



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MEXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TLAJOMULCO JALISCO

**“Comparación y caracterización fisicoquímica y química de los
polvos de nopal (*Opuntia ficus indica* y *Opuntia robusta*)
deshidratados por procesos convectivos”**

Tesis

PRESENTA

ING. JOSE ARMANDO LOPEZ CEBALLOS

DIRECTOR

DR. ISAAC ANDRADE GONZÁLEZ

CO-DIRECTOR

DR. GONZALO SORIA MELGAREJO

**COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS EN AGROBIOTECNOLOGIA**

Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco

Junio, 2026

**“Comparación y caracterización fisicoquímica y química de los
polvos de nopal (*Opuntia ficus indica* y *Opuntia robusta*)
deshidratados por procesos convectivos”**

Elaborado por:

Ing. Jose Armando Lopez Ceballos

Aprobada por el director: Dr. Isaac Andrade González

Aprobada por el co-director: Dr. Gonzalo Soria Melgarejo

Revisada por: Dra. Vania Sbeyde Farías Cervantes

Revisada por: Dr. Arturo Moisés Chávez Rodríguez



Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Instituto Tecnológico de Tlajomulco
Subdirección Académica
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Tlajomulco de Zúñiga, Jal. **27/mayo/2026**
No. DE OFICIO: DEPI/085/2026

Asunto: Autorización de impresión de tesis.

JOSÉ ARMANDO LÓPEZ CEBALLOS (M23940439)
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRÍA
EN CIENCIAS EN AGROBIOTECNOLOGÍA
PRESENTE

Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado "**Comparación y caracterización fisicoquímica del polvo de nopal (*Opuntia ficus indica* y *Opuntia robusta*) deshidratado por procesos convectivos**", ha informado a esta División de Estudios de Posgrado e Investigación (DEPI), que están de acuerdo con el trabajo presentado.

Por lo anterior, se le **AUTORIZA** a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®

Educando para la Sociedad Actual y los Retos del Futuro

BENJAMÍN HERNÁNDEZ MÁRQUEZ
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
DEL TecNM CAMPUS TLAJOMULCO



S.E.P.
TECNM
14-DIT06038
IT TLAJOMULCO
DIV. DE ESTUDIOS
DE POSGRADO
E INVESTIGACIÓN

Ccp.- Luz Elena Alfaro Orozco; Departamento de Servicios Escolares
Expediente
MIBR/IGL/BHM/AJRV



2026
año de
Margarita
Maza



1. Dedicatorias

Dedico con todo mi corazón este logro a Dios, por permitirme llegar hasta este momento tan especial para mí, además de regalarme a mi familia y amigos. A mis padres, por acompañarme durante el transcurso de mi posgrado, brindándome su apoyo incondicional y confiando en mí; por inculcarme que la vida es un reto que debe afrontarse con perseverancia y dedicación.

Especialmente, dedico con todo mi amor esta tesis a mi mamá, por tenerme paciencia, comprensión y, sobre todo, por estar conmigo a lo largo de este camino. Por todo el apoyo emocional y económico que me permitió llegar hasta donde estoy. Gracias, mamá, por creer que podía cumplir este sueño; sin ti no sería lo que soy en este momento.

También quiero dedicar este trabajo a todas las personas que ayudaron en mi formación académica y personal, por su paciencia, comprensión y dedicación al compartirme sus conocimientos. Gracias a ustedes también estoy cumpliendo un sueño que anhelaba con todo el corazón. Sin ustedes no lo hubiera logrado; tantas desveladas valieron la pena, tanto en lo académico como en lo personal, y aquí está el fruto de todo mi esfuerzo.

Les agradezco con todo mi corazón el haber coincidido con ustedes en esta vida y compartir momentos de alegría y tristeza, porque cada uno de esos momentos me hace valorar a las personas que me rodean. Los quiero y estimo mucho; nunca los olvidaré.

2. Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a Dios por darme la dicha de lograr una meta más en el trayecto de mi vida, llena de salud y bendiciones a lo largo de mi formación.

También quiero agradecer a mis padres, Juan Carlos y Verónica, por darme la vida y brindarme su apoyo emocional y económico para continuar con mis estudios, porque fueron los primeros en creer en mí y en que podía lograrlo. Gracias por ser ese pilar durante mi posgrado y por confiar en que podía lograr esto y más

A mis tías María e Isela, por darme consejos en los momentos más difíciles durante mi formación, por brindarme la motivación para seguir con este sueño y no desistir de él.

Al Dr. Isaac Andrade Gonzales por el gran apoyo durante mi estancia académica en el posgrado, por darme la oportunidad de trabajar con él, así como por los conocimientos compartidos en la presente investigación y en mi formación académica. Gracias por cada momento de enseñanza.

Al Dr. Gonzalo Soria Melgarejo por enseñarme que la vida tiene retos y que es de valientes aceptarlos, aunque otros no crean que podemos lograrlo. Además, por todo el apoyo brindado durante mi estancia en el posgrado, así como por los conocimientos compartidos en la realización de mi trabajo y los consejos brindados en el ámbito personal y profesional para mejorar como persona. Gracias por los regaños y los momentos compartidos.

Para la Dra. Vania Sbeyde Farias y el Dr. Arturo Moisés Chávez, por acompañarme y ayudarme en mi formación durante el posgrado, así como por brindarme consejos en el ámbito académico durante mi trabajo de investigación.

Al IIA Daniel Méndez Vargas Por enseñarme a creer en mí y en que tengo la capacidad de cumplir cada una de mis metas; por compartirme sus conocimientos académicos, así como sus consejos para mejorar como persona y como profesionista. Gracias por todo y por enseñarme que la vida no es fácil, pero que con esfuerzo, dedicación y perseverancia puedo cumplir con lo que me proponga.

Para los amigos y compañeros que estuvieron en clases conmigo: Carla, Jose Luis, Maricela, Ada, Lizbeth y Ulises, por estar en cada momento y brindarme

su amistad incondicional en mis peores momentos; por darme apoyo moral, risas, enojos y motivación para seguir adelante y culminar mi posgrado.

A los grandes amigos Carla, Jose Luis y Maricela, por estar conmigo en los momentos más difíciles, por brindarme todo su apoyo incondicional cuando sentía que la vida se ponía difícil, y por las grandes experiencias vividas. Gracias por todos los bonitos recuerdos guardados en mi corazón durante el posgrado.

A mis grandes amigas Marlene y Montse, por estar en cada momento compartido durante todo este tiempo, por creer en mí y apoyarme con cada uno de sus consejos durante mi estancia en el posgrado. Gracias por ayudarme a creer en mí y en que puedo cumplir cada objetivo que me proponga, y sobre todo por cada consejo para mejorar como persona. Espero que la vida nos permita seguir conservando una amistad incondicional. Las quiero mucho.

Para mi gran amigo Roberto que, aunque es poco el tiempo que lo conozco, me ha enseñado que la vida tiene altas y bajas, pero que debemos aprender a sacar el lado bueno de lo que nos pasa. Gracias por escucharme en mis momentos de frustración durante la culminación de mis trabajos, por cada consejo brindado y por cada uno de los momentos compartidos, pero sobre todo por enseñarme a ver la vida de otra manera. Te quiero mucho y espero que la vida nos permita seguir conociéndonos y formar una buena amistad.

Sin excepción y de una manera muy especial, dedico estas palabras a la memoria de mi gran y fiel compañero de cuatro patas, quien me acompañó en esta gran aventura de venir a conocer otro estado. Gracias por estar en cada momento de desvelo, sentado a mi lado durante cada trabajo, exposición e investigación. Gracias por enseñarme que existen amigos incondicionales que, pase lo que pase, siempre demuestran su amor y cariño con el simple caminar de sus patas. Aunque ya no estés conmigo, siempre vivirás en mi corazón y en cada logro alcanzado durante esta etapa de mi vida.

3. Resumen

Los cladodios de nopal *Opuntia*, conocidos comúnmente en México como “nopalitos”, constituyen uno de los alimentos de consumo diario debido a su calidad nutricional. Este alimento pertenece a la familia de las cactaceae, la cual comprende más de 2000 especies distribuidas en el mundo y alrededor de 126 géneros. Los cladodios de nopal se caracterizan por presentar un alto contenido de agua, así como menores cantidades de carbohidratos, fibras y proteínas. Actualmente, existen polvos de nopal deshidratados disponibles en el mercado, los cuales presentan importantes contenidos químicos y funcionales. Por ello, en el presente trabajo de investigación se compararon diversos polvos comerciales y polvos obtenidos experimentalmente a partir de cladodios de nopal *O. ficus indica* y *O. robusta*, secados a diferentes temperaturas (60 °C y 80 °C) y en distintos estados de madurez (15, 30 y 365 días), mediante un diseño experimental $2 \times 2 \times 3$, con las variables mencionadas anteriormente. Así mismo, se evaluó el comportamiento cinético para determinar el tiempo de secado y se obtuvieron los polvos mediante secado convectivo. A los polvos obtenidos se les realizó un análisis químico proximal, incluyendo humedad, cenizas, grasas y azúcares reductores. También se efectuó una cromatografía en capa fina (TLC) de manera cualitativa, además de análisis fitoquímicos para determinar polifenoles y flavonoides totales, así como la capacidad antioxidante mediante los ensayos ABTS y DPPH. En cuanto a los parámetros fisicoquímicos, se evaluaron la solubilidad, densidad, viscosidad, color y calorimetría diferencial de barrido (DSC). De acuerdo con los resultados obtenidos de los diferentes tratamientos de nopal *O. ficus indica* y *O. robusta* secados a 60 y 80 °C, en sus estados de madurez de 15, 30 y 365 días, la caracterización proximal arrojó diferencias significativas en cada uno de los tratamientos entre las especies, la temperatura de secado, los estados de madurez y los polvos comerciales. En general, los polvos se encontraron dentro de lo reportado en la literatura científica, a excepción del contenido de ceniza de la muestra M8S. En cuanto a los azúcares reductores, los tratamientos y polvos sin hidrolizar, especialmente *O. ficus indica* 30 días a 80 °C y *O. robusta* 365 días a 60 °C, arrojaron valores altos. Los polvos comerciales mostraron valores similares a los obtenidos experimentalmente. Por

otra parte, el análisis TLC identificó la presencia de monosacáridos asociados a polisacáridos estructurales y mucilaginosos. Respecto a los análisis fitoquímicos, los polvos O.F.I en etapas de crecimiento de 15 y 30 días arrojaron mejores valores en polifenoles, flavonoides totales y capacidad antioxidante determinada por ABTS y DPPH. Los polvos comerciales presentaron valores muy variables en cuanto a estos contenidos y porcentajes de inhibición, a excepción de la muestra M8S. En los parámetros fisicoquímicos, los tratamientos secados a 80 °C arrojaron mejores resultados, mientras que los polvos comerciales presentaron variaciones en dichos parámetros. En relación con el comportamiento colorimétrico, el polvo O.R 15 días a 80 °C presentó características visuales agradables en comparación con algunos polvos comerciales, los cuales mostraron tonalidades rojizas o marrones. Los análisis por DSC mostraron estabilidad térmica en los tratamientos respecto a los comerciales. Se concluye que la obtención de polvos de manera experimental bajo condiciones adecuadas de secado permite desarrollar productos con características deseables para uso alimentario, en comparación con algunos de los polvos disponibles actualmente en el mercado.

4. Abstract

The *Opuntia* cactus cladodes, commonly known in Mexico as “nopalitos,” constitute one of the most frequently consumed foods due to their nutritional quality. This food belongs to the Cactaceae family, which comprises more than 2,000 species distributed worldwide and around 126 genera. Nopal cladodes are characterized by their high water content, as well as lower amounts of carbohydrates, fibers, and proteins. Currently, dehydrated nopal powders are commercially available and are recognized for their important chemical and functional properties. Therefore, in the present research work, several commercial powders and experimentally obtained powders from *O. ficus-indica* and *O. robusta* cladodes were compared. The cladodes were dried at different temperatures (60 °C and 80 °C) and at different maturity stages (15, 30, and 365 days) using a 2 × 2 × 3 experimental design considering the variables previously mentioned. Likewise, drying kinetics were evaluated to determine the drying time, and the powders were obtained through convective drying. The obtained powders were subjected to proximal chemical analysis, including moisture, ash, fat, and reducing sugars. Qualitative thin-layer chromatography (TLC) was also performed, in addition to phytochemical analyses to determine total polyphenols and flavonoids, as well as antioxidant capacity through ABTS and DPPH assays. Regarding physicochemical parameters, solubility, density, viscosity, color, and differential scanning calorimetry (DSC) were evaluated. According to the results obtained from the different treatments of *O. ficus-indica* and *O. robusta* powders dried at 60 °C and 80 °C, and at maturity stages of 15, 30, and 365 days, proximal characterization showed significant differences among treatments regarding species, drying temperature, maturity stages, and commercial powders. In general, the powders were within the ranges reported in the scientific literature, except for the ash content of sample M8S. Regarding reducing sugars, the treatments and powders without hydrolysis, especially *O. ficus-indica* 30 days at 80 °C and *O. robusta* 365 days at 60 °C, showed the highest values. Commercial powders presented values similar to those obtained experimentally. Furthermore, TLC analysis identified the presence of monosaccharides associated with structural and mucilaginous polysaccharides.

Concerning phytochemical analyses, *O. ficus-indica* powders at 15 and 30 days of growth exhibited the best values for total polyphenols, total flavonoids, and antioxidant capacity determined by ABTS and DPPH assays. Commercial powders showed highly variable values for these compounds and inhibition percentages, except for sample M8S. Regarding physicochemical parameters, treatments dried at 80 °C presented better results, whereas commercial powders showed variations in these properties. In relation to colorimetric behavior, the *O. robusta* powder at 15 days and dried at 80 °C exhibited more visually appealing characteristics compared to some commercial powders, which showed reddish or brownish tones. DSC analyses demonstrated greater thermal stability in the experimental treatments compared to the commercial samples. It is concluded that obtaining powders experimentally under controlled drying conditions allows the development of products with desirable characteristics for food applications, compared with some of the powders currently available on the market.

5. Índice

1.	Dedicatorias.....	i
2.	Agradecimientos.....	ii
3.	Resumen	iv
4.	Abstract	vi
5.	Índice.....	viii
6.	Índice de tablas	xii
7.	Índice de graficas	xiv
8.	Índice de figuras	xvi
9.	Glosario	xvii
10.	Introducción	19
11.	Antecedentes.....	21
12.	Marco teórico.....	25
12.1.	Nopal.....	25
12.1.1.	Historia.....	25
12.1.2.	Generalidades.....	27
12.1.2.1.	Composición química	29
12.1.2.2.	Características del nopal	31
12.1.2.3.	Aspectos benéficos del nopal	31
12.1.3.	Producción y consumo per cápita del nopal	32
12.1.4.	Usos e industrialización del nopal.....	33
12.2.	Mucílago.....	34
12.2.1.	Características del mucílago de nopal	34
12.2.2.	Composición química.....	35
12.2.3.	Solubilidad del mucílago	36
12.2.4.	Métodos de obtención y uso en la industria	37
12.3.	Fibras	37
12.3.1.	Composición de las fibras e importancia en la salud humana.....	38
12.3.2.	Tipos de fibras	38

12.3.2.1.	Fibras insolubles.....	38
12.3.2.2.	Fibras solubles	39
12.3.2.3.	Obtención de fibra dietética	39
12.3.3.	Aplicaciones en la industria	40
12.3.4.	Procesamiento de fibras vegetales	40
12.3.5.	Estándares de calidad de la fibra dietética	41
12.4.	Procesos de deshidratación	41
12.4.1.	Secado.....	42
12.4.1.1.	Secado convectivo.....	43
13.	Planteamiento del problema	46
14.	Justificación	47
15.	Objetivo genral	48
15.1.	Objetivos específicos	48
16.	Hipótesis.....	49
17.	Metodologías	50
17.1.	Materia prima	50
17.2.	Diseño experimental	50
17.3.	Evaluación morfológica de los cladodios	50
17.4.	Determinación de cinética de secado del nopal	51
17.4.1.	Secado convectivo.....	52
17.5.	Extracción de mucílago	52
17.6.	Metodología química	53
17.6.1.	Análisis proximales	53
17.6.1.1.	Determinación de humedad.....	53
17.6.1.2.	Determinación de cenizas	54
17.6.1.3.	Determinación de lípidos	54
17.6.1.4.	Carbohidratos	55
17.7.	Metodologías fitoquímicas.....	56

17.7.1.	Extractos	56
17.7.2.	Cuantificación de polifenoles	57
17.7.3.	Cuantificación de flavonoides	57
17.7.4.	Capacidad antioxidante.	57
17.7.4.1.	ABTS	57
17.7.4.2.	DPPH.....	58
17.8.	Metodologías fisicoquímicas	58
17.8.1.	Solubilidad	58
17.8.2.	Densidad.....	59
17.8.3.	Viscosidad.....	59
17.8.4.	Determinación de color	60
17.8.5.	Temperatura de transición vítrea.....	61
17.9.	Análisis estadístico	61
18.	Resultados y discusión	62
18.1.	Evaluación morfológica de los cladodios	62
18.2.	Cinética de secado.....	65
18.3.	Secado convectivo	67
18.4.	Rendimiento de extracción de mucílago	69
18.5.	Análisis Proximal.....	72
18.5.1.	Carbohidratos	76
18.5.1.1.	Azúcares reductores.....	76
18.5.1.2.	TLC.....	80
18.6.	Análisis fitoquímico	82
18.6.1.	Cuantificación de Polifenoles y flavonoides totales.....	82
18.6.2.	Evaluación de actividad antioxidante	86
18.7.	Análisis fisicoquímicos	93
18.7.1.	Color	98
18.7.2.	Temperatura de transición vítrea.....	103

19.	Conclusiones	108
20.	Referencias	112

6. Índice de tablas

Tabla 1. Composición proximal del nopal <i>Opuntia ficus indica</i> .	30
Tabla 2. Composición proximal del nopal <i>Opuntia robusta</i> .	31
Tabla 3. Top 10 de volumen de producción de nopalitos en México.	33
Tabla 4. Porcentaje del rendimiento de los cladodios <i>Opuntia ficus indica</i> y <i>Opuntia robusta</i> (fresco y seco) a diferentes temperaturas de secado (60 y 80°C).	68
Tabla 5. Composición proximal (humedad, cenizas y grasas) de los polvos de nopal (<i>Opuntia ficus-indica</i> y <i>Opuntia robusta</i>) en diferentes estados de madurez y temperaturas de secado.	73
Tabla 6. Composición proximal (humedad, cenizas y grasas) de los polvos comerciales de nopal deshidratado	75
Tabla 7. Contenido de azúcares reductores en los polvos de nopal (<i>Opuntia ficus-indica</i> y <i>Opuntia robusta</i>) a diferentes estados de madurez y temperaturas de secado, antes y después de la hidrólisis.	77
Tabla 8. Contenido de azúcares reductores en los polvos comerciales de nopal deshidratado, antes y después de la hidrólisis.	79
Tabla 9. Valores de R _f los polvos de nopal (<i>Opuntia ficus-indica</i> y <i>Opuntia robusta</i>) a diferentes estados de madurez secados a 80°C mediante TLC.	80
Tabla 10. valores de R _f de los polvos comerciales de nopal deshidratado mediante TLC.	82
Tabla 11. Cuantificación de compuestos fenólicos totales y flavonoides totales en polvos de nopal (<i>Opuntia ficus-indica</i> y <i>Opuntia robusta</i>) a diferentes temperaturas de secado y estado de madurez.	83
Tabla 12. Cuantificación de compuestos fenólicos totales y flavonoides totales en polvos comerciales de nopal deshidratado.	85
Tabla 13. Propiedades fisicoquímicas (solubilidad, densidad y viscosidad) de los polvos de nopal (<i>Opuntia ficus-indica</i> y <i>Opuntia robusta</i>) obtenidos a diferentes temperaturas de secado y estados de madurez.	94
Tabla 14. Propiedades fisicoquímicas (solubilidad, densidad y viscosidad) de los polvos comerciales de nopal deshidratado.	97

Tabla 15. Parámetros de color (L^* , a^* , b^* , h° y C) de polvos de nopal (*Opuntia ficus-indica* y *Opuntia robusta*) deshidratados a diferentes temperaturas y estados de madurez. 100

Tabla 16. Parámetros de color (L^* , a^* , b^* , h° y C) de polvos comerciales de nopal deshidratado. 102

7. Índice de graficas

Grafica 1. Variación del grosor (Cm) de los cladodios de *Opuntia ficus-indica* y *Opuntia robusta* en diferentes estados de madurez (15 días, 30 días y 365 días).

62

Grafica 2. Variación del ancho (Cm) de los cladodios de *Opuntia ficus-indica* y *Opuntia robusta* en diferentes estados de madurez (15 días, 30 días y 365 días).

62

Grafica 3. Variación del largo (Cm) de los cladodios de *Opuntia ficus-indica* y *Opuntia robusta* en diferentes estados de madurez (15 días, 30 días y 365 días).

63

Grafica 4. Variación del área (Cm²) de los cladodios de *Opuntia ficus-indica* y *Opuntia robusta* en diferentes estados de madurez (15 días, 30 días y 365 días).

63

Grafica 5. Variación del perímetro (Cm) de los cladodios de *Opuntia ficus-indica* y *Opuntia robusta* en diferentes estados de madurez (15 días, 30 días y 365 días).

64

Grafica 6. Comportamiento cinético del contenido de humedad del cladodios nopal *Opuntia* a diferentes tiempos de exposición al secado convectivo. 66

Grafica 7. Comportamiento cinético (Humedad kg de agua/ kg de materia seca) del cladodio de nopal *Opuntia* a diferentes tiempos de exposición al secado convectivo.

66

Grafica 8. *Comportamiento de la velocidad de secado del cladodio de nopal Opuntia de nopal al secado convectivo.* 67

Grafica 9. Rendimiento del polvo (%) obtenido del proceso de reducción de tamaño de los cladodios de *Opuntia ficus-indica* (O.F.I) y *Opuntia robusta* (O.R) a diferentes estados de madurez (15, 30 y 365 días) y temperaturas de secado (60 y 80°C). 69

Grafica 10. Rendimiento de la extracción de mucílago (%) de los cladodios de nopal *Opuntia ficus-indica* y *Opuntia robusta* a diferentes estado de madurez (15, 30 y 365 días) y temperaturas de secado (60 y 80°C). 70

Grafica 11. Rendimiento de la extracción de mucílago (%) de los polvos comerciales de nopal deshidratado. 72

Grafica 12. Porcentaje de inhibición de los radicales libres $ABTS^{\cdot+}$ en extractos de polvos de nopal (*Opuntia ficus-indica* y *Opuntia robusta*) obtenidos a diferentes temperaturas de secado y etapas de madurez. 87

Grafica 13. Porcentaje de inhibición de los radicales libres $DPPH^{\cdot}$ en extractos de polvos de nopal (*Opuntia ficus-indica* y *Opuntia robusta*) obtenidos a diferentes temperaturas de secado y etapas de madurez. 88

Grafica 14. Porcentaje de inhibición de los radicales libres $ABTS^{\cdot+}$ en extractos de polvos comerciales de nopal deshidratado. 90

Grafica 15. Porcentaje de inhibición de los radicales libres $DPPH^{\cdot}$ en extractos de polvos comerciales de nopal deshidratado. 91

8. Índice de figuras

Figura 1. Plantas de nopal de diferentes especies.	25
Figura 2. Distribución geográfica de las diferentes especies del nopal en México.	26
Figura 3. Generalidades de la planta.	27
Figura 4. Nopal <i>Opuntia Ficus Indica</i> .	28
Figura 5. Nopal <i>Opuntia Robusta</i> .	29
Figura 6. Aplicaciones y usos del nopal.	33
Figura 7. Localización de la pectina y mucilago en la pared celular.	35
Figura 8. Estructura de la pectina.	36
Figura 9. Estructura del mucilago.	36
Figura 10. Curva típica de rapidez de secado.	45
Figura 11. Termogramas DSC de los polvos de nopal (<i>Opuntia ficus-indica</i> y <i>Opuntia robusta</i>) a diferentes temperaturas de secado y estados de madurez.	103
Figura 12. Termogramas DSC de los polvos de nopal (<i>Opuntia ficus-indica</i>) deshidratado a diferentes temperatura de secado (60°C y 80°C) y etapas de madurez (15 y 30 días).	104
Figura 13. Termogramas DSC de los polvos de nopal (<i>Opuntia robusta</i>) deshidratado a diferentes temperatura de secado (60°C y 80°C) y etapas de madurez (30 y 365 días).	105
Figura 14.- Comportamiento térmico de polvos comerciales de nopal asi como de los polvos de (<i>Opuntia ficus-indica</i> y <i>Opuntia robusta</i>) obtenidos por secado convectivo a diferentes temperatura a 30 días de crecimiento, determinado por análisis DSC.	107

9. Glosario

Análisis proximal: Comprende la determinación de los porcentajes de humedad, grasa, fibra, cenizas, carbohidratos solubles y proteína en los alimentos.

