Michoacán: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. 108 p.
- Puma-Isuiza GG, Núñez-Saavedra C. 2018. Determinación del perfil de textura sensorial de dos muestras experimentales de hot-dog de pollo (*Gallus gallus*) obtenidas por ingeniería *kansei* tipo II. *Anales Científicos*. 79(1):210–217.
- Quintero-Ruiz NA. 2015. Efecto del secado y el almacenamiento en la calidad de geles pécticos deshidratados de rosa mosqueta (*Rosa rubiginosa* L) [Tesis de doctorado]. Buenos aires, Argentina: Universidad Nacional de la Plata. 159 p.
- Ramallo LA, Mascheroni RH. 2012. Quality evaluation of pineapple fruit during drying process. *Food and Bioproducts processing*. 90:275-283.

- Rivera-Correa KA. 2016. Compuestos de interés nutrimental y funcional en nopal verdura debido a la fertilización [Tesis de maestría]. Estado de México, México: Colegio de Postgraduados. 87 p.
- Rastogi NK, Raghavarao KS. 2004. Mass transfer during osmotic dehydration of pineapple: Considering Fickian diffusion in cubical configuration. *Food Science Technology*. 37:43-47.
- Reyes-Buendía C, Corrales-García JJE, Peña-Valdivia CB, Hernández-Montes A, Ybarra-Moncada MC. 2020. Sopa de elote (*Zea mays*) tipo crema con mucílago de nopal (*Opuntia* spp.) como espesante, sus características físicas y aceptación sensorial. *Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*. (23):1-14.
- Rodríguez A, Sancho AM, Barrio Y, Rosito P, Gozzi MS. 2019. Combined drying of Nopal pads (*Opuntia ficus-indica*): Optimization of osmotic dehydration as a pretreatment before hot air drying. *Journal Food Process Preserv*. 43:e14183. Disponible de: <https://doi.org/10.1111/jfpp.14183>. Consultado el 17 de marzo de 2021.
- Rodríguez-Félix A, Fortiz-Hernández J. 2016. Calidad de nopal fresco cortado envasado con películas plásticas durante el almacenamiento a baja temperatura. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 7(4):793-807 p.
- Rodríguez-Henao YC. 2017. Evaluación del mucílago de nopal (*Opuntia ficus-indica*) como agente estabilizante en néctar de maracuyá (*Passiflora edulis*). Bogotá, Colombia: Universidad de la Salle. 84 p.
- Rojas RT, Duran DO. 2011. Efecto del secado por microondas sobre el color de la papa criolla (*Solanum phureja*). *Ciencia y tecnología alimentaria*. 9(2):104-114.

- [SADER] Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. 2020. Crece en México el consumo y producción de nopal: Agricultura, México. Disponible en [www.gob.mx](http://www.gob.mx). Consultado en abril de 2021.
- Sadilek, T. 2019. Perception of food quality by consumers: literature review. *European Research Studies Journal*. 22(1):57-67
- Sáenz C. 2006. Utilización agroindustrial del nopal. Boletín de Servicios Agrícolas de la FAO 162. Roma: FAO.
- Sáez-Ceniceros CB. 2019. Modelado de la difusividad efectiva y optimización de la deshidratación convectiva en rodajas de pera (*Pyrus communis* L.) cv. D'Anjou [Tesis maestría]. Culiacán, Sinaloa: Universidad Autónoma de Sinaloa. 84 p.
- San Miguel G, Fernández-Olmedilla D, Sánchez-Godoy F. 2022. Drying of prickly pear (*Opuntia ficus-indica* (L.) Miller) and its potential as a solid biofuel. *Agronomy*. 12(9):2231.
- Santacruz-Vázquez V, Santacruz-Vázquez C, Welti-Chanes J, Farrera-Rebollo RR, Alamilla-Beltrán L, Chanona-Pérez J, Gutiérrez-López GF. 2008. Effects of air-drying on the shrinkage, Surface temperatures and structural features of apples slabs by means of fractal analysis. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. 7(1):55–63.
- [SEMARNAP] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2017. Nopal, planta que documenta la historia de México. Disponible de: <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/nopales-previo?idiom=es>. Consultado el 21 de marzo de 2021.
- Serra HM, Cafaro TA. 2007. Ácido ascórbico: desde la química hasta su crucial función protectora en ojo. *Acta Bioquímica Clínica*. 41(4):525-532.