Aditivo: Son sustancias que se añaden a los alimentos para mantener o mejorar su inocuidad, su frescura, su sabor, su textura o su aspecto.

Análisis fitoquímico: Conjunto de técnicas utilizadas para identificar y cuantificar compuestos bioactivos presentes en las plantas, como polifenoles, flavonoides, alcaloides y otros metabolitos secundarios.

Análisis fisicoquímico: Evaluación de las propiedades físicas y químicas de un material o alimento, tales como humedad, densidad, viscosidad, color, solubilidad y composición química.

Cladodio: Tallo modificado y succulento característico de las especies del género *Opuntia*, encargado de realizar funciones de fotosíntesis y almacenamiento de agua.

Gloquidios: Pequeñas espinas finas y cortas presentes en las areolas de algunas cactáceas, las cuales pueden desprenderse fácilmente.

Clorénquima: Tejido vegetal rico en cloroplastos responsable de realizar la fotosíntesis.

Parénquima: Tejido vegetal formado por células vivas que participan en funciones de almacenamiento, fotosíntesis y soporte.

Mucílago: Sustancia viscosa compuesta principalmente por polisacáridos hidrosolubles presentes en diversas plantas, incluyendo el nopal.

Estambres: Órganos reproductores masculinos de la flor encargados de producir el polen.

Pistilo: Órgano reproductor femenino de la flor formado por estigma, estilo y ovario.

Sendas cantidades: Expresión utilizada para indicar cantidades considerables o importantes de una sustancia o compuesto.

Piranosa: Forma cíclica de un monosacárido compuesta por un anillo de seis miembros.

Orgánulo: Estructura especializada dentro de una célula que realiza funciones específicas.

Coloidal: Sistema donde partículas microscópicas se encuentran dispersas en otra sustancia sin sedimentar fácilmente.

Aw (actividad de agua): Parámetro que indica la cantidad de agua libre disponible en un alimento para el crecimiento microbiano y reacciones químicas.

O.F.I: Abreviatura utilizada para Opuntia ficus-indica.

O.R: Abreviatura utilizada para Opuntia robusta.

CAM: Metabolismo ácido de las crasuláceas, mecanismo fotosintético característico de plantas adaptadas a condiciones áridas.

Cp: Centipoise, unidad utilizada para expresar viscosidad.

DNS: Ácido 3,5-dinitrosalicílico, reactivo utilizado para la determinación de azúcares reductores.

DSC: Calorimetría diferencial de barrido (Differential Scanning Calorimetry), técnica utilizada para evaluar cambios térmicos en materiales.

Kg: Kilogramo, unidad de masa equivalente a 1000 gramos.

g: Gramo, unidad de masa.

cm: Centímetro, unidad de longitud.

min: Minuto, unidad de tiempo.

mL: Mililitro, unidad de volumen.

rpm: Revoluciones por minuto, unidad utilizada para indicar velocidad de rotación.

10. Introducción

El nopal del género *Opuntia* es un vegetal perteneciente a la familia de las *Cactaceae*, el cual está formado por cuatro partes principales: cladodios (tallos suculentos), flor, fruto y semillas. Esta planta predomina en zonas áridas y semiáridas, y se encuentra distribuida geográficamente en hábitats del Mediterráneo, Oriente Medio, Sudáfrica, Australia, Sudamérica, Centroamérica, Norteamérica e India. Además, este género comprende aproximadamente 2000 especies distribuidas en 126 géneros, por lo que pertenece a una de las familias más importantes dentro del orden de las *Cactaceae*. (Rodrigues et al., 2023).

El consumo global de los cladodios de nopal, conocidos comúnmente como nopalitos, es aproximadamente de 6.2 kg al año, según el SIAP, (2023). Esto se debe a que es un alimento de consumo diario por su calidad nutricional, bajo costo y arraigo cultural como alimento tradicional en México. Sin embargo, debido a su alto consumo, durante el año 2022 se reportaron más de 12,491 hectáreas sembradas, obteniendo un total de 872 mil toneladas de cladodios de nopal en ese año.

Actualmente, se han implementado investigaciones científicas con la finalidad de ampliar la información sobre la composición nutricional y funcional de dicho alimento, para obtener datos más detallados para su aplicación en la industria alimentaria. Aunado a esto, existen diferentes estudios sobre la caracterización de distintas especies y estados de madurez de los cladodios de nopal, lo que ha permitido generar información más confiable

Sin embargo, uno de los principales problemas de este alimento es su alto contenido de agua, el cual comprende entre 80 y 95 %, según mencionan Syariah & Ilmu, (2018). Esta característica limita su vida útil postcosecha. Por ello, una de las alternativas más aplicadas durante los últimos años es el secado, proceso que emplea tecnologías para eliminar el mayor contenido de agua y mantener la estabilidad del producto final.

El cladodio de nopal *Opuntia* está constituido por fibras celulósicas y mucílago, constituido por polisacáridos como ácido galacturónico y ramnosa,

además de contener pequeñas cantidades de carbohidratos (3–7 %), fibras (1–2 %) y proteínas (0.5–1 %), así como compuestos fitoquímicos (De Farias et al., 2021).

Entre los métodos de conservación, el secado convectivo es uno de los más utilizados en la industria alimentaria debido a su rentabilidad en términos de tiempo de operación y costos. Este proceso permite obtener polvos deshidratados con aplicación como ingredientes funcionales en diversos productos alimentarios y con características nutricionales adecuadas.

Asimismo, factores como la especie de nopal y el estado de madurez tienen influencia en la composición estructural y bioquímica de los cladodios, afectando las características fisicoquímicas, químicas y funcionales, por lo que es importante evaluar estas variables para la calidad de los polvos obtenidos. Las condiciones de secado, principalmente la temperatura y los tiempos de exposición, tienden a modificar las propiedades fisicoquímicas, químicas y funcionales del producto final. Por ello, la industria alimentaria ha buscado alternativas de deshidratación con menores tiempos y temperaturas para preservar estos compuestos presentes en el alimento. (Mari et al., 2024).

De acuerdo con lo mencionado sobre las características químicas y fisicoquímicas de los diversos polvos de nopal obtenidos de las especies *Opuntia ficus indica* y *Opuntia robusta*, se aporta información importante sobre sus diferencias en los procesos de secado convectivo.

Por lo tanto, el objetivo de esta investigación es caracterizar las propiedades de diversos polvos comerciales, así como de cladodios de nopal (*Opuntia ficus indica* y *Opuntia robusta*), con la finalidad de comparar si los polvos que se encuentran en el mercado presentan una calidad adecuada en sus procesos de obtención, preservando su composición química para la utilización de este alimento en la industria alimentaria y para consumo humano.

Comparación y caracterización fisicoquímica y química de los polvos de nopal (*Opuntia ficus indica* y *Opuntia robusta*) deshidratados por proceso convectivo.

11. Antecedentes

Durante las últimas décadas se ha incrementado el consumo de fibras naturales, las cuales se han utilizado en la industria alimentaria por su contenido de propiedades funcionales asociadas con la reducción de enfermedades degenerativas como obesidad, diabetes, enfermedades cardíacas y algunos tipos de cáncer. Debido a ello, se ha tratado de utilizar alimentos que sean ricos en nutrientes y en este componente, siendo el nopal uno de los principales alimentos, ya que es rico en fibra dietética con la finalidad de aportar beneficios a la salud.

Debido a ello, existen diversas investigaciones en las cuales se han obtenido resultados de una adecuada calidad nutricional, principalmente en este componente, estipulando el tiempo de madurez óptimo, así como condiciones adecuadas para no perderlo. Teniendo como objetivos principales mejorar los alimentos para el consumidor y contribuir a la salud.

Abdel-Razek et al., (2019), se realizó una investigación acerca del efecto de la composición química de los subproductos silvestres, así como de los cladodios de *Opuntia ficus indica*, donde se evaluó su calidad nutricional y su eficacia antioxidante y antifúngica. Se obtuvo como resultado que la fibra dietética de los cladodios fue de 25.65 g de fibra dietética total (fracción insoluble y soluble), la cual tiene una gran función preventiva para enfermedades degenerativas. Asimismo, se reflejó un contenido considerable de microelementos, concluyendo que podría beneficiar su aplicación en la industria alimentaria.

Mounir et al., (2020) se realizó una investigación sobre los cambios fisicoquímicos en cladodios de *Opuntia ficus-indica* en función del estado de crecimiento y las áreas de cosecha, donde se evaluaron las propiedades fisicoquímicas de la planta en diferentes estados de maduración. Se obtuvo como resultado que sus características presentaban cambios significativos entre especies, así como la influencia de la edad, las condiciones estacionales y los

factores agronómicos, indicando que las almohadillas más antiguas eran ricas en carbohidratos y minerales, mientras que las almohadillas más jóvenes eran ricas en proteínas.

Se concluyó que estos cladodios podrían representar componentes importantes para la dieta humana y utilizarse en alimentos, cosméticos, entre otros. En comparación con esta investigación, se realizará un estudio similar para determinar si existen cambios significativos en las condiciones en las que se encuentran y en el estado de madurez con respecto a la fibra dietética.

Missaoui et al., (2020), se realizó una investigación acerca de la caracterización de micronutrientes, bioaccesibilidad y actividad antioxidante de los cladodios de tuna, los cuales contienen componentes que pueden utilizarse como ingredientes funcionales. En este estudio se caracterizaron compuestos antioxidantes, minerales y fibra dietética soluble. Se obtuvo como resultado que la fibra estaba constituida por pectina y mucílago, compuestos por arabinosa, galactosa, glucosa, manosa, azúcares como ramnosa y xilosa, así como otros compuestos importantes relacionados con la actividad antioxidante. Se concluyó que los resultados planteados pueden considerarse para generar alimentos con valores nutricionales esenciales, considerando la presencia de fibra dietética en el polvo de cladodio y su posible efecto prebiótico.

Dick et al., (2020), se realizó una investigación sobre la harina de mucílago y cladodio de nopal (*Opuntia monacantha*), teniendo aplicación en la industria alimentaria como ingredientes alternativos para un snack. Se realizaron cinco formulaciones diferentes con harina de mucílago y cladodio. Los resultados mostraron un valor alto de fibra en sus fracciones solubles e insolubles, tanto en la caracterización de las harinas como en las galletas, siendo ricas en este componente. Se concluyó que la inclusión de estas harinas mejoraba el valor nutricional de la galleta, aumentando su contenido de fibra, además de representar un ingrediente tecnológico funcional para los alimentos.

Otálora et al., (2021), se realizó una investigación acerca de la extracción y caracterización fisicoquímica del mucílago seco en polvo de cladodios de *Opuntia ficus-indica* y *Aloe vera*, donde se obtuvieron comparaciones en cuanto a la

composición de estas plantas. Se obtuvo mucílago en polvo de ambas especies y los resultados mostraron que los cladodios de *Opuntia ficus-indica* contenían el doble de fibra dietética en comparación con las hojas de *Aloe vera*, además de presentar propiedades adecuadas para ser utilizadas como ingredientes funcionales en la industria. Asimismo, esta investigación se relaciona con diversas metodologías que serán aplicadas en el presente trabajo de investigación.

Martins et al., (2022), se realizó una investigación sobre las propiedades físicas, nutricionales y bioactivas de la harina de cladodios de Mandacaru (*Cereus jamacaru DC.*), donde se evaluó una planta alimenticia no convencional, obteniendo buenos resultados en su composición nutricional. Se resaltó que es rica en fibra dietética insoluble (48.08 g/100 g), además de otros minerales, así como un excelente potencial antioxidante. Se concluyó que la harina de mandacaru es una especie poco investigada, pero con un buen valor nutricional y compuestos bioactivos. En esta investigación se trabajará únicamente con la fibra soluble de los cladodios de nopal, debido a que es rica en este componente y presenta un aporte a la salud.

Hernández-Becerra et al., (2022), se realizó una investigación acerca de los cladodios de nopal (*Opuntia ficus indica*): propiedades nutricionales y potencial funcional. Los resultados obtenidos mostraron que los valores nutricionales del nopal presentan cambios en función del estado de madurez. En cuanto al contenido de fibra total, este aumenta conforme incrementan los días de maduración; sin embargo, la fibra soluble disminuye con el aumento de los días de maduración. Se concluyó que los cladodios se han convertido en un alimento invaluable para la alimentación humana y animal, debido a que su composición, en función del estado de madurez, presenta beneficios para la salud humana.

Beyá-Marshall et al., (2022) se realizó una investigación sobre las características físicas y químicas de los cladodios en polvo (*Opuntia ficus-indica* Molino), a los cuales se les aplicaron diferentes etapas de maduración y temperaturas de secado. Los resultados mostraron que no hubo diferencia significativa en la composición y en la fibra dietética con respecto a las temperaturas de secado y edad de cosecha, presentándose cambios únicamente en los

compuestos antioxidantes. Se concluyó que, a una temperatura de 40 °C y una cosecha de 30 días, se obtiene un polvo con buenas características nutricionales y antioxidantes.

Albergamo et al.,(2022), se realizó un estudio enfocado en la caracterización química de diferentes productos de *Opuntia ficus indica* (L.) Mill. de Túnez, evaluando diversos productos secos de dicha especie (cladodio, cáscara, pulpa y semilla), con el propósito de analizar su composición nutricional y el contenido de compuestos bioactivos. Los resultados evidenciaron que la cáscara y las semillas del nopal y tuna presentaron un elevado contenido de fibra (28.39, 12.54 y 16.28 %, respectivamente), mientras que el cladodio presentó una buena fuente de minerales esenciales como Mg, K, Mn y Fe. Con base en estos hallazgos, se concluyó que el nopal tunecino puede ser aprovechado de manera estratégica en el desarrollo de alimentos funcionales, proporcionando beneficios para la salud humana. Asimismo, se sugirió la realización de investigaciones que consideren diferentes orígenes geográficos y variedades de *Opuntia*, a fin de ampliar y consolidar la literatura científica existente.

Pérez-Viveros et al., (2024), se realizó un estudio sobre el efecto de la extrusión en las propiedades fisicoquímicas y funcionales de la harina de cladodio de *Opuntia cochenillifera* y *Opuntia ficus-indica*. Los resultados mostraron diferencias en las propiedades fisicoquímicas, físicas, funcionales y fitoquímicas entre ambas especies. Se concluyó que estas diferencias están influenciadas tanto por la especie como por las condiciones de extrusión, impactando directamente en las propiedades del nopal. Este estudio proporciona información más detallada y valiosa para el desarrollo de productos alimenticios.

12.Marco teórico

12.1. Nopal

El nopal pertenece al género *Opuntia*, l cual forma parte de la familia de las Cactaceae, que comprende aproximadamente 2000 especies distribuidas en 126 géneros, situándose entre las familias más importantes dentro del orden de las *cactáceas*. Esta planta se desarrolla predominantemente en zonas áridas y semiáridas, lo que le ha permitido desarrollar mecanismos de adaptación a condiciones climáticas hostiles (Rodrigues et al., 2023).

Una de sus principales características morfológicas es la presencia de gloquidios, conocidos comúnmente como ahuate, los cuales se encuentran alrededor de la penca. Estos son de pequeño tamaño y se encuentran agrupados en gran número, lo que constituye un rasgo distintivo del género *Opuntia* (Ponce-Luna et al., 2023).



Figura 1. Plantas de nopal de diferentes especies.

Obtenida (Elaboración propia)

12.1.1. Historia

La planta del género *Opuntia* se clasifica como suculenta debido a su capacidad de almacenar agua en uno o varios de sus órganos, lo que le permite sobrevivir en ambientes con disponibilidad hídrica limitada. Asimismo, se caracteriza por poseer un sistema radicular profundo, que le facilita una rápida absorción de

agua del suelo, y presentar una cutícula más gruesa y cerosa, cuya función principal es reducir la pérdida excesiva de agua por transpiración.

Estas plantas se reconocen como cultivos ideales para regiones áridas, ya que presentan una notable capacidad para generar biomasa en condiciones de escasez hídrica. Además, es uno de los géneros que destaca por su amplia diversidad y distribución en el continente americano, siendo México el país con mayor riqueza de especies silvestres, donde se han identificado alrededor de 126 especies con diferentes grados de domesticación.



Figura 2. Distribución geográfica de las diferentes especies del nopal en México.

Obtenida: (Consejo Mexicano de Nopal y Tuna A.C. et al., 2009)

En la historia del antiguo mundo, la planta era conocida desde principios del siglo XVI, existiendo la creencia de que acompañó a Colón en su primer regreso a Lisboa en el año de 1493. Posteriormente, se introdujo en el Caribe a finales del siglo XV, y existen registros que documentan su presencia en Tlaxcala y México en el año de 1519.

Existen evidencias de que la especie *Opuntia* tiene uso como alimento humano desde hace al menos 9,000 a 12,000 años. Se tienen informes de que los mayas del suroeste de México consumían los frutos y brotes de *Opuntia ficus indica*, al igual que las culturas Nazca del Perú, quienes también empleaban la planta con fines alimenticios (Del Socorro Santos Díaz et al., 2017).

Actualmente, esta planta también se encuentra ampliamente distribuida en diversas regiones del mundo, incluyendo Estados Unidos, África, Australia y la cuenca del Mediterráneo (M. A. Silva et al., 2021) Sin embargo, este cultivo no se limita geográficamente, ya que se desarrolla en más de 30 países debido a los diferentes beneficios ambientales, nutricionales y económicos, así como por la amplia gama de aplicaciones que ofrece en distintos sectores, según mencionan (Rodrigues et al., 2023).

12.1.2. Generalidades

Aunado a lo mencionado anteriormente, el nopal es una planta arbustiva cuyas ramas, o bien conocidas como pencas, dan origen a nuevos cladodios. Cada cladodio presenta dos capas diferenciadas: la externa, llamada clorénquima, y la capa interior, formada por células blancas llamadas parénquima, donde se encuentra el reservorio de mucílago, compuesto que desempeña un papel esencial en el almacenamiento de agua y la protección celular.

Otra característica distintiva son las flores hermafroditas, las cuales poseen órganos masculinos (estambres) y femeninos (pistilos) en la misma flor, presentando una forma redonda con una longitud entre 6 y 7 cm, además de tonalidades rojizas, amarillentas y blanquecinas. (Ponce-Luna et al., 2023).



Figura 3. Generalidades de la planta.

Obtenida: (Caminiti et al., 2024)

Opuntia ficus indica

El nopal *Opuntia ficus-indica* posee una gran importancia agronómica a nivel mundial, tanto por sus frutos como por sus cladodios, los cuales se destinan principalmente al consumo humano en estado tierno. Esta especie destaca por su contenido de compuestos bioactivos, así como por ser un excelente candidato para la producción de alimentos funcionales y nutraceuticos de alto valor agregado.

Históricamente, este cultivo ha sido utilizado por antiguas civilizaciones, principalmente para tratar diferentes enfermedades y curar heridas (Salas et al., 2023). Además, *O. ficus-indica* tiene su origen en las regiones tropicales y subtropicales del continente americano. Este alimento se caracteriza por poseer un alto contenido de fibra dietética, motivo por el cual los mexicanos lo han considerado un alimento autóctono con propiedades medicinales desde la época prehispánica. (Yusri, 2020).



Figura 4. Nopal *Opuntia Ficus Indica*.

Obtenida: (Elaboración Propia)

Opuntia robusta

La especie *Opuntia robusta* es una planta arbustiva altamente ramificada, conocida tanto por su uso como verdura como por el consumo de su fruto, conocido comúnmente como tuna. Esta cactácea presenta un sistema radicular desarrollado, el cual le confiere propiedades que mejoran los suelos donde se establece,

contribuyendo a la recuperación y conservación de ecosistemas áridos (Valle, 2021).

Asimismo, se encuentra ampliamente distribuida en zonas áridas del territorio mexicano, particularmente en los estados de Zacatecas, Querétaro, Hidalgo, San Luis Potosí, Guanajuato y Michoacán (Javier et al., 2023). Esta planta se considera un alimento funcional debido a su contenido de compuestos bioactivos, ya que diferentes investigaciones han reportado un efecto potencial en la salud intestinal, cardiovascular y hepática, así como propiedades antioxidantes e incluso anticancerígenas. (Stephanie et al., 2023).



Figura 5. Nopal *Opuntia Robusta*.

Obtenida: (Elaboración propia)

12.1.2.1. Composición química

El género *Opuntia* constituye un cultivo de gran importancia a nivel mundial debido a los beneficios nutricionales y bioactivos que aporta, los cuales contribuyen a la mejora de la salud humana.

La composición nutricional y bioactiva de las especies del género *Opuntia* comprende fibra, proteínas, grasas, minerales, polifenoles, betalaínas, carotenoides y fitoesteroles, entre otros compuestos, los cuales exhiben grandes beneficios para

la salud, particularmente por sus propiedades antioxidantes, antiaterogénicas y antiulcerogénicas, de acuerdo con (Ferreira et al., 2023).

De acuerdo con Renally de Lima Moura a et al., (2023), diversas plantas alimenticias no convencionales, entre ellas Opuntia, destacan por su alto contenido de compuestos nutricionales y antioxidantes, lo que las convierte en fuentes potenciales de gran interés para el desarrollo de productos funcionales y nutracéuticos.

Los resultados obtenidos en Opuntia ficus-indica hacen referencia a su composición proximal, la cual proporciona información sobre sus características nutricionales básicas.

En la tabla 1 se muestran los resultados obtenidos de la composición aproximada de este cultivo según lo reportado por Aparicio-Ortuño et al.,(2024).

Tabla 1. Composición proximal del nopal Opuntia ficus indica.

Composición (g/100g)	Contenido
Humedad	8.52
Cenizas	15.38
Lípidos	1.83
Proteínas	11.50
Carbohidratos	62.77
Fibra dietética total	54.89
Fibra soluble	19.64
Fibra insoluble	35.25
Polifenoles totales	2050.20
Capacidad antioxidante	312.14

Por otra parte, los cultivos de nopal Opuntia robusta también son considerados como verdura, ya que se caracterizan por ser ricos en proteína y fibra, además de presentar otros componentes proximales.

En la tabla 2 se muestra la composición proximal de este cultivo, según lo reportado por el autor Syariah & Ilmu, (2018).

Tabla 2. Composición proximal del nopal <i>Opuntia robusta</i>.	
Composición (g/100g)	Contenido
Agua	91.2
Proteína	12.2
Carbohidratos	42.7

12.1.2.2. Características del nopal

Aunado a lo mencionado, el cultivo de nopal pertenece a la familia de las *Cactaceae*, la cual agrupa plantas arbustivas y espinosas, caracterizadas por poseer tallos redondeados y planos. De acuerdo con Yusri, (2020), la especie *Opuntia ficus-indica* puede alcanzar una altura de entre 3.5 y 5 metros, presentando múltiples ramificaciones y un sistema radicular fino y altamente absorbente, que le permite sobrevivir en zonas áridas. Los cladodios son de forma ovoidal, con longitudes que varían entre 60 y 70 cm dependiendo del tiempo de madurez, lo cual influye en su contenido nutricional, así como en la cantidad de agua disponible en el suelo.

En cuanto a *Opuntia robusta* según Valle, (2021) describe que se trata de una planta de porte leñoso, con tallos ramificados de tonos azulados plateados. Los cladodios presentan una forma ovalada y aplanada circular, con dimensiones entre 15 y 40 cm de ancho, 30 cm de largo y un grosor aproximado de 2.5 cm. Asimismo, esta especie se distingue por presentar flores de tonos amarillos intensos, las cuales miden aproximadamente 7 cm de diámetro y florecen entre primavera y verano. Las flores pueden ser unisexuales o hermafroditas, dando origen a frutos globosos de color rojo con pulpa comestible.

12.1.2.3. Aspectos benéficos del nopal

El género *Opuntia* ha despertado un amplio interés en investigaciones, así como un interés comercial, debido a la composición química y las propiedades que

presentan sus distintas especies. Estas plantas son ricas en nutrientes, compuestos bioactivos y fitoquímicos, lo que ha motivado diversos estudios enfocados en sus efectos sobre la salud, entre los que destacan sus propiedades anticancerígenas, antiinflamatorias, antioxidantes, neurológicas y protectoras del intestino, entre otras (Daniloski et al., 2022).

Dentro del género, la especie más domesticada es *Opuntia ficus-indica*, cuyos cladodios, conocidos como nopalitos, poseen una gran importancia tanto en la medicina tradicional como en la industria alimentaria. Esta especie es considerada una fuente valiosa de fibra dietética y compuestos bioactivos, así como de elementos inorgánicos como Mg, K, Mn y Fe, además de azúcares monoméricos para la constitución de carbohidratos. Dichos componentes respaldan efectos funcionales y nutraceuticos (Mill et al., 2022).

En el caso de *Opuntia robusta*, la información científica disponible aún es limitada. Según lo mencionado por Kivrak et al., (2018), el suministro de este cultivo en la alimentación puede proporcionar minerales esenciales como Mg, Fe y Zn, además de presentar una elevada capacidad antioxidante, atribuida principalmente a su contenido de polifenoles, lo cual puede aportar beneficios en el área nutraceutica.

12.1.3. Producción y consumo per cápita del nopal

De acuerdo con el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2023), el consumo per cápita de nopalitos en México es de aproximadamente 6.2 kg al año, ya que es uno de los alimentos de consumo diario por ser rico en nutrientes, su bajo costo y su arraigo cultural como alimento tradicional de México.

Durante el año 2022 se reportó una superficie sembrada superior a 12,491 hectáreas, obteniendo una producción total de 872 mil toneladas de nopalitos en ese año. Asimismo, se menciona un top 10 de las principales entidades federativas, el cual se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 3. Top 10 de volumen de producción de nopalitos en México.

Rank	Entidad federativa	Región	Volumen (toneladas)	Variación (%) 2021-2022
	Total, nacional		872,334	0.4
1	Morelos	Centro	406,609	0.3
2	Ciudad de México	Centro	198,363	1.9
3	México	Centro	87,767	1.6
4	Jalisco	Centro -occidente	35,611	0.4
5	Puebla	Centro	32,290	1.9
6	Michoacán	Centro -occidente	32,138	8.4
7	Aguascalientes	Centro -occidente	19,970	-5.7
8	Zacatecas	Noroeste	13,134	5.8
9	Tamaulipas	Noroeste	12,814	7.5
10	Baja california	Noroeste	7,232	-44.3
	Resto		26,407	-1.19

12.1.4. Usos e industrialización del nopal

Las aplicaciones y usos industriales del nopal se concentran principalmente en los sectores alimentario, farmacéutico, cosmético y de forraje animal. De acuerdo con lo señalado por Missaoui et al., (2020), en la industria alimentaria se utiliza en la elaboración de bebidas, mermeladas y alimentos de consumo diario, ya sea como vegetal fresco en ensaladas o como fruta (tuna).

**Figura 6.** Aplicaciones y usos del nopal.

Obtenida: (Rodrigues et al., 2023)

A pesar de su versatilidad, el nopal no se considera un alimento completo debido a que su composición química está dominada por su alto contenido de agua, lo cual limita parcialmente su densidad energética (Torres-Ponce et al., 2015). Sin embargo, su riqueza en fibras, minerales y compuestos bioactivos continúa impulsando su aprovechamiento en productos funcionales y de valor agregado.

12.2. Mucílago

El mucílago es una biomolécula ampliamente distribuida en la naturaleza, presente en diversas estructuras vegetales como raíces, cladodios de nopal, semillas, frutos y cáscaras, entre otras. Este hidrocoloide natural ha sido utilizado tradicionalmente con fines terapéuticos; sin embargo, en la actualidad su aplicación se ha extendido a diferentes sectores industriales, destacando los ámbitos alimentario, cosmético y farmacéutico debido a sus propiedades funcionales.

Entre estas propiedades se incluyen su capacidad para actuar como agente gelificante, emulsionante y espesante, lo que lo convierte en un ingrediente tecnológico y biotecnológico.(Mannai et al., 2024).

12.2.1. Características del mucílago de nopal

El mucílago se encuentra principalmente en los cladodios del nopal, donde desempeña un papel fundamental en el mantenimiento del metabolismo CAM (ácido de las crasuláceas). Este tipo de metabolismo consiste en optimizar el uso eficiente del agua para el adecuado crecimiento de la planta en zonas áridas y semiáridas, favoreciendo su desarrollo y supervivencia en ambientes con disponibilidad hídrica limitada (Pinheiro et al., 2024).

El mucílago del *Opuntia* spp, e clasifica como un hidrocoloide natural constituido por carbohidratos complejos con una elevada capacidad de absorción y retención de agua. Esta sustancia presenta una consistencia viscosa y se describe como un sistema coloidal líquido, rico en compuestos como pectinas, ácidos orgánicos y azúcares.

Su composición y propiedades funcionales pueden variar dependiendo de la especie botánica, así como del método de extracción empleado. (Monteiro et al., 2025).

12.2.2. Composición química

Los cladodios del nopal están compuestos por una mezcla de dos polisacáridos principales: mucílago y pectina, ambos clasificados como hidrocoloides naturales. Estos dos compuestos se encuentran distribuidos en la lámina media de la pared celular del cladodio, donde cumplen funciones estructurales y fisiológicas relacionadas con la retención de agua, la protección de la pared celular y la estabilidad, tal como se observa en la figura 7.

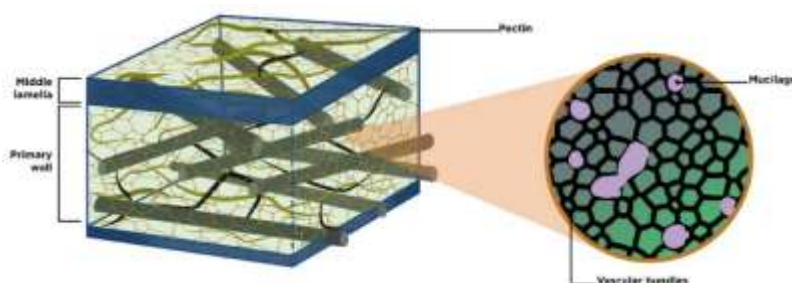


Figura 7. Localización de la pectina y mucílago en la pared celular.

Obtenida: Adapted from Harholt, J., Suttangkakul, A. and Vibe Scheller, H (2010)

La pectina es un compuesto que pertenece a los heteropolisacáridos complejos presentes principalmente en las paredes celulares de los tejidos vegetales, especialmente en las primeras células de los alimentos de origen vegetal. Su estructura está constituida por D-galacturónico en la cadena principal, pero con menor proporción de unidades de ramnosa que interrumpen la cadena lineal.

A esta estructura se ramifican diversos monosacáridos, entre los cuales destacan arabinosa y galactosa, mientras que la xilosa se encuentra unida directamente al ácido galacturónico, como se ilustra en la figura 8.

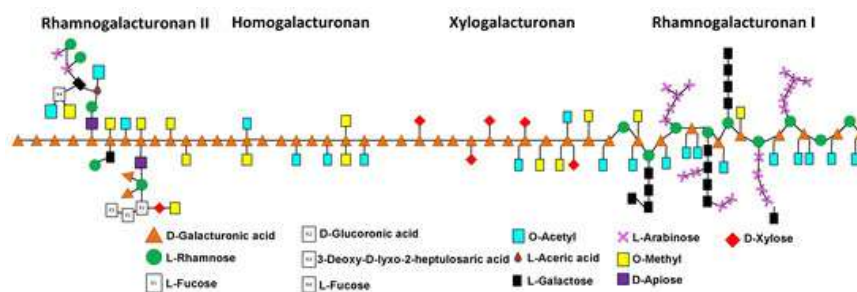


Figura 8. Estructura de la pectina.

Obtenida: (Harholt et al., 2010).

El mucílago es una sustancia natural presente en dicho alimento, la cual está compuesta por una mezcla de diversos monosacáridos, entre los que destacan L-arabinosa, D-galactosa (en formas de piranosas y furanosas), L-ramnosa, D-xilosa y ácido galacturónico.

Este último conforma la cadena principal de azúcar neutro D-galacturónico, como se muestra en la figura 9. El mucílago se localiza en los espacios extracelulares de los cladodios, formando parte de la matriz coloidal descrita previamente en la figura 7. Tanto la pectina como el mucílago comparten un papel fundamental en aplicaciones funcionales e industriales, además de participar en procesos biológicos relevante (Garfias Silva et al., 2022).

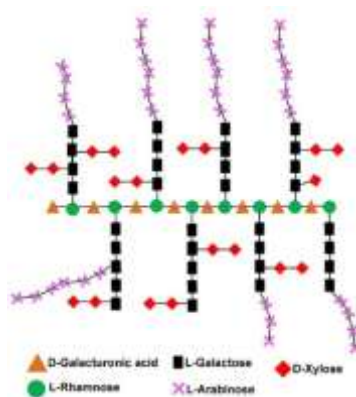


Figura 9. Estructura del mucílago.

Obtenida: (McGarvie & Parolis, 1981).

12.2.3. Solubilidad del mucílago

Aunado a lo mencionado anteriormente, las cactáceas presentan una notable adaptación a condiciones áridas y cálidas, soportando sequías prolongadas.

Cárdenas et al., (1997) mencionan que esta capacidad de retención de agua frente a condiciones climáticas desfavorables se debe al mucílago, el cual es un biopolímero hidrófilo constituido por monosacáridos complejos a los que se les atribuye la capacidad de interaccionar con el agua.

Por ello, esta sustancia no newtoniana es capaz de retener una mayor cantidad de agua en su estructura y ponerla a disposición en el metabolismo ácido de las crasuláceas (CAM), el cual contribuye a la fotosíntesis, optimizando el uso del agua y mejorando la eficiencia energética de la planta bajo condiciones de estrés hídrico, según mencionan Du Toit et al., (2018).

12.2.4. Métodos de obtención y uso en la industria

Los métodos empleados para la extracción de mucílago a partir de cladodios frescos varían en función de las diferentes condiciones aplicadas en el proceso, tales como tiempo, temperatura o uso de distintos solventes para la extracción. Entre las técnicas más comunes se encuentran los métodos por maceración y ultrasonido. Sin embargo, los resultados pueden diferir significativamente debido al método de extracción o a las condiciones del material vegetal (madurez, variedad, entre otros). Hasta el momento, no se ha establecido un método de extracción considerado más eficiente, debido a la falta de investigaciones disponibles en este ámbito. El uso industrial de este biopolímero se ha aplicado en los sectores farmacéutico, médico, cosmético y alimentario debido a sus propiedades fisicoquímicas y reológicas. Estas propiedades le permiten funcionar como agente emulsionante, auxiliar en la formación de geles o como componente en la elaboración de biopelículas (Quintero-García et al., 2021).

12.3. Fibras

La fibra es uno de los compuestos presentes en diversos tipos de alimentos, cuya función principal es mejorar el desempeño fisiológico del intestino. Las fibras pueden variar significativamente en su composición, así como en la proporción de diferentes componentes dentro de la planta, ya sea en su estructura química (grado de polimerización, peso molecular o enlaces entre átomos de carbono). Estas

variaciones estructurales determinan propiedades funcionales, tales como viscosidad, solubilidad o capacidad de fermentación, según mencionan Jose M Remes-Troche et al., (2021).

De acuerdo a lo mencionado por Peña -Valdivia et al. (2012), la pared celular vegetal está constituida por polisacáridos que forman parte de la fibra dietética. La composición, ubicación y solubilidad de estas macromoléculas son importantes para clasificar la fibra en soluble e insoluble, lo que a su vez influye en su efecto fisiológico y funcionalidad en el organismo.

12.3.1. Composición de las fibras e importancia en la salud humana

Aunado a lo mencionado anteriormente, los cladodios presentan un alto valor nutricional, el cual se divide en diferentes componentes, como minerales, contenidos fitoquímicos y fibra dietética. Estos compuestos pueden variar en función del tipo de especie, estado de madurez o condiciones ambientales en las que se desarrollan.

En lo que respecta a la fibra dietética, los cladodios están constituidos por pectinas, hemicelulosas, celulosas, mucílagos y ligninas, según mencionan (Rodrigues et al., 2023). Este componente desempeña diversas funciones beneficiosas para la salud, incluyendo la facilitación de la excreción de lípidos, contribuyendo a la reducción del peso corporal. Otro de los beneficios que puede aportar, según mencionan (Arias-Rico et al., 2025) es que juega un papel importante en la salud digestiva, así como en una adecuada motilidad intestinal, lo cual previene el estreñimiento en el cuerpo humano.

12.3.2. Tipos de fibras

12.3.2.1. Fibras insolubles

Las fibras insolubles, como las celulosas, ligninas y hemicelulosas, son compuestos que proporcionan estructura a la pared celular del cladodio y desempeñan un papel esencial en la salud digestiva. Estas fibras contribuyen a la regulación de la función intestinal, ayudan a mantener un pH adecuado en el colon

y participan en la prevención de alteraciones gastrointestinales (Caminiti et al., 2024).

Cabe destacar que no todas las fibras insolubles actúan de la misma manera en el organismo, ya que esto depende de la estructura particular de cada fibra, según mencionan Zhong et al., 2019). A diferencia de las fibras solubles, algunas fibras insolubles presentan baja viscosidad, digestibilidad y poca fermentabilidad en el colon, debido a que cumplen una función mecánica en el intestino, actuando como reguladoras del tránsito intestinal.

12.3.2.2. Fibras solubles

Las fibras solubles, como las pectinas, mucílagos y algunos tipos de hemicelulosas, presentan la capacidad de interactuar con el agua, formando soluciones viscosas que desempeñan funciones fisiológicas importantes. Entre sus beneficios destacan la modulación de la absorción de glucosa y la reducción de lípidos y colesterol en sangre, contribuyendo así a la prevención de enfermedades metabólicas (Caminiti et al., 2024).

Este compuesto se encuentra en mayor proporción en cladodios jóvenes en comparación con aquellos de mayor madurez, debido a que en las etapas tempranas los tejidos del cladodio requieren una mayor retención de agua, así como una flexibilidad estructural adecuada para el desarrollo de la planta (Mendoza-Ávila et al., 2020).

12.3.2.3. Obtención de fibra dietética

La obtención de fibra dietética a partir de los cladodios de nopal ha tenido un gran impacto en la actualidad debido a su valor nutracéutico, así como a sus aplicaciones en la industria. Los métodos empleados para su extracción incluyen procedimientos físicos, químicos y enzimáticos para la obtención de dicho compuesto, ya que existen diferentes investigaciones que aplican diversos métodos para obtener resultados de fibra dietética.

Arias-Rico et al., (2020) Aplicaron el método enzimático-gravimétrico, el cual implica el uso de enzimas (α -amilasas, proteasas y amilogucosidasas) para

determinar la fibra dietética total en polvos de xoconostle (*Opuntia* spp.). Dicho procedimiento permitió cuantificar tanto la fibra dietética soluble (FDS) como la fibra dietética insoluble (FDI), obteniendo un valor favorable de fibra dietética total (FDT). De manera complementaria, (Caminiti et al., 2024), emplearon técnicas que aplican pretratamientos con NaOH o peróxido de hidrógeno en cladodios de *Opuntia ficus-indica* en polvo, mostrando que representan una fuente importante de fibra.

12.3.3. Aplicaciones en la industria

La fibra, presente en diversos alimentos, posee variadas aplicaciones en las industrias farmacéutica, nutracéutica y alimentaria. En los últimos años se ha observado un incremento en la producción de alimentos con alto contenido de fibra para consumo humano, otorgándole un valor agregado a este compuesto, el cual anteriormente era utilizado principalmente en la elaboración de alimentos balanceados.

Los alimentos producidos a partir de este compuesto están dirigidos a prevenir problemas de constipación, como cereales y medicamentos. Asimismo, existen productos diseñados para disminuir el peso corporal, como polvos hidratables, panes, barras energéticas y galletas ricas en fibra, entre otros alimentos dentro de la alimentación funcional. Badui,(2006).

12.3.4. Procesamiento de fibras vegetales

El procesamiento de las fibras vegetales, o bien de los polvos, busca conservar su composición química y funcionalidad, con la finalidad de que puedan ser incorporados en alimentos o productos farmacéuticos, permitiendo mejorar sus propiedades nutricionales y tecnológicas.

Entre los métodos más empleados destacan el secado y la molienda, los cuales consisten en eliminar la mayor cantidad de agua presente en el alimento, además de reducir el tamaño de partícula, quedando más expuestos los compuestos solubles. Lo anterior es mencionado por Razzak et al., (2024), quienes realizaron un estudio con polvos de cladodios (*O ficus indica*) de diferentes distribuciones geográficas de Marruecos, a los cuales se les aplicó un tratamiento

de desinfección y procesamiento de secado para obtener el polvo de dicho alimento, así como diferentes análisis que avalaran sus características nutricionales y funcionales.

12.3.5. Estándares de calidad de la fibra dietética

Los estándares de calidad son métodos analíticos estandarizados que permiten evaluar la calidad de un producto alimenticio. Uno de los procedimientos más reconocidos es el método enzimático-gravimétrico (AOAC 985.29), según menciona McCleary, (2023) , quien explica que dicho procedimiento consiste en cuantificar el contenido de fibra soluble e insoluble, siendo uno de los métodos más rápidos.

Otros aspectos que se toman en cuenta para determinar la calidad son humedad, pureza y capacidad funcional, entre otros. Esto se muestra en la investigación de Nabil et al., (2020), quienes aplicaron parámetros como humedad y capacidad antioxidante, entre otros, para determinar si existía variabilidad en cuanto al tamaño de partícula del polvo de cladodio de nopal, comprobando cambios en la composición química y en los compuestos bioactivos según los diferentes tamaños del polvo.

12.4. Procesos de deshidratación

La deshidratación constituye una etapa crítica en la conservación de los alimentos, la cual tiene como objetivo disminuir la humedad presente en las muestras a un nivel seguro con la finalidad de almacenarlas, generalmente a valores inferiores al 10 %. Esta reducción de agua libre permite limitar el riesgo de afectar su estabilidad química, física y microbiana, garantizando la conservación del producto durante periodos prolongados.

La calidad del proceso de deshidratación depende de la capacidad de eliminar el contenido de humedad de manera rápida, uniforme y eficiente, evitando daños en los componentes sensibles, así como en su microestructura, según mencionan (Ren et al., 2022).

Aunado a lo mencionado anteriormente Mari et al., (2024) mencionan que la industria alimentaria ha buscado alternativas orientadas a prolongar la vida útil de los alimentos y asegurar su calidad final. Para ello, se han empleado métodos como la deshidratación y el secado, los cuales tienen como propósito reducir el contenido de humedad por debajo del límite establecido, así como obtener características adecuadas que demuestran la importancia de deshidratar los alimentos.

12.4.1. Secado

El secado constituye un proceso complejo y fundamental en la industria, el cual implica una serie de transformaciones nutricionales, fisicoquímicas, funcionales y sensoriales en la materia alimenticia, además de contribuir a su preservación y estabilidad.

Según Li et al., (2020), Menciona que el secado se define como un proceso de eliminación del contenido de humedad mediante la transferencia homogénea de calor en la materia, en el cual el agua se transporta desde el interior hacia la superficie del alimento, donde se produce la evaporación en la interfase líquido-vapor para transformarse en estado gaseoso.

Una de las principales ventajas de este proceso, según menciona el mismo autor, es eliminar la mayor cantidad de agua presente en el alimento lo más rápido posible, procurando minimizar los efectos adversos sobre las propiedades nutricionales, físicas y organolépticas del alimento.

Por lo tanto, el proceso de secado es una de las mejores alternativas utilizadas en la industria alimentaria para conservar alimentos altamente perecederos, dando lugar a la elaboración de productos deshidratados con gran relevancia por sus múltiples ventajas tecnológicas, compactidad y mayor vida útil. Además, ofrece ventajas industriales significativas, tales como bajos costos de envasado, transporte y almacenamiento, así como una mejor resistencia al deterioro microbiano, en comparación con diferentes métodos de conservación. (Minuye et al., 2024).

Este proceso resulta eficaz cuando la actividad de agua (a_w) desciende por debajo de 0.3, límite que inhibe el crecimiento microbiano. Dependiendo del método

de eliminación de agua, existen diferentes tipos de procesos de secado, como secados térmicos, deshidratación osmótica y deshidratación mecánica.

En la actualidad, los métodos térmicos son los más utilizados en la industria alimentaria, incluyendo el secado al aire, ya sea a temperatura ambiente o a elevadas temperaturas, secado en ambientes de bajo aire o secados en atmósferas modificadas. Asimismo, en la industria alimentaria se emplean métodos avanzados como el secado por aspersión, liofilización, deshidratación osmótica y secado convectivo.

No obstante, como señala (Ángel et al., 2021), estos métodos no están exentos de presentar algunos inconvenientes. Por esta razón, las investigaciones recientes se han orientado a optimizar los parámetros de secado con el fin de minimizar estos efectos negativos en los productos deshidratados.

12.4.1.1. Secado convectivo

El secado por convección es uno de los procesos más utilizados en la conservación de alimentos perecederos en la industria, debido a la eficiencia de los equipos empleados, los cuales permiten altas tasas de eliminación de humedad y una notable reducción de los tiempos de secado en comparación con otros procesos, como secado por infrarrojo, microondas y solar, entre otros (Gómez-de la Cruz et al., 2023).

Este proceso es fundamental para la eliminación de la materia acuosa entre los tejidos celulares del alimento mediante la transferencia de calor y masa por convección, la cual se produce simultáneamente entre el producto y el aire de secado. Dicha interacción ocasiona el movimiento de las moléculas de agua por efecto de la presión de vapor en el interior del producto, reduciendo el contenido de humedad y la actividad de agua (a_w). Este efecto contribuye a una mayor vida útil del alimento final.

La eficiencia de esta técnica de secado por convección depende de diversos factores operativos y estructurales, entre ellos la temperatura, velocidad de flujo, humedad relativa, así como las características físicas del producto (porosidad, tamaño, forma, entre otros) (Chaves et al., 2023).

Durante este proceso se pueden distinguir diferentes etapas características representadas en la curva de velocidad de secado (figura 10), las cuales corresponden a:

- **A:** periodo de adaptación.
- **B:** periodo de velocidad constante.
- **C:** contenido de humedad crítico.
- **D:** periodo de velocidad decreciente.

Según Beltran, (2022), Se explica que, en la primera etapa (A, B), se produce un aumento gradual de la temperatura entre el alimento y el agua contenida en él. Posteriormente, en la etapa (B, C), el contenido de humedad disminuye de manera significativa y constante, manteniendo una temperatura uniforme en el alimento.

Una vez alcanzado el punto crítico de humedad (C), como se muestra en la figura 10, el proceso entra en un cambio de fase de estado, en el cual el contenido de agua libre disminuye rápidamente con el tiempo. Finalmente, en la etapa (E, C), la velocidad de secado decrece debido a que la humedad restante se encuentra fuertemente ligada a los componentes del alimento; por tanto, su eliminación requiere tiempos prolongados y una mayor cantidad de energía.

Por lo tanto, el secado convectivo constituye una alternativa tecnológica eficiente y económica para la preservación de productos agroalimentarios, siempre y cuando los parámetros de operación sean controlados adecuadamente para evitar el deterioro estructural y la pérdida de compuestos bioactivos.

Su comprensión detallada a través de la curva de velocidad de secado (figura 10) permite optimizar el proceso, garantizando una calidad final homogénea y estable del alimento.



Figura 10. Curva típica de rapidez de secado.

Obtenida: (Beltran, 2022)

13. Planteamiento del problema

El nopal (*Opuntia spp.*) ha sido uno de los alimentos consumidos en América del Norte y Centroamérica, por ser reconocido como una planta con beneficios nutricionales y funcionales para el cuerpo humano, además de ser utilizado en dietas para bajar de peso en México (Cruz-rubio et al., 2021).

Este alimento presenta un alto contenido de fibra soluble presente en una solución viscosa llamada mucílago, considerada una fibra presente en la materia seca e incorporada en la industria alimentaria por sus propiedades bioactivas. En la actualidad, ha recibido gran atención la composición química y fisicoquímica de los diversos polvos de nopal; sin embargo, existe una falta significativa de literatura científica en cuanto a su caracterización química y fisicoquímica, generando un vacío de conocimiento para la comprensión integral de las propiedades que aportan estos polvos.

El problema central radica en la falta de información sobre la caracterización de los diversos polvos de nopal, los cuales pueden verse influenciados por la variabilidad de las condiciones de cultivo, las diferentes especies de *Opuntia* o los métodos de procesamiento, otorgando características distintas a las esperadas en este alimento. Esto limitaría la identificación de los polvos de nopal más prometedores para aplicaciones en la industria alimentaria u otros sectores.

14. Justificación

Se propone llevar a cabo una exhaustiva caracterización de la composición química y fisicoquímica de los diversos polvos de nopal. Este enfoque surge de la necesidad de obtener información detallada sobre los componentes de estos polvos y establecer estándares para su diversidad, con el propósito de realizar comparaciones entre aquellos obtenidos de forma natural y los sometidos a procesos industriales.

El objetivo es contribuir a la caracterización química y fisicoquímica de los diferentes polvos de nopal, asegurando la coherencia y calidad de los productos resultantes. Además, se busca identificar posibles variaciones en la composición de los polvos, analizando factores como las condiciones de proceso.