- [SIAP] El Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. 2016. Boletín de exportaciones: Nopalitos. México. Disponible de: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/222630/Boletin\\_de\\_exportaciones\\_nopalitos\\_2017\\_05.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/222630/Boletin_de_exportaciones_nopalitos_2017_05.pdf). Consultado el 21 de marzo de 2021.
- Tapia-Pazmiño AI. 2020. Mejorar la experiencia del consumidor en la empresa: Ecuaimpex de la línea de frutas deshidratadas [Tesis de maestría]. Quito, Ecuador: Universidad San Francisco de Quito. 60 p.
- Torres J, Hernández O, Arce G, Vizuet J. 2016. Secado de nopal (*Opuntia ficus*) utilizando secador solar con sistema de reflectores. *Revista de Energía Química y Física*. 3:39-4.
- Torres-Ponce RL, Morales-Corral D, Ballinas-Casarrubias ML, Nevárez-Moorillón GV. 2015. El nopal: planta de semidesierto con aplicaciones en farmacia, alimentos y nutrición animal. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 6:1129-1142.
- Treybal RE. 1991. Operaciones de transferencia de masa. 2ª ed. Ciudad de México: McGraw-Hill. 420 p.
- [USDA] U.S. Department of Agriculture. 2018. Biotechnology: USDA Role. Washington, D.C.: U.S. Dept. of Agriculture. Disponible de: [www.usda.gov](http://www.usda.gov). Consultado el 20 de marzo de 2021.
- Varga-Rodríguez L, Arroyo-Figueroa G, Herrera Méndez CH, Pérez-Nieto A, García-Vieyra MI, Rodríguez Núñez JR. 2016. Propiedades físicas del mucílago de nopal. *Acta Universitaria*. 26(1):8-11.
- Vázquez-López YV. 2014. Deshidratación de chile (*Capsicum annuum* L.) poblano entero por secado convectivo, microondas y combinado convectivo-microondas. [Tesis de maestría]. Culiacán, Sinaloa: Universidad Autónoma de Sinaloa. 147 p.

- Villa-Uvidia DN, Osorio-Rivera MA, Villacis-Venegas NY. 2020. Extracción, propiedades y beneficios de los mucílagos. *Revista Científica Dominio de la Ciencia*. 6(2):503-524
- Yaguas OJ. 2017. Metodología de superficie de respuesta para la optimización de una producción agrícola. *Revista Ingeniería Industrial*. 16:205-222.
- Yanchaguano HI, Garzón JG, Domínguez V, Alta A. 2020. Elaboración de una bebida nutritiva a base de pulpa de *opuntia ficus indica* (nopal) enriquecida y saborizada con jugo de *pasiflora edulis*, (Maracuyá). *Ciencia digital*. 4:6-17. Disponible de [cienciadigital.org](http://cienciadigital.org). Publicado en noviembre de 2020.
- Zavala-Mendoza E. 2012. Optimización del proceso de extracción del mucílago de cinco especies de *Opuntia* (L.) Miller de Michoacán [Tesis Maestría]. Michoacán, México: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. 96 p.

## ABREVIATURAS

A	Absorbancia
AT	Acidez titulable
$a_w$	Actividad de agua
A	Alícuota de la muestra
AOAC	Association of Official Analytical Chemists
$a^*$	Coloración rojo-verde
b. h.	Base húmeda
$b^*$	Coloración amarillo-azul
C.V.	Coefficiente de variación
DCPI	2,6-Diclorofenolindofenol
Da	Dalton
$dT$	Diferencial de la temperatura
DO	Deshidratación Osmótica
$D_e$	Difusividad efectiva
EUA	Estados Unidos de América
$F$	Firmeza en nopal deshidratado
$F_0$	Firmeza en nopal fresco
$F_{on}$	Nuevo número de Fourier
$F_o$	Número de Fourier
ha	Hectárea
ID	Índice de deseabilidad
IDR	Ingesta Diaria Recomendada

$\ln$	Logaritmo natural
$L^*$	Luminosidad
MSR	Metodología de superficie de respuesta
N	Newton
$N$	Normalidad de NaOH
O.	<i>Opuntia</i>
PVC	Período de velocidad constante
PVD	Período de velocidad decreciente
PVP	Polivinilpirrolidona
$P_{fdA}$	Prueba de falta de ajuste
$R^2$	Coefficiente de determinación
SST	Sólidos solubles totales
$T$	Temperatura ( $^{\circ}$ C)
$t$	Tiempo (min)
t	Toneladas
USDA	United States Department of Agriculture
$V$	Volumen (mL)
$V_G$	Volumen de NaOH gastado (mL)
$X$	Contenido de humedad
$X_{eq}$	Contenido de humedad en equilibrio
$X_i$	Contenido de humedad inicial
$Y$	Humedad del aire
$Y_s$	Humedad saturada del aire

$\Delta E$	Diferencia total de color
% <i>POD</i>	Porcentaje de actividad residual de peroxidasa
% <i>RAA</i>	Porcentaje de retención de ácido ascórbico
% <i>RF</i>	Porcentaje de retención de firmeza