Asimismo, se considerará la diversidad entre especies de nopal, reconociendo que cada una posee características únicas que pueden reflejarse en la composición de los polvos. Además, se examinarán los distintos métodos de procesamiento a los que son sometidos estos polvos, evaluando cómo dichos métodos pueden conferir propiedades específicas o distintivas, impactando en su composición final, especialmente durante los procesos de secado y molienda, los cuales permiten pulverizar y obtener el polvo de nopal.

15. Objetivo genral

- Caracterizar las propiedades de los diversos polvos comerciales, así como del cladodio de nopal (*Opuntia ficus indica* y *Opuntia robusta*).

15.1. Objetivos específicos

- Recolectar los diferentes polvos de fuentes comerciales, así como del cultivo de nopal en diferente estado de madurez.
- Deshidratar el nopal para obtención del polvo con parámetros de alta calidad.
- Evaluar los componentes nutricionales y de carbohidratos de los diversos polvos de nopal.
- Caracterizar con parámetros fisicoquímicos de los diversos polvos para definir su comportamiento reológico.
- Analizar y comparar los datos obtenido de los diversos polvos de nopal.

16. Hipótesis

Existe diferencias entre los polvos comerciales y polvos naturales del cladodio de nopal.

17. Metodologías

17.1. Materia prima

Los cladodios de *Opuntia ficus indica* y *Opuntia robusta* empleados para esta investigación, se recolectaron en los estado de Aguascalientes y Zacatecas en el Instituto Tecnológico el Llano de Aguascalientes ITEL y Zacatecas, México. En abril del 2024 se realizaron cosechas del cladodio de diferentes estados de madurez (15 días, 3 días, 365 días). Los cladodios colectados se sometieron a un proceso de lavado con agua potable y desinfección con hipoclorito de sodio a una concentración de 4 – 6% sumergidos por un periodo de 5 minutos. Después del proceso de lavado y desinfección, los cladodios se procesaron en un secador convectivo para la obtención de harina, la harina fue almacenada hasta su posterior uso.

17.2. Diseño experimental

Para la presente investigación se empleó un diseño experimental factorial completamente al azar de $2 \times 2 \times 3$, considerando como factores el tipo de especie de nopal (*Opuntia ficus-indica* y *Opuntia robusta*), dos temperaturas de secado (60 °C y 80 °C) con un tiempo constante de 10 horas, y tres estados de madurez del cladodio (15, 30 y 365 días). En total se establecieron 12 tratamientos, cada uno con tres repeticiones, con la finalidad de optimizar el proceso de secado del nopal y evaluar el efecto de las variables sobre las características del producto obtenido.

17.3. Evaluación morfológica de los cladodios

La evaluación morfológica consistió en la determinación de las características físicas de los cladodios, con la finalidad de evaluar sus dimensiones y variaciones estructurales entre especies y estados de madurez. Para ello, se midió longitud, ancho y grosor de los cladodios recolectados. Las mediciones se realizaron utilizando un Vernier marca Pretul. Los datos obtenidos fueron registrados en tablas de análisis, considerando la especie de nopal y el estado de madurez correspondiente a cada muestra.

17.4. Determinación de cinética de secado del nopal

El comportamiento cinético se determinó mediante la metodología propuesta por (Becerá et al., 2013), con ligeras modificaciones. Se estableció una duración del proceso de secado en un intervalo de 22 horas.

Pérdida de Peso: se calculó mediante la diferencia de peso entre el inicial del vegetal fresco y el final del vegetal deshidratado. Se utilizó una báscula marca OHAUS, serie 0007222-6EB (OHAUS CORPORATION, Florham Park, NJ, USA). Por último, se obtuvo la diferencia de peso mediante la siguiente fórmula.

Formula 1:

$$P_p = M_i - M_f$$

Donde:

P_p = Pérdida de peso.

M_i = Masa inicial del vegetal fresco kg.

M_f = Masa final del vegetal deshidratado kg.

Contenido de humedad: el contenido de humedad se determinó mediante una termobalanza (Precisa Instruments 300), serie 58258 (Switzerland), la cual arrojó el contenido de humedad perdida y la humedad de la materia seca.

Velocidad de secado: la velocidad de secado se determinó mediante la siguiente fórmula:

Formula 2:

$$dAw / (dt) = (H_f - H_i) / (At)$$

Donde:

dAw / dt = velocidad de secado g H₂O/ min

H_i = peso inicial g.

H_f = peso final g.

Los resultados obtenidos se plasmaron en una gráfica correspondiente a la pérdida de humedad y velocidad de secado, determinando el tiempo de deshidratación.

17.4.1. Secado convectivo

El secado convectivo se llevó a cabo mediante la metodología propuesta por (Beltran, 2022), utilizando un secador de charolas (POLINOX S.A.), serie TABIM094 (Iztacalco, México). Se tomaron 1.0 kg de cladodios de nopal (*O. ficus-indica* y *O. robusta*) previamente desinfectados y secados con toallas de papel, posteriormente se cortaron en tiras a lo largo. Las muestras se colocaron en charolas de acero inoxidable con orificios de 1 × 1 cm y se llevaron al horno de secado a diferentes temperaturas (60 °C y 80 °C), considerando las diferentes especies y estados de madurez, tomando previamente los pesos iniciales de las muestras frescas. Al finalizar el proceso, se registraron los pesos finales, determinando el rendimiento de la muestra inicial y final.

Posteriormente, las muestras se llevaron a un molino (MF 10 Basic S1), serie D-79219 (QuímiLab S.A., Guadalajara, México), obteniendo el polvo, el cual se almacenó en bolsas herméticas de plástico para los análisis posteriores.

17.5. Extracción de mucílago

La obtención de mucílago a partir del polvo de los cladodios se llevó a cabo utilizando la metodología propuesta por (Reyes Escogido et al., 2023), con ciertas adaptaciones. Se empleó nopal deshidratado previamente reducido de tamaño, el cual se depositó en un microtubo de 1 mL. Se añadió una proporción 1:2 p/v (polvo:agua), colocándose en un baño María marca Lab Companion, serie BW-10G (QuímiLab S.A., Guadalajara, México), a 80 °C durante 2 h. Posteriormente, se enfrió a temperatura ambiente y después se colocó en una centrífuga (HWLAB), serie 1044810 (China), a 11000 rpm durante 10 min. A continuación, se colocaron 250 µL de mucílago en un microtubo con etanol al 95 % para precipitar el mucílago, utilizando tres volúmenes de etanol y manteniéndose a 4 °C durante la noche.

Finalmente, se obtuvo el mucílago, el cual se secó a 45 °C en un horno de secado (Novatech), serie HS35-ED (Tlaquepaque, Jalisco, México). Posteriormente, se calculó el rendimiento obtenido mediante la siguiente fórmula y se almacenó en bolsas herméticas para sus análisis posteriores.

Formula 3:

$$Rendimiento = \frac{\text{Peso de la muestra seca}}{\text{Peso de la muestra fresca}} * 100$$

17.6. Metodología química

17.6.1. Análisis proximales

17.6.1.1. Determinación de humedad

La determinación de humedad se realizó mediante el método planteado en la Norma Oficial Mexicana (NOM-116-SSA1-1994, 1994). De manera breve, se pesó 1.0 g de muestra (previa reducción de tamaño) y se colocó en cajas Petri. Las cajas con las muestras se introdujeron en un horno de secado (Novatech), serie HS35-ED (Tlaquepaque, Jalisco, México), a una temperatura de 110 °C hasta obtener un peso constante. Finalmente, se realizaron los cálculos del contenido de humedad, expresado en porcentaje, mediante la siguiente fórmula:

Formula 3:

$$\% Humedad = \frac{M2 - M3}{M2 - M1} * 100$$

Donde:

M1= Peso de la caja (g).

M2= Peso de la muestra humedad (g).

M3= Peso de la caja con muestra seca (g).

17.6.1.2. Determinación de cenizas

La determinación de cenizas se realizó mediante el método planteado en la Norma Oficial Mexicana (NMX-F-066-S-1978, 1998). Se tomó 1.0 g de muestra (previa reducción de tamaño) y se colocó en una cápsula de porcelana. Posteriormente, las muestras se llevaron al mechero para su calcinación. Después, se introdujeron en una mufla (Novatech), serie MD-12 (Tlaquepaque, Jalisco, México), a una temperatura de 550 °C durante 24 h. Finalmente, se extrajeron los crisoles con la muestra incinerada y se realizaron los cálculos del contenido de cenizas, expresado en porcentaje, mediante la siguiente fórmula:

Formula 4:

$$\% \text{ Cenizas} = \frac{(P - p)}{M} * 100$$

Donde:

P= Masa del crisol con las cenizas (g).

p= Masa del crisol vacío (g).

M= Masa de la muestra (g).

17.6.1.3. Determinación de lípidos

La determinación de lípidos se realizó mediante el método Soxhlet, planteado en la Norma Oficial Mexicana (NMX-F-089-S-1978, 1978). Se tomaron 1.0 g de muestra (proceso de fibra), las cuales se envolvieron en papel filtro y posteriormente se colocaron en un cartucho de extracción de celulosa. El cartucho se introdujo en un horno de secado (Novatech), serie HS35-ED (Tlaquepaque, Jalisco, México), durante 2 h. Posteriormente, se colocó en el extractor de grasas (J.P. Selecta), serie 650383 (Barcelona, España), añadiendo 50 mL de solvente (éter de petróleo), donde se realizó la descarga en vasos de aluminio.

El proceso se llevó a una temperatura de 100 °C a 135 °C, con los siguientes ciclos: 40 min de boiling, 30 min de rinsing y 5 min de recuperación del solvente. Finalmente, se obtuvieron los cálculos correspondientes del contenido de extracto etéreo, expresados en porcentaje, mediante la siguiente fórmula.

Formula 5:

$$\% \text{ de extracto etereo} = \frac{(P - p)}{M} * 100$$

Donde:

P= Masa del matraz con grasas (g).

p= Masa del matraz sin grasa (g).

M= Masa de la muestra (g).

17.6.1.4. Carbohidratos

17.6.1.4.1. Cuantificación de azúcares reductores por DNS

La cuantificación de azúcares reductores por DNS se determinó mediante el método planteado por MILLER, G. (1959), (Núñez Ávila et al., 2012), (Ribeiro et al., 2015). Se preparó una curva de calibración en función de diferentes concentraciones de una solución de D-glucosa. Por otra parte, para llevar a cabo este método se preparó el reactivo DNS disolviendo en agua destilada tartrato de sodio y potasio, hidróxido de sodio 2 M y ácido 3,5-dinitrosalicílico. Se tomaron 62.5 µL de muestra de mucílago, los cuales se colocaron en microtubos junto con 62.5 µL del reactivo. Posteriormente, se colocaron en baño María (Lab. Companion), serie BW-10G (QuímiLab S.A., Guadalajara, México), a 100 °C durante 10 min y después se dejaron en un baño frío con hielo durante 10 min.

Finalmente, se agregaron 650 µL de agua destilada, dejándose enfriar a temperatura ambiente durante 15 min. Posteriormente, se realizó la lectura en un espectrofotómetro (BioTek), serie 1306194 (BioTek Instruments Inc., Highland Park, USA), a 540 nm, obteniendo los resultados mediante la curva de calibración. Asimismo, las muestras se hidrolizaron con H₂SO₄ 2.5 N y se neutralizaron con NaOH al 20 %.

17.6.1.4.2. TLC

El análisis cualitativo de la composición de los monosacáridos presentes en los polvos de nopal se realizó mediante la metodología propuesta por (Garfias Silva et al., 2022), utilizando cromatografía de capa fina. Para la hidrólisis del polvo, se

tomó 0.1 g de muestra seca, a la cual se le agregaron 1.5 mL de H₂SO₄ 2.5 N en un tubo Falcon, dejándose reposar durante 2 h a 80 °C. Pasado este tiempo, las muestras se enfriaron en baño de hielo para evitar la degradación de la capa de sílice.

Para el análisis por TLC, se prepararon los monosacáridos estándar disolviendo 0.01 g en 1 mL de H₂SO₄ 2.5 N. Posteriormente, se depositó 1 µL sobre placas de sílice (aluminum support silica gel 60 matrix 20 cm × 20 cm) marca Merck, tanto de los estándares como de cada una de las muestras hidrolizadas.

La fase móvil utilizada para el análisis fue n-butanol, ácido acético y agua destilada en una proporción 5:2.5:2.5. Las placas se revelaron con una solución de H₂SO₄ al 2 % con EtOH/agua en proporción 1:1, finalizando con un calentamiento a 110 °C en un horno de secado (Novatech), serie HS35-ED (Tlaquepaque, Jalisco, México), durante 15 min. Finalmente, los resultados se obtuvieron mediante la fórmula de R_f.

Fórmula 6:

$$R_f = \frac{X}{Y}$$

Donde:

X= distancia recorrida por el compuesto

Y= distancia recorrida por el eluyente

17.7. Metodologías fitoquímicas

17.7.1. Extractos

La preparación de los extractos de los polvos de nopal de los tratamientos, así como de las marcas comerciales, se realizó mediante la metodología propuesta por (Soria-Melgarejo et al., 2024). Se pesaron 0.0625 g de polvo y se mezclaron con 2.5 mL de metanol al 60 % en frascos de vidrio. Posteriormente, las muestras se colocaron en un agitador orbital (Luzeren), serie 19060601, durante 24 h en ausencia de luz. Posteriormente, los extractos se centrifugaron a 10000 rpm en una

centrífuga (HWLAB), serie 1044810 (China), obteniendo el sobrenadante para realizar los análisis posteriores de polifenoles, flavonoides y capacidad antioxidante.

17.7.2. Cuantificación de polifenoles

La cuantificación de polifenoles se realizó mediante la metodología propuesta por (L. E. P. da Silva et al., 2024), utilizando el método de Folin-Ciocalteu (Singleton et al., 1999) con algunas modificaciones. Se adicionaron en un microtubo agua destilada fría, extracto previamente preparado, Na_2CO_3 al 7.5 % y reactivo de Folin 1 N en proporción 1:1. La mezcla se incubó a 50 °C en un baño María (Lab. Companion), serie BW-10G (QuímiLab S.A., Guadalajara, México), durante 30 min. Después del tiempo de incubación, se colocaron 250 μL de la mezcla en una microplaca, realizando la lectura a 630 nm en un espectrofotómetro (BioTek), serie 1306194 (BioTek Instruments Inc., Highland Park, USA), obteniendo los resultados mediante la curva de calibración.

17.7.3. Cuantificación de flavonoides

La cuantificación de flavonoides se realizó mediante la metodología propuesta por (Pérez-Viveros et al., 2024). Se colocaron metanol y AlCl_3 al 10 % en una microplaca, manteniéndose en ausencia de luz durante 3 min de reposo. Pasado este tiempo, se agregó CH_3COONa 1 M, metanol absoluto y el extracto, el cual se dejó reposar durante 40 min en ausencia de luz. Finalmente, se realizó la lectura en un espectrofotómetro (BioTek), serie 1306194 (BioTek Instruments Inc., Highland Park, USA), a 430 nm, obteniendo los resultados mediante una curva de calibración.

17.7.4. Capacidad antioxidante.

17.7.4.1. ABTS

La capacidad antioxidante mediante el método ABTS se realizó utilizando la metodología propuesta por Marques de Farias et al., (2021). Se preparó el radical ABTS disolviéndolo en agua destilada y persulfato de potasio (APS), dejándose en

reposo durante 12 h. Posteriormente, el radical se ajustó con etanol absoluto hasta obtener una absorbancia de 0.75 nm. Enseguida, se colocaron 230 µL del radical y 20 µL del extracto en una microplaca, dejándose reposar durante 20 min en ausencia de luz. Posteriormente, se realizó la lectura en un espectrofotómetro (BioTek), serie 1306194 (BioTek Instruments Inc., Highland Park, USA), a 630 nm. Finalmente, se realizó el cálculo del porcentaje de inhibición mediante la fórmula 6.

17.7.4.2. DPPH

La determinación de la capacidad antioxidante mediante el método DPPH se realizó utilizando la metodología propuesta por Brand-Williams et al., (1995). Se preparó el radical DPPH disolviéndolo en metanol absoluto y ajustándolo hasta obtener una absorbancia de 0.75 nm. Posteriormente, se colocaron 230 µL del radical y 20 µL del extracto en una microplaca, dejándose reposar durante 30 min en ausencia de luz. Después, se realizó la lectura en un espectrofotómetro (BioTek), serie 1306194 (BioTek Instruments Inc., Highland Park, USA), a 490 nm. Finalmente, se realizó el cálculo del porcentaje de inhibición mediante la siguiente fórmula

Formula 6:

$$\% \text{ inhibicion del radical } \frac{A_{\text{inicial}} - A_{\text{final}}}{A_{\text{inicial}}} * 100$$

Donde:

A inicial = absorbancia inicial del radical

A final = Absorbancia del antioxidante

17.8. Metodologías fisicoquímicas

17.8.1. Solubilidad

La solubilidad se realizó mediante la metodología propuesta por (Ayadi et al., 2009), con modificaciones en el proceso. Se pesó 1.0 g de polvo de nopal previamente reducido de tamaño, el cual se colocó en frascos de vidrio con tapadera. Posteriormente, se homogenizó con 20 mL de agua destilada. Las

muestras se colocaron en agitación a 120 rpm durante 24 h a 25 °C en un agitador orbital (Luzeren), serie 19060601. Finalmente, las fracciones desintegradas se pasaron por papel filtro y se secaron a 105 °C en un horno de secado (Novatech), serie HS35-ED (Tlaquepaque, Jalisco, México), durante 24 h. Los resultados de solubilidad se expresaron en porcentaje mediante la siguiente fórmula:.

Formula 7:

$$\% \text{ solubilidad} = \frac{MS}{MSD} * 100$$

Donde

MS= material seco (g).

MSD= Material seco desintegrado (g).

17.8.2. Densidad

La densidad del nopal previamente reducido de tamaño se determinó mediante la metodología descrita por (León-Martínez et al., 2010). Se tomaron 0.3 g de muestra en una balanza analítica, los cuales se colocaron en un microtubo de 1 mL. Posteriormente, el microtubo se golpeó hasta que la muestra se sedimentó a un volumen de 0.5 mL. Finalmente, se registró el peso del volumen y se utilizó la fórmula correspondiente para obtener el resultado.

Formula 10:

$$P = \frac{m}{v}$$

Donde:

P = densidad (g/mL).

m= Masa en (g).

V= volumen (mL).

17.8.3. Viscosidad

La determinación de la viscosidad del polvo de nopal (fibra de nopal molida) se realizará mediante las metodologías propuestas por (Medina-Torres et al., 2011)

y (Olicón-Hernández et al., 2019), con ligeras modificaciones. En un tubo de 50 mL se agregaron 40 mL de agua destilada y 1.2 g de muestra. Posteriormente, se utilizó un viscosímetro marca J.P. Selecta, serie 652490 (Autovía A-2 km 585.1, Abrera, Barcelona, España). Enseguida, se colocó el husillo a una velocidad determinada, de acuerdo con las instrucciones del manual, colocando los 40 mL de muestra y sumergiendo el eje del viscosímetro, centrando la muestra hasta mantener una lectura estable. La determinación de viscosidad se obtuvo mediante las especificaciones descritas en el manual. El análisis se realizó por triplicado y los resultados se expresaron en centipoises (cP).

17.8.4. Determinación de color

La medición del color se realizó mediante la metodología propuesta por (Ayadi et al., 2009), (Ruiz-Gutiérrez et al., 2017) y (Cervantes et al., 2016), utilizando un colorímetro (FRU WR10QC), serie 10QC230332 (China), el cual se calibró con un objeto de color blanco. Se colocaron 5.0 g de polvo de nopal previamente reducido de tamaño en cajas Petri. Posteriormente, se tomó la lectura con el colorímetro mediante el haz de luz, obteniendo los valores de L^* , a^* y b^* de las muestras.

Finalmente, se determinaron el ángulo de tono (Hue) y el croma con ayuda de las siguientes fórmulas:

Formula 8:

$$Hue = Tan^{-1}\left(\frac{b^*}{a^*}\right)$$

Formula 9:

$$Croma = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2}$$

Donde:

L^* = luminosidad

a^* = coordenadas rojo - verde

b^* = coordenadas amarillo – azul

17.8.5. Temperatura de transición vítrea

La medición de la temperatura de transición vítrea T_g del polvo de nopal se determinará mediante el método descrito por (León-Martínez et al., 2010), utilizando calorimetría diferencial de barrido (DSC 3) en un calorímetro marca Mettler Toledo, serie C247299603 (Col. del Valle, Ciudad de México). Se tomarán 8mg de muestra de polvo de nopal previamente reducida de tamaño, la cual se colocará en una celda de aluminio (Mettler Toledo). El análisis se realizará en un intervalo de temperatura de 30 a 400 °C, a una velocidad de 10.00 K/min y con flujo de N_2 de 5.0 mL/min. Finalmente, se obtendrá la gráfica correspondiente con los datos obtenidos.

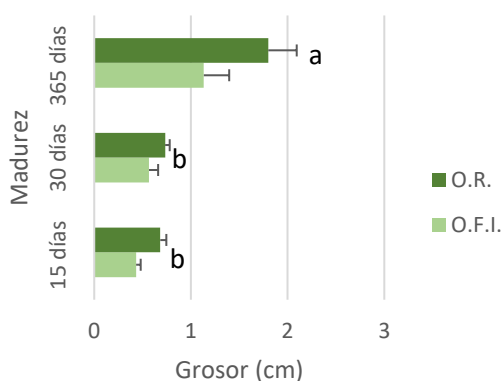
17.9. Análisis estadístico

Los resultados de los diferentes análisis se presentan como medias $\pm$ desviación estándar, donde cada análisis se realizó por triplicado. La base de datos obtenida de los diferentes ensayos se analizó estadísticamente mediante un análisis ANOVA, seguido de una prueba de comparaciones de Tukey ($p < 0.05$), utilizando el software Minitab 19.

18. Resultados y discusión

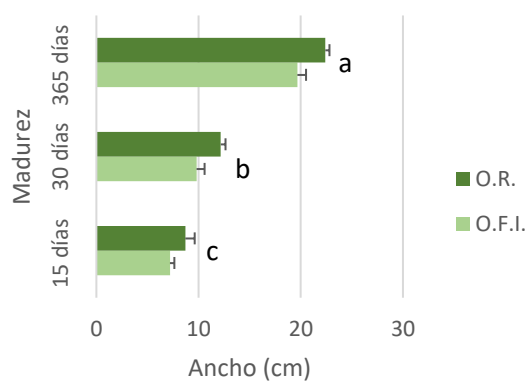
18.1. Evaluación morfológica de los cladodios

Los resultados obtenidos muestran los valores promedio de cada una de las mediciones realizadas. Se observó un incremento progresivo en el grosor (Gráfica 1) conforme avanzó el tiempo de madurez, demostrando diferencias significativas en los cladodios de 365 días, cuyos valores oscilaron entre 1.133 y 1.800 cm, en comparación con los de 15 y 30 días, que presentaron valores de 0.433 a 0.733 cm, sin diferencias estadísticas entre sí. En todas las etapas evaluadas, la especie *O. robusta* presentó un grosor superior al de *O. ficus-indica*. En cuanto al ancho (Gráfica 2), se observó una tendencia similar, con un aumento progresivo conforme incrementó la madurez. Las diferencias significativas fueron más notorias en el estado de 365 días, destacando *O. robusta* en esta medición, ya que presentó valores más altos, con un promedio de 23 cm, en comparación con *O. ficus-indica*, con un promedio de 21 cm. En general, los cladodios de ambas especies a los 365 días de madurez mostraron mayores dimensiones en grosor y ancho.



Gráfica 1. Variación del grosor (Cm) de los cladodios de *Opuntia ficus-indica* y *Opuntia robusta* en diferentes estados de madurez (15 días, 30 días y 365 días).

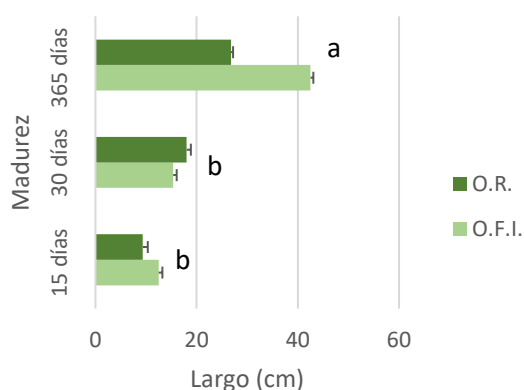
O.F.I.: *Opuntia ficus indica*; O.R.: *Opuntia robusta*; a, b- en las barras, las diferentes letras indican la diferencias significativas entre las muestras a $p < 0.05$ mediante una prueba de Tukey.



Gráfica 2. Variación del ancho (Cm) de los cladodios de *Opuntia ficus-indica* y *Opuntia robusta* en diferentes estados de madurez (15 días, 30 días y 365 días).

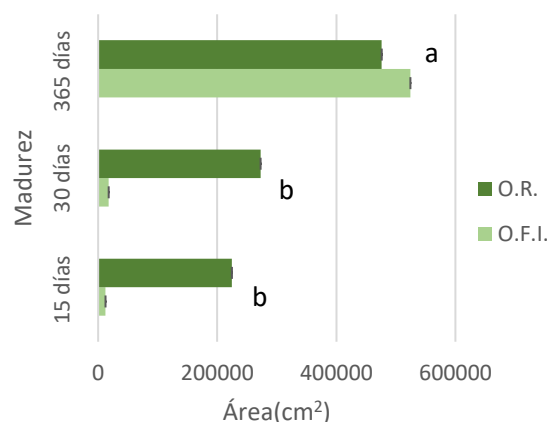
O.F.I.: *Opuntia ficus indica*; O.R.: *Opuntia robusta*; a, b, c- en las barras, las diferentes letras indican la diferencias significativas entre las muestras a $p < 0.05$ mediante una prueba de Tukey.

En la gráfica 3 se observa que el largo de los cladodios aumentó significativamente con el tiempo de madurez de ambas especies (O.R. y O.F.I.). A los 15 y 30 días presentaron los valores más bajos de longitud, mientras que a los 365 días alcanzaron los valores más altos. En general, O.F.I. mostró cladodios ligeramente más largos en las diferentes etapas de madurez, en comparación con O.R. La diferencia fue más notoria a los 365 días, donde O.F.I. presentó un promedio de 42 cm, mientras que O.R. presentó un promedio de 26 cm. Por su parte, en la gráfica 4 se aprecia un incremento progresivo en el área de los cladodios conforme avanzó la madurez. En las etapas iniciales (15 y 30 días), O.R. presentó valores ligeramente superiores a O.F.I.; sin embargo, a los 365 días esta tendencia se invirtió, observándose que O.F.I. rebasó el valor de 524000 cm² frente a O.R., con 476000 cm².



Gráfica 3. Variación del largo (Cm) de los cladodios de *Opuntia ficus-indica* y *Opuntia robusta* en diferentes estados de madurez (15 días, 30 días y 365 días).

O.F.I.: *Opuntia ficus indica*; O.R.: *Opuntia robusta*; a, b- en las barras, las diferentes letras indican la diferencias significativas entre las muestras a $p < 0.05$ mediante una prueba de Tukey.

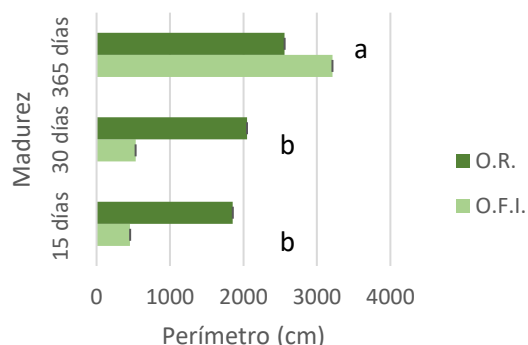


Gráfica 4. Variación del área (Cm²) de los cladodios de *Opuntia ficus-indica* y *Opuntia robusta* en diferentes estados de madurez (15 días, 30 días y 365 días).

O.F.I.: *Opuntia ficus indica*; O.R.: *Opuntia robusta*; a, b- en las barras, las diferentes letras indican la diferencias significativas entre las muestras a $p < 0.05$ mediante una prueba de Tukey.

Finalmente, en la gráfica 5 se observa que el perímetro de los cladodios de las diferentes especies aumentó significativamente con el avance de la madurez. A los 15 y 30 días no se registraron diferencias significativas entre los tratamientos, lo que indica un comportamiento similar en las etapas tempranas de desarrollo. Sin embargo, a los 365 días esta medición incrementó de manera notable, alcanzando

valores más altos en comparación con las etapas previas. Entre las especies, se observó que O.F.I. presentó un perímetro superior, con un promedio de 3200 cm, respecto a O.R., que alcanzó un promedio de 2500 cm en el estado de madurez de 365 días.



Grafica 5. Variación del perímetro (Cm) de los cladodios de *Opuntia ficus-indica* y *Opuntia robusta* en diferentes estados de madurez (15 días, 30 días y 365 días). O.F.I.: *Opuntia ficus indica*; O.R.: *Opuntia robusta*; a, b- en las barras, las diferentes letras indican la diferencias significativas entre las muestras a $p < 0.05$ mediante una prueba de Tukey.

Estos resultados indican que la etapa de madurez tiene una influencia directa sobre las mediciones morfológicas de los cladodios de nopal, evidenciando un crecimiento continuo en grosor, ancho, longitud, área y perímetro a medida que avanza el desarrollo del tejido vegetal. Los resultados obtenidos para las dimensiones morfológicas de los cladodios (grosor, ancho, largo, área y perímetro) mostraron un comportamiento similar entre las especies evaluadas (*Opuntia ficus-indica* y *Opuntia robusta*), presentando un incremento progresivo conforme aumentó la madurez (Gráficas 1, 2, 3, 4 y 5). Este comportamiento coincide con lo reportado por Espinosa-Solares & Domínguez-Puerto, (2023) quienes observaron valores de grosor entre 4.00 y 5.00 mm en la región apical (parte superior) y entre 6.30 y 9.00 mm en la región basal (parte inferior), lo cual concuerda con los valores obtenidos en este estudio para los cladodios de 15 y 30 días de madurez. En cuanto a los cladodios con 365 días de madurez, Lucena et al., (2021), reportaron valores de

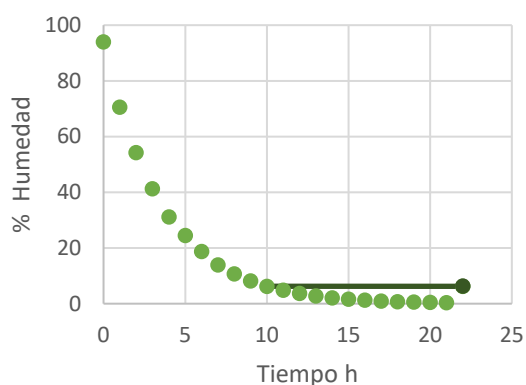
grosor de 33.40 mm, superiores a los obtenidos en el presente estudio. Esta diferencia puede atribuirse a que dichos autores utilizaron cladodios primarios, secundarios y terciarios, sin especificar el tiempo exacto de crecimiento, mientras que en esta investigación se emplearon cladodios con edades definidas (15, 30 y 365 días). Asimismo, los valores de largo y ancho reportados por ese autor fueron de 25.51 cm de largo y 11.49 cm de ancho para cladodios primarios; 25.53 cm de largo y 12.06 cm de ancho para cladodios secundarios; y 17.30 cm de largo y 8.53 cm de ancho para cladodios terciarios, los cuales se encuentran dentro del rango de los obtenidos en este trabajo. Esto sugiere que las diferencias pueden deberse al estado fisiológico y a la edad de los cladodios analizados.

El aumento progresivo en las dimensiones morfológicas observado en este trabajo es consistente con lo señalado por estos autores, quienes mencionan que el crecimiento y desarrollo del nopal están directamente relacionados con la edad de maduración y las condiciones fisiológicas. Dicho incremento se asocia con la acumulación de mucílago y la formación de compuestos estructurales, como celulosa, hemicelulosa y lignina, los cuales contribuyen al engrosamiento y expansión de los cladodios conforme avanza su desarrollo. En conjunto, estos resultados confirman que la madurez influye significativamente en las dimensiones del nopal y que las variaciones entre especies responden principalmente a las diferencias en su fisiología y en las características del tejido fotosintético.

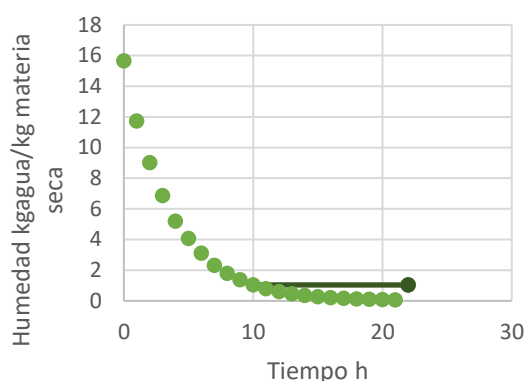
18.2. Cinética de secado

En las gráficas 6 y 7 se observa un comportamiento similar en la pérdida de humedad expresada en base húmeda y base seca de los cladodios de nopal durante el proceso de secado. Ambas curvas muestran una disminución progresiva de la humedad en las primeras horas del proceso, con valores iniciales aproximados de 94 % en base húmeda y 16.5 kg de agua/kg de materia seca en base seca, los cuales descienden hasta cerca de 20 % (3 kg de agua/kg de materia seca) durante las primeras 5 horas. Posteriormente, la pérdida de agua ocurre de manera más lenta, alcanzando un punto de equilibrio alrededor de las 22 horas de secado. Este comportamiento indica que la mayor parte del agua libre se elimina en las etapas

iniciales, mientras que en las fases finales la difusión interna del agua se convierte en un factor limitante. Asimismo, se evidencia que un tiempo de secado de aproximadamente 10 horas es suficiente para alcanzar una humedad estable, ya que entre las 10 y 22 horas se presenta una pérdida de agua similar tanto en base húmeda como en base seca, lo que indica que el material ha alcanzado su equilibrio higroscópico.



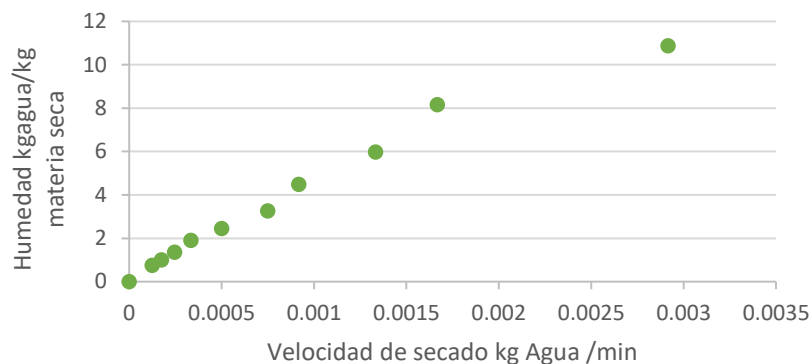
Grafica 6. Comportamiento cinético del contenido de humedad del cladodios nopal *Opuntia* a diferentes tiempos de exposición al secado convectivo.



Grafica 7. Comportamiento cinético (Humedad kg de agua/ kg de materia seca) del cladodio de nopal *Opuntia* a diferentes tiempos de exposición al secado convectivo.

Por otro lado, en la gráfica 8 se observa la relación entre la velocidad de secado y el contenido de humedad de los cladodios de nopal. La gráfica muestra que la velocidad de secado es mayor durante la etapa inicial del proceso convectivo, coincidiendo con un elevado contenido de agua presente en el material. Conforme disminuye el contenido de humedad, también se reduce progresivamente la velocidad del proceso.

Esta tendencia indica que la etapa inicial, eliminación de agua ocurre principalmente por la evaporación del agua libre, la cual migra fácilmente hacia la superficie del material. Sin embargo a medida que la humedad disminuye, la difusión interna del agua ligada se convierte en el mecanismo predominante, provocando una disminución constante de la velocidad de secado. Este comportamiento es característico de un proceso controlado tal cual se aprecia en la gráfica.



Grafica 8. Comportamiento de la velocidad de secado del cladodio de nopal Opuntia de nopal al secado convectivo.

Por otro lado, el comportamiento cinético, así como la velocidad de secado de los cladodios de nopal (Gráficas 6, 7 y 8), evidencian las dos etapas características del secado convectivo. Este comportamiento presenta similitud con lo reportado por Medina et al.,(2023), quienes evaluaron la cinética de secado de cladodios de nopal utilizando diferentes modelos matemáticos. Sin embargo, a diferencia de dicho estudio, en el presente trabajo se aplicó únicamente el modelo logarítmico, obteniéndose coeficientes de determinación (R^2) de 0.9997, superiores a los reportados por estos autores, quienes obtuvieron un valor de R^2 de 0.970. Este alto grado de ajuste indica que el modelo describe adecuadamente la relación del contenido de humedad en función de la temperatura y el tiempo durante el proceso de secado convectivo. En consecuencia, los resultados confirman que el comportamiento observado es fundamental para determinar las condiciones óptimas de secado, permitiendo establecer los tiempos necesarios para alcanzar el equilibrio sin prolongar el proceso más de lo requerido, evitando así la sobreexposición térmica y la posible afectación de la calidad del producto final.

18.3. Secado convectivo

En la tabla 4 se presentan los resultados obtenidos del rendimiento en base fresca y seca durante el proceso de secado convectivo de los cladodios de Opuntia

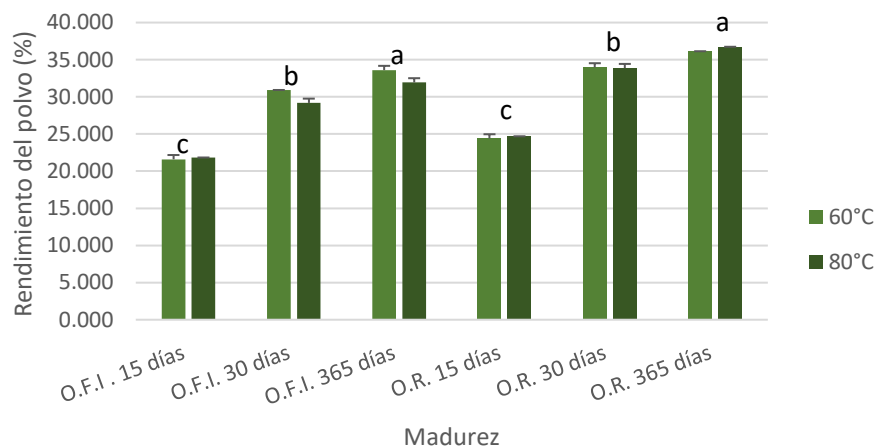
ficus-indica y Opuntia robusta, evaluados a dos temperaturas de secado (60 y 80 °C) y en tres estados de madurez (15, 30 y 365 días). Los resultados evidencian una disminución progresiva de la masa fresca en comparación con la masa seca en ambas especies. Además, se observó un aumento en el porcentaje de rendimiento seco en ambas especies, lo que confirma la pérdida de humedad asociada al proceso de secado. Asimismo, se aprecia un incremento en el porcentaje seco conforme avanzan las diferentes etapas de madurez de los cladodios, tanto en O.F.I. como en O.R. En el caso de O.F.I., el rendimiento seco aumentó de 21.867 % (cladodios de 15 días) a 33.733 % (cladodios de 365 días) a una temperatura de 60 °C, mientras que a 80 °C los valores fueron ligeramente menores, con un incremento de 22.000 % a 33.133 %, respectivamente. Por su parte, O.R. mostró un comportamiento similar, con valores de 24.667 % (15 días) a 36.400 % (365 días) a 60 °C y de 24.800 % a 36.800 % a 80 con ambas especies, los cladodios con 365 días de madurez presentaron los mayores rendimientos, seguidos por los de 30 días y finalmente los de 15 días. Estos resultados indican que el grado de madurez tiene una influencia directa sobre el rendimiento final, asociado al incremento en la proporción de sólidos estructurales, como celulosa y lignina, en el cladodio. Además, el análisis evidenció diferencias significativas ($p < 0.05$) entre los tratamientos.

Tabla 4. Porcentaje del rendimiento de los cladodios Opuntia ficus indica y Opuntia robusta (fresco y seco) a diferentes temperaturas de secado (60 y 80°C).

Tratamientos	60°C		80°C	
	% Fresco	% Seco	% Fresco	% seco
O.F.I. 15 días	100.000	21.867 ± 0.577c	100.000	22.000 ± 0.000c
O.F.I. 30 días	100.000	31.200 ± 0.000b	100.000	29.467 ± 0.577b
O.F.I. 365 días	100.000	33.733 ± 0.577a	100.000	32.133 ± 0.577a
O.R. 15 días	100.000	24.667 ± 0.577c	100.000	24.800 ± 0.000c
O.R. 30 días	100.000	34.133 ± 0.577b	100.000	34.267 ± 0.577b
O.R. 1 365 días	100.000	36.400 ± 0.000a	100.000	36.800 ± 0.000a

Nota O.F.I.: *Opuntia ficus-indica*; O.R.: *Opuntia robusta*. Los resultados se expresan como media ± desviación estándar. Las letras diferentes en las mismas columnas indican diferencias significativas ($p < 0.05$) según la prueba estadística Tukey.

Por otro lado, en la gráfica 9 se muestran los valores obtenidos del rendimiento en la obtención del polvo de los cladodios de nopal de O.F.I. y O.R. tras la molienda. Se observa un incremento progresivo del rendimiento conforme aumenta el estado de madurez de los polvos de nopal. Los polvos con 365 días de madurez presentaron los valores más altos de rendimiento, mientras que los de 15 días registraron los valores más bajos en ambas especies.



Grafica 9. Rendimiento del polvo (%) obtenido del proceso de reducción de tamaño de los cladodios de *Opuntia ficus-indica* (O.F.I.) y *Opuntia robusta* (O.R.) a diferentes estados de madurez (15, 30 y 365 días) y temperaturas de secado (60 y 80°C). O.F.I.: *Opuntia ficus indica*; O.R.: *Opuntia robusta*; a, b, c- en las barras, las diferentes letras indican la diferencias significativas entre las muestras a $p < 0.05$ mediante una prueba de Tukey.

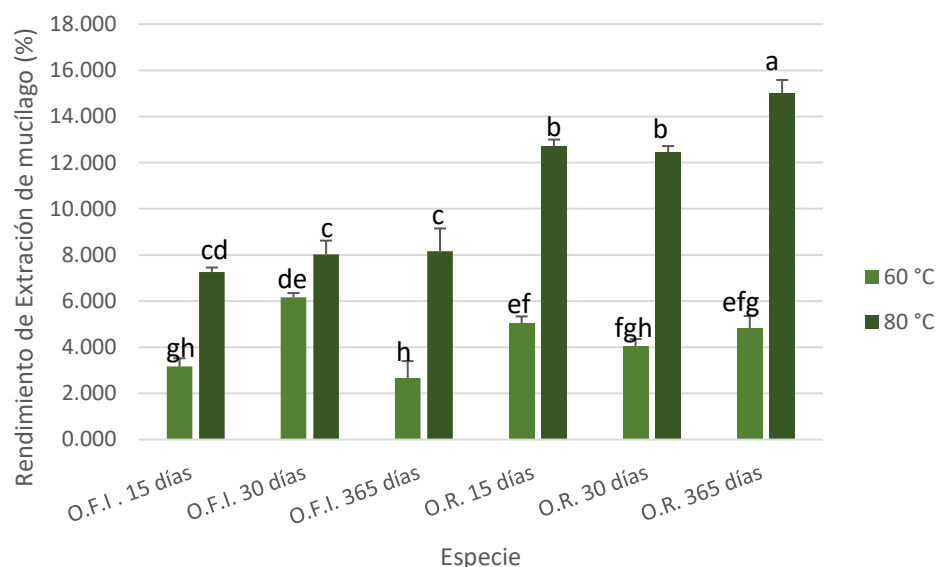
18.4. Rendimiento de extracción de mucílago

En la gráfica 10 se presenta el rendimiento (%) de la extracción de mucílago obtenido a partir de los cladodios de *O. ficus-indica* (O.F.I.) y *O. robusta* (O.R.) bajo los diferentes tratamientos evaluados. Se observaron diferencias significativas entre las especies, los tiempos de madurez y las temperaturas de secado.

Los valores más altos de rendimiento se registraron en O.R. con 365 días de crecimiento a 80 °C, alcanzando un 15.8 % de extracción. A esta condición le siguieron los polvos de 15 y 30 días de esta misma especie y a la misma temperatura, con rendimientos de 12.8 % y 12.3 %, respectivamente.

Por otro lado, en O.F.I. se registraron los rendimientos más bajos a los 15 días de madurez y a una temperatura de 60 °C, con un rendimiento de 2.8 %. Estos

resultados indican que la temperatura de secado de 80 °C favorece la eficiencia de extracción de mucílago en ambas especies, siendo más notable su efecto en los cladodios con 365 días de madurez.



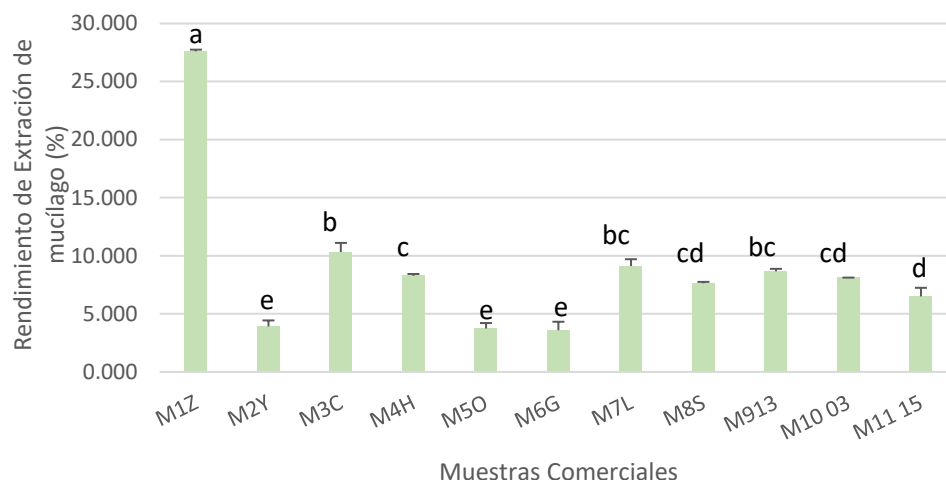
Grafica 10. Rendimiento de la extracción de mucílago (%) de los cladodios de nopal *Opuntia ficus-indica* y *Opuntia robusta* a diferentes estado de madurez (15, 30 y 365 días) y temperaturas de secado (60 y 80°C).

O.F.I.: *Opuntia ficus indica*; O.R.: *Opuntia robusta*; a, b, c, d, e, f, g, h- en las barras, las diferentes letras indican la diferencias significativas entre las muestras a $p < 0.05$ mediante una prueba de Tukey.

Los resultados obtenidos respecto al rendimiento de la extracción de mucílago (Gráfica 10) muestran una tendencia similar a la reportada por Quintero-García et al., (2021), quienes utilizaron condiciones similares de extracción y obtuvieron rendimientos de 15.69 % en cladodios con 100 días de crecimiento. Sin embargo, en el presente estudio se evaluaron cladodios de 15, 30 y 365 días de madurez, además de la aplicación de temperaturas de secado controladas, lo cual explica la variación en los rendimientos observados. Además, estos mismos autores mencionan que la extracción de mucílago puede verse afectada por diversos factores, tales como el tipo de disolvente utilizado, la etapa de madurez de los cladodios, la temperatura y el tiempo de extracción, observándose una relación directa entre estas variables y el rendimiento obtenido. Esto respalda las variaciones

encontradas en la presente investigación. Por otro lado, los resultados difieren de lo reportado por Cruz-Rubio et al., (2021), quienes obtuvieron rendimientos entre 1 % y 2 % al aplicar diferentes métodos de secado en cladodios de nopal. Estas diferencias sugieren que la temperatura de secado de 80 °C utilizada en el presente estudio favoreció una mayor disponibilidad y extracción de mucílago. Así mismo, Teshager et al., (2024), reportaron un rendimiento de 5.86 % en cladodios jóvenes de O.R., valor inferior al obtenido en esta investigación, lo cual puede atribuirse al grado de madurez y al contenido de este hidrocoloide en los cladodios. En conjunto, estos resultados demuestran que el estado de madurez y la temperatura de secado son factores determinantes en la eficiencia de extracción, permitiendo optimizar el proceso y mejorar el rendimiento final del mucílago

En la gráfica 11 se presentan los rendimientos (%) de la extracción de mucílago correspondientes a las muestras comerciales analizadas, donde se observó una amplia variación entre las distintas muestras evaluadas. La muestra M1Z registró el mayor rendimiento, con un valor de 27.8%, lo que sugiere una mayor concentración de compuestos solubles o un procesamiento más eficiente. En contraste, las muestras M2Y, M5O y M6G mostraron rendimientos más bajos, con valores que oscilaron entre 4% y 6%, lo cual podría estar asociado a factores como la edad del cladodio, el método de secado, el tiempo de almacenamiento o la posible degradación del mucílago. Por su parte, las muestras M3C, M4H, M7L, M8S, M913, M1003 y M1115 presentaron rendimientos intermedios, con valores entre 7% y 11%, respectivamente, indicando una eficiencia de extracción moderada en comparación con las anteriores.



Grafica 11. Rendimiento de la extracción de mucílago (%) de los polvos comerciales de nopal deshidratado.

M: muestras; a, b, c, d, e, - en las barras, las diferentes letras indican la diferencias significativas entre las muestras a $p < 0.05$ mediante una prueba de Tukey

Al comparar los resultados obtenidos de los diferentes tratamientos (Gráfica 10) con las muestras comerciales (Gráfica 11), se observó que algunas muestras comerciales presentaron rendimientos similares a los obtenidos en el tratamiento de O.R. con 365 días de madurez a 80 °C. Las muestras M3C, M4H, M7L, M8S, M913 y M1003 presentaron valores intermedios de rendimiento, oscilando entre 8 % y 12 %, lo que sugiere que podrían corresponder a polvos provenientes de cladodios maduros de O.R

18.5. Análisis Proximal

En la tabla 5 se presentan los resultados del análisis proximal realizado a los polvos de cladodios de nopal O.F.I. y O.R., obtenidos a diferentes temperaturas de secado (60 °C y 80 °C) y en distintas etapas de madurez. Los resultados muestran diferencias significativas ($p < 0.05$) en cuanto al contenido de humedad, cenizas y grasas entre los distintos tratamientos evaluados. Se observó que el contenido de humedad varió significativamente entre 3.28% y 7.07%, dependiendo tanto de la temperatura de secado como del estado de madurez. Las muestras sometidas a 80

°C mostraron un menor contenido de humedad en comparación con aquellas secadas a 60 °C, las cuales presentaron una mayor humedad, lo que indica una mayor eficiencia en la deshidratación a temperaturas elevadas. En cuanto al contenido de cenizas, los valores oscilaron entre 7.61% y 14.11% en los diferentes tratamientos, siendo los niveles más altos los observados en O.R. a 30 días y 60 °C, lo que sugiere una mayor concentración de minerales estructurales bajo estas condiciones. Respecto al contenido de grasas, se presentaron valores entre 0.99% y 1.89%, indicando que los polvos de O.F.I. secados a 80 °C conservaron una mayor proporción de lípidos naturales, posiblemente debido a que los polvos experimentales presentaron un menor procesamiento industrial.

Tabla 5. Composición proximal (humedad, cenizas y grasas) de los polvos de nopal (*Opuntia ficus-indica* y *Opuntia robusta*) en diferentes estados de madurez y temperaturas de secado.

Tratamientos	Humedad (%)	Cenizas (%)	Grasas (%)
O.F.I 15 días 60°C	4.431 ± 0.212efg	9.337 ± 0.182ab	1.152 ± 0.176b
O.F.I 15 días 80°C	3.284 ± 0.205g	8.377 ± 0.250ab	1.898 ± 0.245ab
O.F.I 30 días 60°C	5.038 ± 0.212bcde	10.377 ± 0.182ab	1.348 ± 0.123ab
O.F.I 30 días 80°C	4.739 ± 0.069def	7.610 ± 0.222b	1.835 ± 0.101ab
O.F.I 365 días 60°C	7.072 ± 0.888a	10.003 ± 0.668ab	1.103 ± 0.094b
O.F.I 365 días 80°C	5.054 ± 0.245cde	10.747 ± 0.307ab	1.347 ± 0.055ab
O.R 15 días 60°C	5.383 ± 0.024bcde	12.443 ± 0.195ab	1.562 ± 0.299a
O.R 15 días 80°C	3.902 ± 0.125fg	8.077 ± 0.57b	0.996 ± 0.012ab
O.R 30 días 60°C	5.732 ± 0.196bcd	14.110 ± 0.179a	1.315 ± 0.138ab
O.R 30 días 80°C	3.939 ± 0.070fg	11.897 ± 0.345ab	1.068 ± 0.153 b
O.R 365 días 60°C	5.989 ± 0.052abc	13.073 ± 0.338ab	1.152 ± 0.067b
O.R 365 días 80°C	6.183 ± 0.275ab	8.573 ± 0.003 ab	1.547 ± 0.090 ab

Nota O.F.I.: *Opuntia ficus-indica*; O.R.: *Opuntia robusta*. Los resultados se expresan como media ± desviación estándar de los diferentes análisis proximales. Las letras diferentes en las mismas columnas indican diferencias significativas ($p < 0.05$) según la prueba estadística Tukey.

Los resultados de la composición proximal muestran cierta similitud con lo reportado por Pérez-Viveros et al., (2024), quienes obtuvieron valores de humedad (6.47%), cenizas (22.75%) y grasas (1.222%) en cladodios de O.F.I. con 70 días de crecimiento. Por lo tanto, los valores obtenidos presentan similitud con los reportados en el presente trabajo, a excepción del contenido de cenizas, donde se registraron valores más elevados. Que dicho mencionan que el contenido de cenizas varía en función del estado de madurez, a diferencia de la humedad y las grasas, las cuales dependen principalmente de los cambios fisiológicos del cladodio. Asimismo, O.R Hernández et al., (2020), obtuvieron contenidos de humedad por debajo del 5 %, destacando la importancia de este parámetro en alimentos deshidratados. Cabe mencionar que la humedad es un indicador de estabilidad, ya que un alimento con elevado contenido de agua reduce su estabilidad y favorece el deterioro microbiológico.

Por ello, tanto los polvos comerciales como los experimentales presentaron condiciones de mayor estabilidad, desfavoreciendo el crecimiento microbiano. De acuerdo con De Farias et al., (2021), e obtuvieron valores de humedad (11 %), cenizas (21 %) y lípidos (0.80 % a 2.9 %) en cladodios de 22 cm de longitud. Estos autores mencionan que la composición química puede variar en función de las condiciones de cultivo, el tipo de suelo y el clima en el que se desarrolla el cladodio, lo cual podría explicar las diferencias observadas con los resultados obtenidos en la presente investigación.

Los resultados presentados en la tabla 6 muestran diferencias significativas ($p < 0.05$) en el contenido de humedad, cenizas y grasas entre los distintos polvos comerciales de nopal deshidratado. Se observó que el contenido de humedad varió entre 4.56% y 7.57 %, siendo las muestras M8S (4.56%) y M2Y (4.87%) las que presentaron los valores más bajos, mientras que M1Z (7.57 %), M6G (7.49%) y M913 (7.25%) registraron los porcentajes más altos. Estos valores se encuentran dentro de lo esperado para productos deshidratados. Respecto al contenido de cenizas, los productos comerciales oscilaron entre 7.61% y 14.11%. Sin embargo, la muestra M8S destacó por presentar un valor significativamente más alto (46.22%), posiblemente debido a la presencia de impurezas minerales o a la adición

de material inorgánico durante el proceso de secado, molienda o en la formulación comercial del producto.

Respecto al contenido de grasas, los valores fueron bajos en todas las muestras, oscilando entre 0.35% y 0.96%. Las muestras M4H, M5O, M923 y M1115 presentaron los valores más altos dentro de este parámetro, mientras que M3C y M8S registraron los valores más bajos.

Tabla 6. Composición proximal (humedad, cenizas y grasas) de los polvos comerciales de nopal deshidratado

Muestras	Humedad (%)	Cenizas (%)	Grasas (%)
M1Z	7.572 ± 0.151a	9.263 ± 0.131e	0.525 ± 0.088abc
M2Y	4.875 ± 0.171ef	11.630 ± 0.537de	0.610 ± 0.235abc
M3C	5.588 ± 0.115de	11.623 ± 0.550cde	0.352 ± 0.173bc
M4H	6.048 ± 0.318bcd	11.363 ± 0.270cde	0.947 ± 0.131a
M5O	5.750 ± 0.213cd	15.930 ± 0.248b	0.963 ± 0.189a
M6G	7.494 ± 0.334a	12.443 ± 0.201cde	0.680 ± 0.183ab
M7L	6.190 ± 0.147bc	12.657 ± 0.185bcd	0.772 ± 0.048ab
M8S	4.565 ± 0.62f	46.223 ± 0.816a	0.418 ± 0.148c
M913	7.250 ± 0.204a	14.360 ± 0.375bc	0.848 ± 0.165a
M10 03	6.555 ± 0.040b	11.990 ± 0.192cde	0.778 ± 0.108ab
M11 15	5.840 ± 0.062cd	13.380 ± 0.286bcd	0.808 ± 0.122abc

Nota M: muestras; Los resultados se expresan como media ± desviación estándar de los diferentes análisis proximales. Las letras diferentes en las mismas columnas indican diferencias significativas ($p < 0.05$) según la prueba estadística Tukey.

Al comparar los resultados obtenidos en los tratamientos (tabla 5) y las muestras comerciales (tabla 6), se observa que los polvos experimentales secados a 80 °C presentan un menor contenido de humedad en comparación con los productos comerciales, los cuales muestran valores ligeramente superiores, posiblemente debido a las condiciones de almacenamiento. En cuanto al contenido de cenizas, los polvos comerciales se encuentran dentro del rango observado en los diferentes tratamientos, con excepción de la muestra M8S, que presentó un valor significativamente elevado.

Respecto al contenido de grasas, los tratamientos experimentales mostraron porcentajes más altos que las muestras comerciales, lo que indica que los polvos

obtenidos de manera experimental conservan una mayor proporción de lípidos naturales, a diferencia de los productos comerciales, que suelen someterse a procesos de refinamiento o molienda más intensos.

En general, se observa que las muestras comerciales presentan una composición proximal muy variable, la cual puede estar influenciada por factores como la especie de nopal utilizada, las condiciones de secado, el grado de molienda y la presencia de aditivos o materiales inorgánicos en su formulación.

18.5.1. Carbohidratos

18.5.1.1. Azúcares reductores

En la tabla 7 se presentan los resultados de la cuantificación de azúcares reductores antes y después de la hidrólisis de los diferentes tratamientos de los cladodios de nopal O.F.I. y O.R., sometidos a diferentes temperaturas de secado (60 °C y 80 °C) y en distintas etapas de madurez. Se observó que los valores variaron significativamente entre 22.957 mg/g y 35.557 mg/g para los tratamientos sin hidrolizar, obteniéndose el valor más alto en la muestra O.F.I. de 30 días de madurez a 80 °C, mientras que los valores más bajos correspondieron a O.F.I. de 15 días a 80 °C y O.R. de 15 días a 60 °C.

Los tratamientos secados a 80 °C evidenciaron un incremento en el contenido de azúcares reductores en comparación con los tratamientos secados a 60 °C, lo cual puede atribuirse a que las altas temperaturas favorecen la liberación de azúcares simples y la degradación parcial de polisacáridos.

En comparación con los azúcares reductores hidrolizados, los valores disminuyeron, oscilando entre 13.377 mg/g y 23.557 mg/g. El valor más alto se obtuvo en el tratamiento de O.R. con 365 días de madurez a 60 °C, seguido de O.R. con 15 días a 80 °C, mientras que el menor contenido correspondió a O.R. con 30 días a 80 °C.

Los tratamientos sometidos a secado a 60 °C fueron los que mantuvieron un mayor contenido de azúcares después de la hidrólisis, lo cual puede atribuirse a una menor degradación de polisacáridos durante el proceso de secado convectivo. En general, los resultados indican que la temperatura de secado y la etapa de madurez

de los cladodios en polvo influyen significativamente en el contenido de azúcares reductores.

Las muestras de O.F.I. mostraron un mayor contenido en los tratamientos sometidos a temperaturas elevadas, mientras que las muestras de O.R. presentaron un mayor contenido en los cladodios tratados a 60 °C e hidrolizados, especialmente en aquellos con 365 días de madurez.

Tabla 7. Contenido de azúcares reductores en los polvos de nopal (*Opuntia ficus-indica* y *Opuntia robusta*) a diferentes estados de madurez y temperaturas de secado, antes y después de la hidrólisis.

Tratamientos	Azucars reductores sin hidrolizar (mg/g)	Azucars reductores hidrolizados (mg/g)
O.F.I 15 días 60°C	31.137 ± 0.667b	19.217 ± 0.335b
O.F.I 15 días 80°C	22.997 ± 0.701f	15.984 ± 0.621e
O.F.I 30 días 60°C	26.957 ± 0.408de	18.484 ± 0.278bcd
O.F.I 30 días 80°C	35.557 ± 0.446a	14.044 ± 0.506f
O.F.I 365 días 60°C	28.891 ± 0.500cd	17.217 ± 0.416cde
O.F.I 365 días 80°C	25.671 ± 0.310e	13.164 ± 0.784f
O.R 15 días 60°C	22.957 ± 0.550f	18.937 ± 0.106bcd
O.R 15 días 80°C	27.157 ± 0.219de	23.217 ± 0.727a
O.R 30 días 60°C	31.157 ± 0.548b	18.484 ± 0.082bcd
O.R 30 días 80°C	30.457 ± 0.420bc	12.377 ± 0.025f
O.R 365 días 60°C	29.811 ± 0.915bc	23.557 ± 0.514a
O.R 365 días 80°C	27.124 ± 0.691de	16.944 ± 0.784de

Nota O.F.I.: *Opuntia ficus-indica*; O.R.: *Opuntia robusta*. Los resultados se expresan como media ± desviación estándar del contenido de azúcares reductores antes y después de hidrolizar. Las letras diferentes en las mismas columnas indican diferencias significativas ($p < 0.05$) según la prueba estadística Tukey.

En cuanto a los resultados de la cuantificación de azúcares reductores, estos presentaron cierta similitud con lo reportado por Mounir et al., (2020), quienes obtuvieron valores entre 2% y 4% de azúcares reductores.

En el presente estudio se obtuvieron valores de 22.957 mg/g a 35.557 mg/g (2.29%–3.55 %) en muestras sin hidrolizar. Asimismo, Fernández-Martínez et al.,(2024), reportaron valores de 1.73 % en la pulpa de cladodios de nopal; además, evaluaron las cáscaras de estos, obteniendo resultados ND (no determinado).

Estos resultados indican que los valores obtenidos en esta investigación se encuentran dentro de los rangos reportados en la literatura. Sin embargo, las diferencias observadas pueden atribuirse a que en el presente estudio se evaluaron distintas etapas de crecimiento con días establecidos, diferentes especies de Opuntia y condiciones específicas de secado, factores que influyen directamente en el contenido de azúcares reductores y explican las variaciones respecto a otros autores.

Por lo tanto, estas diferencias pueden atribuirse a que los autores mencionan que los valores pueden variar dependiendo de las condiciones de recolección de la materia prima, así como de las condiciones del proceso de obtención del polvo de cladodios y de las partes utilizadas del mismo.

En la tabla 8 se presentan los valores de azúcares reductores antes y después de la hidrólisis en las distintas muestras comerciales de nopal deshidratado. Se observó una variación significativa entre los valores, los cuales oscilaron de 19.364 mg/g a 33.304 mg/g en las muestras sin hidrolizar.

Las muestras M1Z, M3C, M4H y M1115 presentaron los valores más altos sin el proceso de hidrólisis del polvo, lo cual evidencia la presencia de carbohidratos simples, mientras que la muestra M5O mostró los valores más bajos.

Por otra parte, las muestras hidrolizadas oscilaron entre 4.997 mg/g y 20.757 mg/g, evidenciando una amplia variabilidad en el contenido de este compuesto entre los productos comerciales analizados. En cuanto a las muestras M8S, M1003 y M6G, estas presentaron los valores más altos de azúcares reductores después de la hidrólisis.

En contraste, las muestras M2Y y M5O registraron los valores más bajos de este compuesto, lo cual puede atribuirse a procesos de secado más agresivos, a la calidad del material vegetativo o a una menor disponibilidad de polisacáridos susceptibles a hidrolizar.

Tabla 8. Contenido de azúcares reductores en los polvos comerciales de nopal deshidratado, antes y después de la hidrólisis.

Muestras	Azúcares reductores sin hidrolizar (mg/g)	Azúcares reductores hidrolizados (mg/g)
M1Z	33.304 ± 0.460a	13.417 ± 0.025de
M2Y	29.664 ± 0.086cde	6.784 ± 0.506g
M3C	32.337 ± 0.109abc	12.337 ± 0.335e
M4H	32.964 ± 0.552ab	17.437 ± 0.547b
M5O	19.364 ± 0.531h	4.997 ± 0.123h
M6G	27.171 ± 0.714ef	15.777 ± 0.090c
M7L	26.817 ± 0.950f	14.244 ± 0.376d
M8S	23.164 ± 0.286g	20.757 ± 0.188a
M9I3	27.371 ± 1.788ef	8.617 ± 0.580f
M10 03	29.257 ± 0.909def	15.877 ± 0.172c
M11 15	30.244 ± 0.438bcd	9.164 ± 0.800 f

Nota M: muestras; Los resultados se expresan como media ± desviación estándar del contenido de azúcares reductores. Las letras diferentes en las mismas columnas indican diferencias significativas ($p < 0.05$) según la prueba estadística Tukey.

En comparación con los resultados obtenidos en los diferentes tratamientos (tabla 8) y las muestras comerciales (tabla 9), se observa que las muestras sin hidrolizar de los tratamientos experimentales presentaron valores ligeramente superiores, especialmente en aquellos sometidos a secado a 80 °C, en comparación con las muestras comerciales, las cuales mostraron valores similares a los experimentales, con excepción de la muestra M5O. Esta diferencia puede atribuirse al proceso de secado o a la calidad del nopal utilizado para la elaboración de dicho polvo.

En cuanto a los polvos hidrolizados, los tratamientos secados a 60 °C, especialmente los de 365 días de madurez, presentaron valores superiores en comparación con las muestras comerciales. Sin embargo, algunas muestras comerciales obtuvieron valores similares a los experimentales, lo cual puede atribuirse a una menor disponibilidad de polisacáridos susceptibles a hidrolizar.

18.5.1.2. TLC

En la tabla 9 se muestran los valores de Rf obtenidos mediante cromatografía en capa fina (TLC) de los tratamientos de nopal O.F.I. y O.R. secados a 80 °C, identificando la posible presencia de monosacáridos en los diferentes tratamientos. Se observaron valores de Rf que oscilaron entre 0.35 y 0.46, presentando coincidencia con los estándares de ramnosa (0.47), xilosa (0.44), galactosa (0.39), arabinosa (0.40), manosa (0.40) y ácido galacturónico (0.40).

Los tratamientos O.F.I. 15 días a 80 °C, O.R. 30 días a 80 °C y O.R. 365 días a 80 °C revelaron la posible presencia de ramnosa, la cual forma parte de la estructura de polisacáridos y del mucílago presente en los cladodios, teniendo relación con las fibras solubles. Asimismo, los polvos O.F.I. 15 días a 80 °C, O.R. 30 días a 80 °C y O.R. 365 días a 80 °C revelaron la presencia de xilosa, asociada principalmente con los compuestos de la pared celular. Por otra parte, el polvo O.F.I. 30 días a 80 °C mostró la posible presencia de arabinosa, manosa o ácido galacturónico, compuestos relacionados con polisacáridos complejos, pectinas y mucílagos.

La presencia de estos compuestos en los diferentes polvos indica un potencial funcional como fuente de fibra dietética.

Tabla 9. Valores de Rf los polvos de nopal (*Opuntia ficus-indica* y *Opuntia robusta*) a diferentes estados de madurez secados a 80°C mediante TLC.

Tratamiento	Rf obtenido	Monosacárido probable
O.F.I.15 días 80°C	0.46 ± 0.037	Ramnosa
	0.41 ± 0.006	Arabinosa / Manosa / Galacturónico
O.R. 15 días 80°C	0.44 ± 0.03	Xilosa
O.F.I 30 días 80°C	0.44 ± 0.04	Xilosa
	0.35 ± 0.02	Galactosa
O.R.30 días 80°C	0.46 ± 0.01	Ramnosa
O.F.I 365 días 80°C	0.44 ± 0.03	Xilosa
O.R. 365 días 80°C	0.46 ± 0.02	Ramnosa

Nota O.F.I.: *Opuntia ficus-indica*; O.R.: *Opuntia robusta*. Los resultados se expresan como media ± desviación estándar de los monosacáridos probables del TLC.

De acuerdo con los resultados obtenidos sobre la presencia de monosacáridos en los diferentes tratamientos de nopal, estos presentan similitud con lo reportado por Garfías Silva et al., (2022), quienes identificaron la presencia de estos monosacáridos en polvos de nopal O.F.I.

Sin embargo, los resultados difieren del presente estudio, ya que dichos autores reportaron la presencia de diversos monosacáridos en un mismo polvo de nopal, mientras que en esta investigación se identificó principalmente un solo compuesto por tratamiento. Esta diferencia puede atribuirse a la metodología utilizada por dichos autores, especialmente al tiempo de hidrólisis aplicado durante el análisis.

En cuanto a lo reportado por Rojas-Olivos et al., (2025), quienes también revelaron la presencia de estos compuestos en mucílago de nopal, se observaron diferencias respecto al presente análisis, posiblemente debido a la metodología propuesta por dichos autores, así como al estado de madurez de los cladodios evaluados.

Por otra parte, en la tabla 10 se muestran los valores de R_f obtenidos mediante cromatografía en capa fina (TLC) de los diferentes polvos comerciales de nopal deshidratado, los cuales oscilaron entre 0.40 y 0.46, indicando la posible presencia de monosacáridos.

La mayoría de las muestras, como M1Z, M3C, M5O, M6G, M1003 y M1115, presentaron valores de R_f entre 0.43 y 0.45, indicando la posible presencia de xilosa.

En cuanto a los polvos M2Y, M7L, M8S y M913, estos obtuvieron valores de 0.42 a 0.44, sugiriendo la presencia de manosa, arabinosa y ácido galacturónico. Asimismo, la muestra M4H presentó un valor de 0.46, revelando la posible presencia de ramnosa. Sin embargo, existen variaciones en la composición del mucílago presente en los diversos polvos, lo cual puede atribuirse a los procesos industriales aplicados o a la formulación de cada producto comercial.

Tabla 10. valores de Rf de los polvos comerciales de nopal deshidratado mediante TLC.

Muestra	Rf obtenido	Monosacárido probable
M1Z	0.45 ± 0.01	Ramnosa
M2Y	0.42 ± 0.02	Arabinosa / Manosa / Galacturónico
M3C	0.44 ± 0.04	Xilosa
M4H	0.46 ± 0.02	Ramnosa
M5O	0.43 ± 0.02	Xilosa
M6G	0.44 ± 0.01	Xilosa
M7L	0.41 ± 0.01	Arabinosa / Manosa / Galacturónico
M8S	0.41 ± 0.03	Arabinosa / Manosa / Galacturónico
M9I3	0.40 ± 0.04	Arabinosa / Manosa / Galacturónico
M10 03	0.44 ± 0.005	Xilosa
M11 15	0.44 ± 0.02	Xilosa

Nota M: muestras; Los resultados se expresan como media ± desviación estándar de los monosacáridos probables del TLC.

Al comparar los valores de Rf de los diferentes tratamientos con los polvos comerciales, se observó similitud en cuanto a la composición de monosacáridos, tales como xilosa, manosa, arabinosa, ácido galacturónico y ramnosa. La mayoría de las muestras comerciales presentaron valores asociados con xilosa, similares a los tratamientos de cladodios intermedios o maduros, lo que sugiere un mayor contenido de hemicelulosas y compuestos estructurales. Asimismo, algunas muestras comerciales coincidieron con monosacáridos relacionados con mucílagos y pectinas, indicando la posible utilización de cladodios jóvenes o mezclas de diferentes estados de madurez en la elaboración de los polvos comerciales.

18.6. Análisis fitoquímico

18.6.1. Cuantificación de Polifenoles y flavonoides totales

En la tabla 11 se muestran los resultados de la cuantificación de compuestos fenólicos y flavonoides de los diferentes tratamientos de cladodios de nopal O.F.I. y O.R., secados a 60 °C y 80 °C en sus diferentes estados de madurez.

En cuanto al contenido de polifenoles totales, los tratamientos obtuvieron valores que oscilaron entre 8.893 mg EAG/g y 28.679 mg EAG/g. Los cladodios de

O.F.I. presentaron los valores más altos en las etapas de 15 y 30 días de madurez, sin verse afectados significativamente por la temperatura de secado.

Respecto al contenido de flavonoides totales, se observaron valores que oscilaron entre 0.823 mg EAG/g y 2.460 mg EAG/g, donde los cladodios de O.F.I. presentaron mayores concentraciones de flavonoides en comparación con O.R. Los cladodios jóvenes (15 y 30 días) fueron los que destacaron por presentar los valores más altos.

Por otro lado, los cladodios en etapa de madurez de 365 días, especialmente los de O.R., presentaron los valores más bajos, lo cual puede atribuirse a una menor producción de metabolitos bioactivos conforme avanza el desarrollo y envejecimiento del tejido vegetal.

En general los resultados obtenidos, se observó una variabilidad estadísticamente significativa entre los tratamientos, además de evidenciarse una disminución progresiva en la concentración de estos compuestos conforme avanzan los días de crecimiento de los cladodios.

Tabla 11. Cuantificación de compuestos fenólicos totales y flavonoides totales en polvos de nopal (*Opuntia ficus-indica* y *Opuntia robusta*) a diferentes temperaturas de secado y estado de madurez.

Tratamientos	Polifenoles totales (mg EAG/g)	Flavonoides totales (mg EAG/g)
O.F.I 15 días 60°C	28.679 ± 0.526ab	1.523 ± 0.288abc
O.F.I 15 días 80°C	24.945 ± 0.348ab	1.710 ± 0.150abc
O.F.I 30 días 60°C	28.167 ± 0.578a	1.710 ± 0.000abc
O.F.I 30 días 80°C	27.397 ± 0.296a	2.460 ± 0.150a
O.F.I 365 días 60°C	22.108 ± 0.089bc	1.448 ± 0.013bc
O.F.I 365 días 80°C	22.034 ± 0.207bc	1.810 ± 0.200abc
O.R 15 días 60°C	25.656 ± 0.067ab	2.073 ± 0.988ab
O.R 15 días 80°C	25.523 ± 0.600ab	2.085 ± 0.125ab
O.R 30 días 60°C	20.404 ± 0.326c	1.373 ± 0.438bc
O.R 30 días 80°C	15.827 ± 0.030d	0.885 ± 0.025c
O.R 365 días 60°C	8.893 ± 0.519e	0.823 ± 0.063c
O.R 365 días 80°C	13.893 ± 0.007d	1.223 ± 0.162bc

Nota O.F.I.: *Opuntia ficus-indica*; O.R.: *Opuntia robusta*. Los resultados se expresan como media ± desviación estándar del contenido de polifenoles y flavonoides. Las letras diferentes en las mismas columnas indican diferencias significativas ($p < 0.05$) según la prueba estadística Tukey.

Por lo tanto, los resultados obtenidos del contenido de polifenoles y flavonoides en los diferentes tratamientos presentaron diferencias con lo reportado por Valenzuela-garc et al., (2026), quienes mostraron valores de compuestos fenólicos entre 10.39 mg AGE/g y 103 mg AGE/g, así como contenidos de flavonoides entre 191.1 mg QE/100 g y 244.8 mg QE/100 g en diferentes cladodios, siendo superiores a los obtenidos en este estudio.

En la presente investigación se registraron valores por debajo de 28.679 mg EAG/g en compuestos fenólicos y 2.460 mg EAG/g en flavonoides para los diferentes tratamientos aplicados. Estas diferencias pueden atribuirse al proceso de obtención de los polvos, ya que se aplicaron distintas condiciones de secado y se utilizaron diferentes estados de madurez de los cladodios. En cuanto a los reportado por Figueroa-pérez et al., (2018), os resultados obtenidos mostraron similitud con el contenido de compuestos fenólicos, quienes reportaron valores de 28.5 mg GAE/g en cladodios jóvenes (12 días), 32.6 mg GAE/g en cladodios intermedios (20 días) y 19.6 mg GAE/g en cladodios viejos (30 días). Respecto al contenido de flavonoides, dichos autores obtuvieron valores de 12.5 mg CE/g en cladodios jóvenes, 18.6 mg CE/g en cladodios intermedios y 11.2 mg CE/g en cladodios viejos, siendo superiores a los obtenidos en el presente estudio. Sin embargo, los valores de compuestos fenólicos obtenidos en esta investigación se encuentran dentro de los rangos reportados por estos autores. Las diferencias observadas en el contenido de flavonoides pueden atribuirse a que los polvos evaluados presentaron diferentes estados de madurez en comparación con los utilizados por dicho autor, así como a las metodologías empleadas en este estudio. Además, nos mencionan que el contenido de estos metabolitos disminuye conforme avanza la madurez del cladodio, comportamiento que también se observó en la presente investigación, aunque los polvos con 365 días de madurez no mostraron una disminución tan marcada en comparación con lo reportado por dichos autores.

En la tabla 12 se muestran los resultados obtenidos de la cuantificación de compuestos fenólicos y flavonoides totales de los diversos polvos comerciales de nopal deshidratado. Se observó que el contenido de polifenoles varió

significativamente entre 5.456 mg EAG/g y 19.967 mg EAG/g en los diferentes polvos comerciales. Las muestras M1Z, M4H, M6G, M7L y M1003 destacaron por presentar contenidos superiores a 17 mg EAG/g, indicando una mayor retención de compuestos fenólicos. En cuanto al contenido de flavonoides, los valores oscilaron entre 0.673 mg EAG/g y 2.873 mg EAG/g en los diferentes polvos comerciales. Las muestras M1Z y M5O fueron las que presentaron los valores más altos de este compuesto, en comparación con la muestra M8S, la cual registró los valores más bajos tanto en polifenoles como en flavonoides totales. En general, los resultados evidencian diferencias significativas en los metabolitos bioactivos presentes en cada uno de los polvos comerciales de nopal deshidratado, lo cual puede estar influenciado por la especie de cladodio utilizada, el estado de madurez o el procesamiento de secado industrial aplicado en la elaboración de cada producto comercial.

Tabla 12. Cuantificación de compuestos fenólicos totales y flavonoides totales en polvos comerciales de nopal deshidratado.

Muestras	Polifenoles totales (mg EAG/g)	Flavonoides totales (mg EAG/g)
M1Z	17.516 ± 0.089cd	2.873 ± 0.312a
M2Y	14.730 ± 0.267f	1.723 ± 0.038bc
M3C	15.982 ± 0.289ef	1.223 ± 0.013cd
M4H	17.879 ± 0.867bcd	1.623 ± 0.263bc
M5O	15.182 ± 0.689f	2.160 ± 0.350b
M6G	19.212 ± 0.481a	1.535 ± 0.225c
M7L	17.967 ± 0.437abc	0.985 ± 0.075de
M8S	5.456 ± 0.059g	0.673 ± 0.013e
M913	15.827 ± 0.504ef	1.273 ± 0.163cd
M10 03	18.916 ± 0.481ab	0.973 ± 0.088de
M11 15	16.567 ± 0.015de	1.285 ± 0.075cd

Nota M: muestras comerciales. Los resultados se expresan como media ± desviación estándar del contenido de polifenoles y flavonoides. Las letras diferentes en las mismas columnas indican diferencias significativas ($p < 0.05$) según la prueba estadística Tukey.

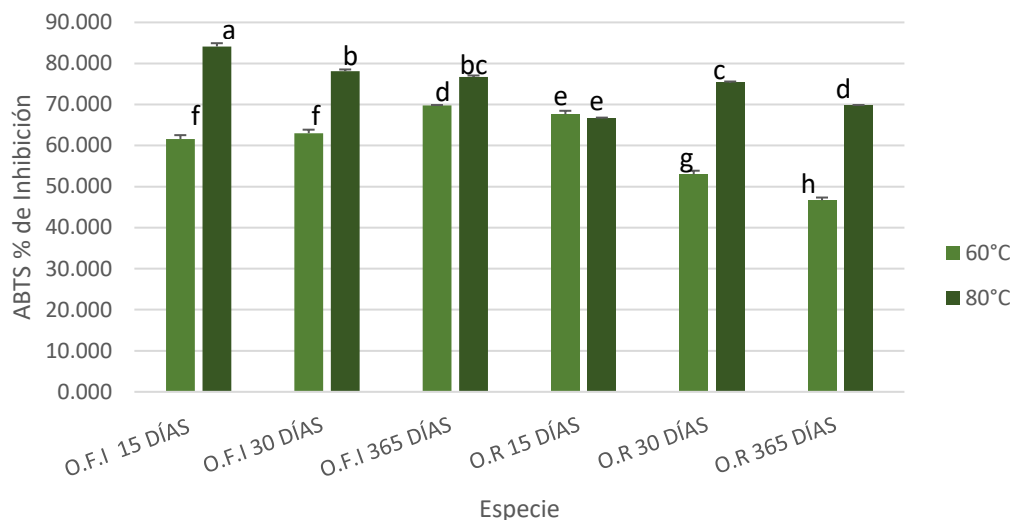
Al comparar los tratamientos con las muestras comerciales de nopal deshidratado, se evidencia que los tratamientos secados a 60 °C de la especie O.F.I., en las primeras etapas de madurez, presentaron valores superiores de

polifenoles totales en comparación con O.R. Al relacionarlos con las muestras comerciales, los valores obtenidos se asemejan principalmente a los tratamientos de O.R., con excepción de la muestra M8S, la cual presentó valores inferiores de este compuesto. En cuanto al contenido de flavonoides, la misma especie presentó los valores más altos de este metabolito, y al compararlos con las muestras comerciales, se observó una concentración similar, excepto en el polvo M8S, que mostró valores considerablemente menores. En general, esta variabilidad en los metabolitos secundarios entre los tratamientos experimentales y los polvos comerciales puede estar influenciada por diferentes factores, tales como las condiciones de secado o la fisiología del material vegetal utilizado en la elaboración de estos productos comerciales.

18.6.2. Evaluación de actividad antioxidante

En la gráfica 12 se muestran los resultados del porcentaje de inhibición del radical ABTS de los diferentes tratamientos de cladodios de nopal O.F.I. y O.R., secados a 60 °C y 80 °C en sus diferentes etapas de madurez, donde se observa que existen diferencias significativas entre especie, temperatura y etapa de madurez de cada uno de los polvos evaluados. En O.F.I. se evidenció un mayor porcentaje de inhibición en los tratamientos secados a 80 °C, los cuales oscilaron entre 75% y 85%, en comparación con los tratamientos secados a 60 °C, que presentaron valores entre 60% y 70% en los primeros 15 días de madurez.

En cuanto a O.R., los valores fueron inferiores a los obtenidos en O.F.I., alcanzando porcentajes de inhibición de 66% y 67% en los primeros 15 días, de 53% y 75% a los 30 días, y de 46% y 69% en los cladodios con 365 días de madurez. Estos resultados evidencian que, conforme avanza la etapa de crecimiento, el porcentaje de inhibición tiende a disminuir, lo que sugiere una reducción en el contenido de compuestos bioactivos presentes en los cladodios a medida que aumenta su madurez.

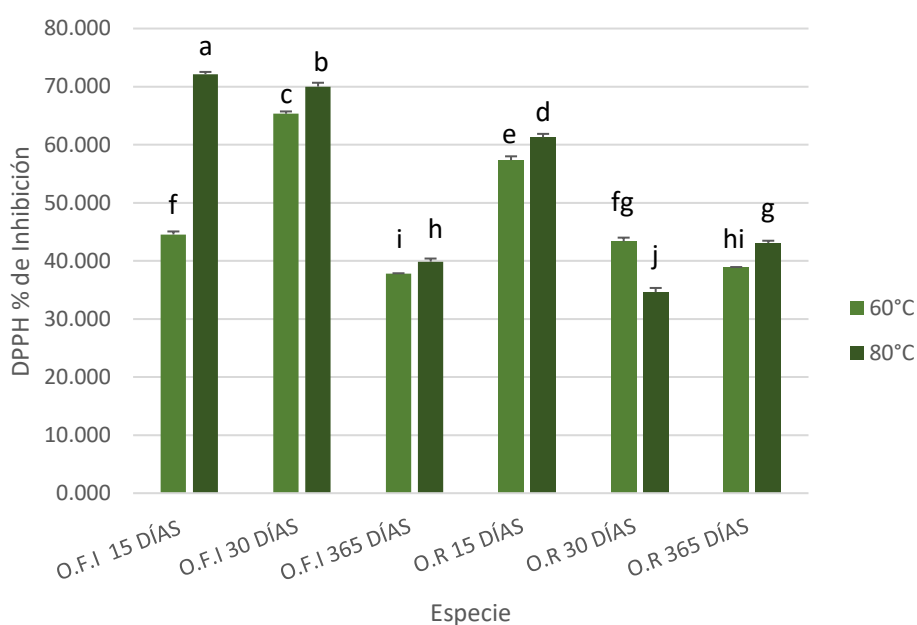


Grafica 12. Porcentaje de inhibición de los radicales libres ABTS^{•+} en extractos de polvos de nopal (*Opuntia ficus-indica* y *Opuntia robusta*) obtenidos a diferentes temperaturas de secado y etapas de madurez. O.F.I.: *Opuntia ficus indica*; O.R.: *Opuntia robusta*; a, b, c, d, e, f, g, h- en las barras, las diferentes letras indican la diferencias significativas entre las muestras a $p < 0.05$ mediante una prueba de Tukey.

De acuerdo con los resultados obtenidos del porcentaje de inhibición del radical libre ABTS^{•+} en los diferentes tratamientos de polvos de nopal, estos presentan cierta similitud con lo reportado por Uriarte-fr et al., (2021), quienes reportaron un valor de 93.48 % en polvos de nopal O.F.I., siendo superior a los obtenidos en el presente estudio, donde los valores registrados fueron inferiores al 85%. Estas diferencias pueden atribuirse a los distintos estados de madurez evaluados o a las condiciones empleadas en el proceso de obtención de los polvos de nopal.

En la gráfica 13 se ilustran los resultados del porcentaje de inhibición del radical DPPH en los diferentes tratamientos de polvos derivados de cladodios de nopal O.F.I. y O.R., secados a diferentes temperaturas y en distintos estados de maduración. Se observa que existen diferencias significativas entre cada uno de los tratamientos evaluados. Los polvos de O.F.I. secados a 80 °C evidenciaron un mayor porcentaje de inhibición del radical en los cladodios de 15 y 30 días de

madurez, con valores que oscilaron entre 70% y 72%, en comparación con los secados a 60 °C, donde los polvos de 30 días presentaron un porcentaje de inhibición de 65%. En cuanto a los polvos de O.R., los cladodios de 15 días de madurez secados a 80 °C mostraron un valor de 62% de inhibición del radical. En contraste, los secados a 60 °C presentaron un valor máximo de 57% en los cladodios de 15 días. Sin embargo, en los tratamientos correspondientes a 30 y 365 días de madurez, se observó una disminución progresiva de la actividad antioxidante conforme avanzó el crecimiento del cladodio.



Grafica 13. Porcentaje de inhibición de los radicales libres DPPH· en extractos de polvos de nopal (*Opuntia ficus-indica* y *Opuntia robusta*) obtenidos a diferentes temperaturas de secado y etapas de madurez.
O.F.I.: *Opuntia ficus indica*; O.R.: *Opuntia robusta*; a, b, c, d, e, f, g, h, i- en las barras, las diferentes letras indican la diferencias significativas entre las muestras a $p < 0.05$ mediante una prueba de Tukey

Por otra parte, los resultados del porcentaje de inhibición del radical DPPH en los diferentes tratamientos son similares a los reportados por Marques de Farias et al. (2021), quienes obtuvieron valores de 87.5% de inhibición en polvos de nopal O.F.I., mientras que en el presente estudio se registraron valores inferiores al 82%, encontrándose cercanos a lo reportado por dichos autores. Las pequeñas

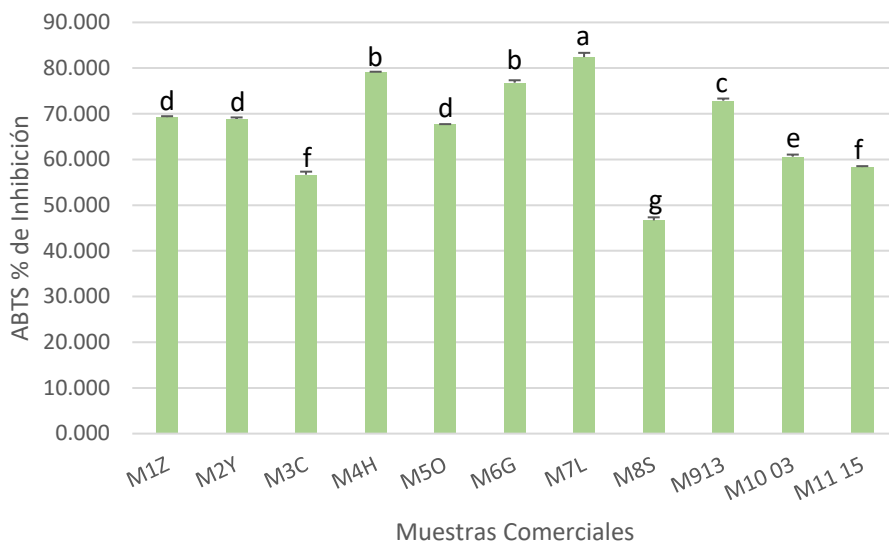
diferencias observadas entre los distintos estados de madurez pueden atribuirse a la etapa de crecimiento de los cladodios utilizados o al proceso de secado aplicado. Además, al comparar ambos métodos de capacidad antioxidante, se observó que los valores obtenidos mediante el método ABTS fueron superiores a los determinados por DPPH. Esto puede deberse a que el método ABTS presenta mayor sensibilidad o a las diferencias en los compuestos antioxidantes que cada método es capaz de detectar y cuantificar.

En la gráfica 14 se muestran los resultados del porcentaje de inhibición del radical ABTS de los diferentes polvos comerciales de nopal deshidratado. Se observa que existen diferencias significativas entre las distintas muestras evaluadas. La muestra M7L presentó el mayor porcentaje de inhibición del radical, con un valor de 82%, lo que indica una mayor capacidad antioxidante en comparación con las demás muestras analizadas.

Le siguieron las muestras M6G y M4H, las cuales presentaron valores de 76% y 79%, respectivamente, mostrando valores cercanos a los de M7L.

Por otra parte, las muestras M1Z, M2Y, M5O y M913 presentaron porcentajes de inhibición que oscilaron entre 67% y 72%, lo que sugiere una capacidad antioxidante moderada y una presencia intermedia de metabolitos bioactivos. Asimismo, las muestras M3C, M1003 y M1115 presentaron menores porcentajes de inhibición del radical ABTS, con valores cercanos entre 58 % y 62 %, evidenciando una menor eficiencia antioxidante.

Finalmente, la muestra M8S presentó el valor más bajo de inhibición, cercano al 45%, indicando una baja capacidad antioxidante en comparación con las demás muestras analizadas.



Grafica 14. Porcentaje de inhibición de los radicales libres $ABTS^{\cdot+}$ en extractos de polvos comerciales de nopal deshidratado.

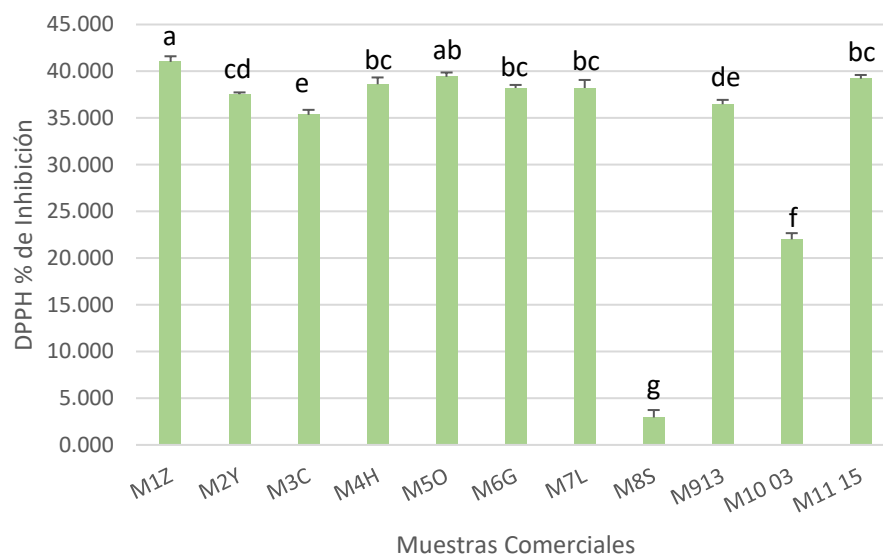
M: muestras; a, b, c, d, e, f, g, - en las barras, las diferentes letras indican la diferencias significativas entre las muestras a $p < 0.05$ mediante una prueba de Tukey

Al comparar las muestras comerciales con los diferentes tratamientos de los polvos de nopal O.F.I. y O.R., no se observaron diferencias marcadas entre ellas, ya que los valores ilustrados en las gráficas 12 y 14 fueron semejantes, con excepción de la muestra M8S, la cual presentó valores inferiores a los obtenidos tanto en los tratamientos experimentales como en las demás muestras comerciales. Esta variabilidad en los resultados de las muestras comerciales puede atribuirse principalmente a las diferentes materias primas utilizadas para la elaboración de estos polvos, así como a las distintas especies de *Opuntia* empleadas. Otro aspecto que puede influir en estas variaciones es el procesamiento industrial aplicado a cada producto, incluyendo las condiciones de secado y almacenamiento, ya que estos factores tienen una influencia directa sobre la conservación de los compuestos bioactivos responsables de la actividad antioxidante.

Por otro lado, en la gráfica 15 se muestran los resultados del porcentaje de inhibición del radical DPPH en los diferentes polvos comerciales de nopal deshidratado, donde se observaron diferencias significativas entre cada una de las muestras analizadas.

La muestra M1Z presentó el valor más alto, con un 41% de inhibición, mientras que la muestra M8S registró el valor más bajo en comparación con los demás polvos evaluados. En contraste, el resto de las muestras presentaron cierta similitud en los porcentajes obtenidos, ya que oscilaron en un intervalo entre 35% y 40% de inhibición del radical DPPH, de acuerdo con el análisis de Tukey ($p < 0.05$).

Este ensayo mostró valores más bajos en comparación con el análisis de ABTS, lo cual puede atribuirse a que el radical ABTS presenta una mayor reactividad y sensibilidad frente a diferentes compuestos antioxidantes. Por lo tanto, los diferentes polvos comerciales evidencian la presencia de compuestos bioactivos antioxidantes, principalmente fenoles y flavonoides, los cuales poseen la capacidad de neutralizar radicales libres de alta reactividad.



Grafica 15. Porcentaje de inhibición de los radicales libres DPPH· en extractos de polvos comerciales de nopal deshidratado. M: muestras; a, b, c, d, e, f, g, - en las barras, las diferentes letras indican la diferencias significativas entre las muestras a $p < 0.05$ mediante una prueba de Tukey

Al comparar los tratamientos de nopal O.F.I. y O.R. con los diferentes polvos comerciales de nopal deshidratado, las gráficas 13 y 15 evidencian diferencias en los valores obtenidos de capacidad antioxidante. Estos resultados indican que es posible obtener mejores respuestas antioxidantes mediante la aplicación de variables tecnológicas controladas, tales como la temperatura de secado, el estado de madurez y la especie utilizada.

Los polvos obtenidos bajo condiciones experimentales presentaron una mayor capacidad antioxidante en comparación con las distintas marcas comerciales, las cuales mostraron valores considerablemente inferiores. Esto puede atribuirse a que muchos productos comerciales no presentan un proceso estandarizado en cuanto a su obtención y procesamiento.

18.7. Análisis fisicoquímicos

En cuanto a los resultados obtenidos de las propiedades fisicoquímicas mostradas en la tabla 13, se observa que existen diferencias significativas ($p < 0.05$) entre la temperatura de secado y el estado de madurez de los polvos de cladodios de nopal O.F.I. y O.R. sobre parámetros como solubilidad, densidad y viscosidad. Los valores de solubilidad oscilaron entre 56.643 % y 78.190 %, presentando los valores más altos en los polvos de O.R. con 365 días de madurez secados a 60 °C y en O.F.I. con 15 días secados a 80 °C. Como se observa en la tabla, los tratamientos de O.F.I. secados a 60 °C mostraron una disminución progresiva de la solubilidad conforme avanzó el estado de madurez.

En contraste, en O.R. secado a la misma temperatura se observó que el porcentaje de solubilidad aumentó conforme incrementó el crecimiento de los cladodios. Esto puede atribuirse a los cambios en las dimensiones morfológicas de esta especie, tales como el grosor, largo y ancho de los cladodios, los cuales aumentan en mayor proporción en comparación con O.F.I. Asimismo, estos resultados también pueden atribuirse a la temperatura de secado aplicada en los diferentes tratamientos, ya que al aumentar la temperatura se puede provocar una mayor ruptura de las estructuras celulares de los cladodios, permitiendo que los compuestos hidrofílicos queden más expuestos e interactúen con el agua, favoreciendo así el incremento de la solubilidad. En cuanto a los valores de densidad, estos oscilaron entre 0.453 g/cm³ y 0.670 g/cm³ en los diferentes tratamientos, presentando el valor más alto el polvo de O.R. con 365 días de madurez secado a 80 °C. Estos resultados indican que tanto la temperatura de secado como el estado de madurez de los cladodios influyen en el acomodo de las partículas del polvo. A temperaturas más elevadas, las partículas tienden a compactarse, reduciendo los espacios de aire entre ellas y aumentando la densidad del polvo.

Por otra parte, los resultados obtenidos en viscosidad mostraron variaciones significativas entre los diferentes tratamientos de los polvos de nopal, presentando valores desde 61.667 cp hasta 1250.667 cp. El tratamiento O.F.I. de 15 días secado

a 80 °C presentó la mayor viscosidad, mientras que los polvos con mayor estado de madurez mostraron valores menores en este parámetro.

Este comportamiento puede atribuirse a que, conforme avanzan las etapas de crecimiento de los cladodios, ocurren cambios en su composición, principalmente en los polisacáridos, mucílagos y fibras solubles. Estos componentes poseen una alta capacidad de retención de agua, permitiendo la formación de soluciones viscosas.

Por lo tanto, en estados avanzados de madurez, dichos compuestos tienden a degradarse durante el desarrollo del cladodio, además de verse afectados por las altas temperaturas aplicadas durante el proceso de obtención del polvo.

Tabla 13. Propiedades fisicoquímicas (solubilidad, densidad y viscosidad) de los polvos de nopal (*Opuntia ficus-indica* y *Opuntia robusta*) obtenidos a diferentes temperaturas de secado y estados de madurez.

Tratamientos	Solubilidad (%)	Densidad (g/cm ³)	Viscosidad (Cp)
O.F.I 15 días 60°C	67.817 ± 0.746cd	0.516 ± 0.029bc	1085.000 ± 0.816 c
O.F.I 15 días 80°C	77.017 ± 0.697ab	0.571 ± 0.010abc	1250.667 ± 0.471a
O.F.I 30 días 60°C	65.133 ± 0.668e	0.479 ± 0.014bc	723.800 ± 0.535i
O.F.I 30 días 80°C	69.597 ± 0.688c	0.592 ± 0.03ab1	777.300 ± 0.374h
O.F.I 365 días 60°C	56.643 ± 0.494g	0.490 ± 0.023bc	653.333 ± 0.822j
O.F.I 365 días 80°C	58.160 ± 0.319g	0.541 ± 0.055bc	640.667 ± 0.403k
O.R 15 días 60°C	63.470 ± 0.399ef	0.538 ± 0.057bc	1157.033 ± 0.602b
O.R 15 días 80°C	68.460 ± 0.378cd	0.553 ± 0.045abc	874.933 ± 0.125f
O.R 30 días 60°C	75.530 ± 0.478b	0.453 ± 0.021c	970.600 ± 0.432d
O.R 30 días 80°C	67.133 ± 0.542d	0.580 ± 0.018abc	631.667 ± 0.125i
O.R 365 días 60°C	78.190 ± 0.237a	0.473 ± 0.051bc	935.800 ± 0.668e
O.R 365 días 80°C	62.650 ± 0.530f	0.670 ± 0.032a	834.600 ± 0.294g

Nota O.F.I.: *Opuntia ficus-indica*; O.R.: *Opuntia robusta*. Los resultados se expresan como media ± desviación estándar de los porcentajes de solubilidad, densidad y viscosidad. Las letras diferentes en las mismas columnas indican diferencias significativas ($p < 0.05$) según la prueba estadística Tukey

De acuerdo con los resultados obtenidos de los parámetros de solubilidad, densidad y viscosidad de los diferentes tratamientos de los polvos de nopal O.F.I. y O.R., el porcentaje de solubilidad presentó valores similares a los reportados por Choque-quispe et al., (2023), quienes obtuvieron resultados entre 80 % y 82 % en polvos de O.F.I. En el presente estudio se obtuvieron valores por debajo de 78 % en ambas especies evaluadas, lo cual puede atribuirse al estado de madurez de los cladodios utilizados, así como a las diferencias metodológicas empleadas en la determinación de este parámetro. Por otra parte, los resultados mostraron diferencias importantes con lo reportado por Pérez-Viveros et al., (2024), quienes registraron valores de 19.79 % en cladodios de *Opuntia cochenillifera* y 20.40 % en cladodios de *Opuntia ficus-indica*, siendo inferiores a los obtenidos en esta investigación. Estas diferencias pueden atribuirse a que dichos autores utilizaron cladodios con 70 días de madurez, además de aplicar una metodología distinta para la determinación de solubilidad. Asimismo, estos autores mencionan que la despolimerización puede incrementar el porcentaje de solubilidad, lo cual podría haber ocurrido en el presente estudio debido a la aplicación de diferentes temperaturas de secado.

En cuanto a los valores de densidad, los resultados presentaron similitud con lo reportado por García et al., (2024), quienes obtuvieron valores de 0.57 g/mL en cladodios de nopal O.F.I. En el presente estudio se registraron valores entre 0.453 g/cm³ y 0.670 g/cm³, encontrándose dentro del rango reportado por dichos autores. Asimismo, evaluaron otra especie, *Opuntia quimilo*, obteniendo un valor de 0.80 g/mL, superior a los registrados en esta investigación. Por otra parte, por Dietmar et al., (2021), reportaron valores de densidad entre 0.33 y 1.17 g/cm³ en cladodios de O.F.I., por lo que los resultados obtenidos en este estudio también se encuentran dentro de dicho intervalo. De igual manera, Nabil et al., (2020), obtuvieron valores de 0.65 a 0.83 g/cm³ en polvos de cladodios de O.F.I., mostrando concordancia con los resultados obtenidos en esta investigación. Las diferencias observadas entre los distintos estudios pueden atribuirse al uso de cladodios en diferentes estados de madurez, al proceso de obtención de los polvos e incluso al tamaño de partícula de los polvos de nopal evaluados. Por otro lado, los resultados de viscosidad de los

diferentes tratamientos presentan cierta similitud con lo reportado por Du Toit et al., (2019), quienes obtuvieron valores entre 200 y 1600 cp en cladodios de O.F.I. y entre 150 y 800 cp en cladodios de O.R. En el presente estudio se obtuvieron valores por debajo de 1250.667 cp en los diferentes tratamientos evaluados, observándose ligeras diferencias respecto a lo reportado por dichos autores. Estas variaciones pueden atribuirse al estado de madurez de los cladodios utilizados o a la metodología empleada para la determinación de viscosidad. Además, nos mencionan que diversos estudios reportan variaciones en este parámetro debido a la velocidad de rotación utilizada durante la medición. Cuando se emplean velocidades de rotación elevadas o bajas, la viscosidad final puede verse afectada, ya que el giro del husillo altera las estructuras moleculares presentes en el mucílago, las cuales son largas y flexibles. Estas moléculas tienden a orientarse en la dirección del movimiento del husillo, disminuyendo la fricción conforme reduce la velocidad de giro, lo que ocasiona lecturas menores de viscosidad.

En cuanto a los resultados de las propiedades fisicoquímicas de los diferentes polvos comerciales de nopal mostrados en la tabla 14, se evidencia que existen diferencias significativas ($p < 0.05$), las cuales pueden atribuirse al procesamiento industrial, la formulación o la materia prima utilizada en cada producto. En el parámetro de solubilidad, las diferentes muestras estudiadas presentaron valores que oscilaron entre 55.747% y 72.280%. Las muestras M7L y M2Y destacaron por presentar los valores más altos, mientras que el polvo M8S registró el valor más bajo. Un aspecto importante de estos resultados es que los mayores porcentajes de solubilidad en las muestras comerciales pueden atribuirse al uso de cladodios jóvenes, así como al proceso de secado aplicado, el cual pudo generar modificaciones en las estructuras celulares del cladodio, dejando más expuestos los compuestos hidrosolubles y favoreciendo su interacción con el agua. Por el contrario, los porcentajes más bajos de solubilidad podrían estar relacionados con el uso de cladodios más maduros, los cuales presentan una mayor cantidad de compuestos insolubles y estructuras celulares menos degradadas.

En cuanto a los resultados de densidad, se observaron valores entre 0.441 y 0.663 g/cm³ en los diferentes polvos comerciales de nopal. La muestra M8S presentó el mayor valor de este parámetro, a diferencia de la muestra M2Y, que registró uno de los valores más bajos en comparación con las demás muestras. Este comportamiento puede deberse a una mayor compactación de los polvos relacionada con el tamaño de partícula, la cual puede verse afectada por factores como el contenido de humedad, el proceso de reducción de tamaño y las condiciones de secado a las que fueron sometidos los cladodios utilizados para la obtención de los polvos. Por otra parte, los resultados de viscosidad mostraron una gran variabilidad entre los diferentes polvos comerciales, presentando valores que oscilaron entre 176.333 y 709.133 cp La muestra M1003 presentó el valor más alto de viscosidad, mientras que la muestra M8S registró el valor más bajo. El comportamiento observado en estas muestras puede estar relacionado con la composición presente en cada uno de los polvos estudiados, particularmente con el contenido de mucílago, fibras solubles y polisacáridos. Estos componentes poseen características hidrosolubles y tienen la capacidad de formar soluciones viscosas, tal como se reporta en la literatura científica.

Tabla 14. Propiedades fisicoquímicas (solubilidad, densidad y viscosidad) de los polvos comerciales de nopal deshidratado.

Muestras	Solubilidad (%)	Densidad (g/cm ³)	Viscosidad (Cp)
M1Z	63.893 ± 0.274c	0.468 ± 0.046c	439.433 ± 0.386d
M2Y	71.487 ± 0.727a	0.441 ± 0.010c	417.700 ± 0.852e
M3C	61.443 ± 0.788d	0.621 ± 0.073ab	624.667 ± 0.419c
M4H	62.080 ± 0.360d	0.554 ± 0.024abc	410.800 ± 0.572f
M5O	61.730 ± 0.455d	0.536 ± 0.057abc	294.533 ± 0.287h
M6G	60.570 ± 0.314d	0.521 ± 0.047abc	377.233 ± 0.450g
M7L	72.280 ± 0.498a	0.576 ± 0.026abc	636.500 ± 0.490b
M8S	55.747 ± 0.119e	0.663 ± 0.039a	176.333 ± 0.205k
M913	64.973 ± 0.487c	0.474 ± 0.030bc	286.867 ± 0.873i
M10 03	68.203 ± 0.113b	0.588 ± 0.051abc	709.133 ± 0.262a
M11 15	60.713 ± 0.237d	0.537 ± 0.024abc	282.567 ± 0.419j

Nota M: muestras comerciales. Los resultados se expresan como media ± desviación estándar del contenido de solubilidad, densidad, y viscosidad. Las letras diferentes en las mismas columnas indican diferencias significativas (p < 0.05) según la prueba estadística Tukey

En general, al comparar los resultados de las propiedades fisicoquímicas de los diferentes tratamientos de polvos de nopal O.F.I. y O.R. con los polvos comerciales de nopal, mostrados en las tablas 13 y 14, se evidencia que los polvos obtenidos de manera experimental presentaron mejores resultados en comparación con los productos comerciales disponibles en el mercado. Esto puede atribuirse a la selección de cladodios con estados de madurez adecuados y a la aplicación de procesos de secado controlados, los cuales permiten conservar características fisicoquímicas deseables. Por lo tanto, estos polvos experimentales presentan un mayor potencial para su aplicación en la industria alimentaria como ingredientes alternativos con mejores propiedades funcionales.

18.7.1. Color

En la tabla 15 se muestran los resultados obtenidos de los parámetros de color de los diferentes polvos de nopal O.F.I. y O.R., los cuales evidencian diferencias significativas ($p < 0.05$) entre los distintos tratamientos. Estos resultados indican que tanto la temperatura de secado como el estado de madurez influyen en las características de color de los diversos polvos evaluados.

Los valores obtenidos de luminosidad, tonalidad y saturación pueden atribuirse a los cambios en los pigmentos naturales presentes en el alimento como consecuencia del proceso de secado. En el parámetro de luminosidad (L^*), los valores oscilaron entre 64.61 y 88.85, donde el tratamiento O.R. 30 días a 60 °C presentó los valores más altos, indicando colores más claros. En contraste, el tratamiento O.R. 15 días a 80 °C presentó tonalidades más oscuras en el polvo obtenido. Estos cambios pueden atribuirse a que los pigmentos naturales son termosensibles, por lo que las altas temperaturas pueden provocar degradación del color o favorecer reacciones de pardeamiento no enzimático durante el proceso de secado aplicado.

Por otra parte, en cuanto a los valores del parámetro a^* (tonalidades verdes (-) y rojas (+)), se observaron valores entre -0.55 y 4.70. Los tratamientos que presentaron valores negativos indican una mayor presencia de tonalidades verdes, lo cual se asocia con una mejor conservación de las clorofilas en los polvos

obtenidos. En contraste, los valores positivos reflejan tonalidades rojizas o marrones, atribuidas a la degradación de los pigmentos naturales. Estos valores positivos se observaron principalmente en los tratamientos secados a 80 °C, indicando una alteración más pronunciada de los pigmentos debido al efecto de la temperatura durante el proceso de secado.

En cuanto a los valores obtenidos en el parámetro b^* (tonalidades amarillas), se observó una variabilidad entre los diferentes tratamientos, con valores que oscilaron entre 28.84 y 44.81. El tratamiento O.R. 365 días a 80 °C presentó los valores más altos en este parámetro, evidenciando una mayor presencia de tonalidades amarillas. Este comportamiento puede estar asociado a la presencia de pigmentos como los carotenoides, así como a la degradación de la clorofila ocasionada por el proceso de secado convectivo.

El ángulo de tono (h°) mostró valores entre 83° y 89°, indicando tonalidades amarillo-verdosas, características del nopal deshidratado. Las variaciones observadas en los valores obtenidos pueden atribuirse a las condiciones del proceso aplicado en cada uno de los tratamientos, así como al estado fisiológico de la materia prima utilizada.

En cuanto al croma (C), se observaron valores que oscilaron entre 28.86 y 450.04 en los diferentes polvos evaluados. El tratamiento O.R. 365 días a 80 °C presentó los valores más altos, indicando una mayor intensidad de color.

Este parámetro mide la intensidad o pureza del color; valores elevados indican colores más intensos y definidos, mientras que valores bajos reflejan tonalidades más opacas. Por lo tanto, en este estudio se evidenció una relativa estabilidad de ciertos pigmentos presentes en el alimento durante el proceso de secado convectivo.

En general, de acuerdo con los resultados obtenidos, se evidencia que la temperatura de secado y el estado de madurez influyen significativamente en los parámetros colorimétricos de los diferentes tratamientos, generando variaciones en la luminosidad, tonalidad e intensidad de color de los polvos de nopal.

Tabla 15. Parámetros de color (L^* , a^* , b^* , h° y C) de polvos de nopal (*Opuntia ficus-indica* y *Opuntia robusta*) deshidratados a diferentes temperaturas y estados de madurez.

Tratamientos	L^*	a^*	b^*	h°	C
O.F.I 15 días 60°C	80.48 ± 0.400de	0.98 ± 0.100d	28.84 ± 0.870f	88.06 ± 0.130a	28.86 ± 0.130e
O.F.I 15 días 80°C	79.82 ± 0.680e	4.67 ± 0.090a	38.42 ± 0.120c	88.17 ± 0.200d	33.61 ± 0.470bc
O.F.I 30 días 60°C	77.01 ± 0.670f	1.07 ± 0.110d	35.24 ± 0.950e	-89.54 ± 0.380a	36.95 ± 0.400d
O.F.I 30 días 80°C	76.77 ± 0.470f	4.70 ± 0.160a	38.48 ± 0.480c	-89.16 ± 0.010d	37.90 ± 0.620bc
O.F.I 365 días 60°C	82.91 ± 0.430cd	-0.30 ± 0.240e	36.95 ± 0.390cd	-89.36 ± 0.080e	41.33 ± 0.650c
O.F.I 365 días 80°C	73.96 ± 0.390g	2.19 ± 0.110c	37.33 ± 0.390cd	-89.28 ± 0.420b	37.03 ± 0.580c
O.R 15 días 60°C	74.95 ± 0.640g	-0.55 ± 0.010e	37.89 ± 0.620cd	83.07 ± 0.120e	38.70 ± 0.130c
O.R 15 días 80°C	64.62 ± 0.310h	3.55 ± 0.260b	38.47 ± 0.140c	83.03 ± 0.250c	38.77 ± 0.470c
O.R 30 días 60°C	88.85 ± 0.250a	-0.46 ± 0.060e	41.32 ± 0.650b	86.64 ± 0.130e	37.40 ± 0.400b
O.R 30 días 80°C	85.19 ± 0.560b	1.40 ± 0.020d	36.26 ± 0.580d	84.73 ± 0.390a	38.63 ± 0.140c
O.R 365 días 60°C	80.43 ± 0.200e	-0.46 ± 0.270e	37.02 ± 0.580cd	87.79 ± 0.050e	36.28 ± 0.580c
O.R 365 días 80°C	83.33 ± 0.480c	4.61 ± 0.340a	44.81 ± 0.350a	84.12 ± 0.430c	45.04 ± 0.360a

Nota O.F.I.: *Opuntia ficus-indica*; O.R.: *Opuntia robusta*. Los resultados se expresan como media ± desviación estándar de L^* = luminosidad, a^* = eje verde y rojo, b^* = eje azul y amarillo, h° = hue, C= croma. Las letras diferentes en las mismas columnas indican diferencias significativas ($p < 0.05$) según la prueba estadística Tukey

De acuerdo con los resultados obtenidos de los parámetros de color de los diferentes tratamientos de O.F.I. y O.R., los valores presentaron cierta similitud con lo reportado por Harrak, (2021), quien obtuvo valores de L^* 85.92, a^* -6.45 y b^* 33.55 en cladodios de nopal en polvo con 365 días de madurez. Por lo tanto, los resultados obtenidos en este estudio se encuentran dentro de los rangos reportados por dicho autor. Sin embargo, se observaron pequeñas variaciones en los cladodios con menos de 365 días de crecimiento, ya que este mismo autor reportó valores de L^* 90.11, a^* -8.60 y b^* 34.97, indicando polvos con tonalidades más verdes, características de cladodios frescos. En contraste, en el presente estudio se obtuvieron colores ligeramente más oscuros, lo cual puede atribuirse al proceso de secado convectivo aplicado durante la obtención de los polvos. Por otra parte, el autor Lahmidi et al., (2023), reportaron valores de hue (h°) de -1.31 y croma (C) de 23.57 en cladodios de nopal *Opuntia stricta*, los cuales presentan diferencias con los obtenidos en este estudio. Estas variaciones pueden atribuirse a la utilización de diferentes especies de cladodios, así como al estado de madurez evaluado, ya que dichos autores emplearon cladodios con más de un año de crecimiento. Además,

los autores mencionan que conforme los cladodios envejecen, disminuye el contenido de clorofila responsable de la coloración verde, favoreciendo la aparición de tonalidades amarillas.

En la tabla 16 se muestran los resultados obtenidos de los parámetros de color de los diferentes polvos comerciales de nopal deshidratado, los cuales presentaron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre cada una de las muestras analizadas, evidenciando una variabilidad en el aspecto visual de estos productos. Estas diferencias pueden atribuirse al proceso de secado aplicado a los cladodios de nopal, a la especie utilizada, así como al estado de madurez empleado para la obtención de los polvos. Los valores de luminosidad (L^*) oscilaron entre 70.99 y 89.47. Las muestras M8S y M7L presentaron los valores más altos, indicando polvos con tonalidades más claras. En contraste, las muestras M5O y M6G presentaron tonalidades más oscuras, lo cual puede reflejar una mayor degradación de los pigmentos verdes debido al proceso industrial aplicado o al uso de cladodios con mayor estado de madurez. En cuanto a los valores obtenidos en el parámetro a^* ((-) tonalidades verdes y (+) tonalidades rojas), estos oscilaron entre 0.83 y 8.38, evidenciando que todas las muestras presentaron tonalidades rojizas o marrones.

La muestra M1115 presentó el valor más alto en este parámetro, lo cual puede relacionarse con una mayor degradación de la clorofila durante el proceso de secado. En contraste, la muestra M8S presentó el valor más bajo, lo que podría atribuirse a una mejor conservación de la clorofila natural durante su proceso de obtención. Por otra parte, en el parámetro b^* (tonalidades amarillas), se observaron valores entre 21.88 y 31.48, evidenciando la presencia de tonalidades amarillas en las diferentes muestras. La muestra M1115 presentó el valor más alto, mientras que la muestra M8S registró el valor más bajo. Estos cambios pueden atribuirse a la presencia de otros pigmentos en los polvos, al proceso industrial de secado aplicado o incluso a las condiciones de almacenamiento del producto final. En cuanto al ángulo de tono (h°), los valores variaron entre 74.84 y 87.82, predominando tonalidades amarillentas como consecuencia de la degradación de pigmentos ocasionada por el secado convectivo. Sin embargo, la muestra M8S presentó

valores menores, indicando tonalidades más cercanas al verde-amarillo en comparación con las demás muestras, las cuales evidenciaron tonalidades rojizas y marrones.

Por otro lado, en el parámetro de croma (C), se obtuvieron valores entre 21.89 y 32.58. La muestra M1115 presentó el valor más alto, indicando una mayor intensidad de color, mientras que la muestra M8S mostró la menor intensidad. Estas variaciones pueden deberse a diferencias en la estabilidad de los pigmentos presentes en cada uno de los productos comerciales analizados.

Tabla 16. Parámetros de color (L^* , a^* , b^* , h° y C) de polvos comerciales de nopal deshidratado.

Muestras	L^*	a^*	b^*	h°	C
M1Z	77.85 ± 0.210d	6.12 ± 0.250cd	25.98 ± 0.650de	76.76 ± 0.350de	26.69 ± 0.680cd
M2Y	74.23 ± 0.360f	6.62 ± 0.200cd	24.96 ± 0.270ef	75.15 ± 0.350f	25.82 ± 0.300cd
M3C	75.61 ± 0.370e	5.99 ± 0.300d	25.02 ± 0.390ef	76.53 ± 0.650cd	25.73 ± 0.390cd
M4H	84.01 ± 0.430b	6.15 ± 0.170cd	29.23 ± 0.370bc	78.13 ± 0.190c	29.87 ± 0.400b
M5O	70.99 ± 0.380g	6.52 ± 0.150cd	24.05 ± 0.630f	74.84 ± 0.130f	24.92 ± 0.650d
M6G	71.73 ± 0.270g	7.07 ± 0.310bc	28.76 ± 0.650bc	76.19 ± 0.290def	29.61 ± 0.710b
M7L	88.65 ± 0.380a	4.10 ± 0.390e	25.21 ± 0.380ef	80.78 ± 0.730b	25.55 ± 0.440cd
M8S	89.47 ± 0.430a	0.83 ± 0.080f	21.88 ± 0.450g	87.82 ± 0.730a	21.89 ± 0.460e
M913	80.34 ± 0.580c	7.76 ± 0.360ab	29.70 ± 0.640ab	75.35 ± 0.750ef	30.70 ± 0.620ab
M10 03	74.35 ± 0.320ef	6.41 ± 0.210cd	27.79 ± 0.710cd	77.00 ± 0.330cd	28.52 ± 0.72bc
M11 15	80.00 ± 0.110c	8.38 ± 0.43a	31.48 ± 0.200a	75.10 ± 0.750f	32.58 ± 0.210a

Nota M: muestras comerciales. Los resultados se expresan como media ± desviación estándar del contenido de L^* = luminosidad, a^* = eje verde y rojo, b^* = eje azul y amarillo, h° = hue C = croma. Las letras diferentes en las mismas columnas indican diferencias significativas ($p < 0.05$) según la prueba estadística Tukey

En general, al comparar los resultados obtenidos de los parámetros de color de los diferentes tratamientos de O.F.I. y O.R. con los polvos comerciales de nopal deshidratado, mostrados en las tablas 15 y 16, se evidencian diferencias entre los diversos polvos evaluados. Los polvos obtenidos de manera experimental presentaron mejores características colorimétricas en comparación con los

productos comerciales disponibles en el mercado, ya que estos últimos mostraron tonalidades más rojizas y marrones, asociadas principalmente al proceso de secado aplicado.

Esto indica que, si no se mantiene un proceso estandarizado en cuanto a temperatura y tiempo de secado, puede ocurrir una mayor degradación de los compuestos naturales presentes en los polvos. Asimismo, las características visuales también pueden verse afectadas por el estado de crecimiento de los cladodios y por la especie utilizada, factores importantes para obtener productos deshidratados con mejores propiedades visuales.

18.7.2. Temperatura de transición vítrea

En la figura 11 se muestran los resultados obtenidos del comportamiento de transiciones térmicas de los diversos polvos de nopal O.F.I y O.R, a diferentes temperaturas de secado y de estado de madurez, observando diferentes curvas térmicas, reflejando así que cada una de las muestras presenta un patrón similar; tales como pérdida de humedad, degradación de mucílago, polisacáridos, compuestos nutricionales, así como la estabilidad estructural.

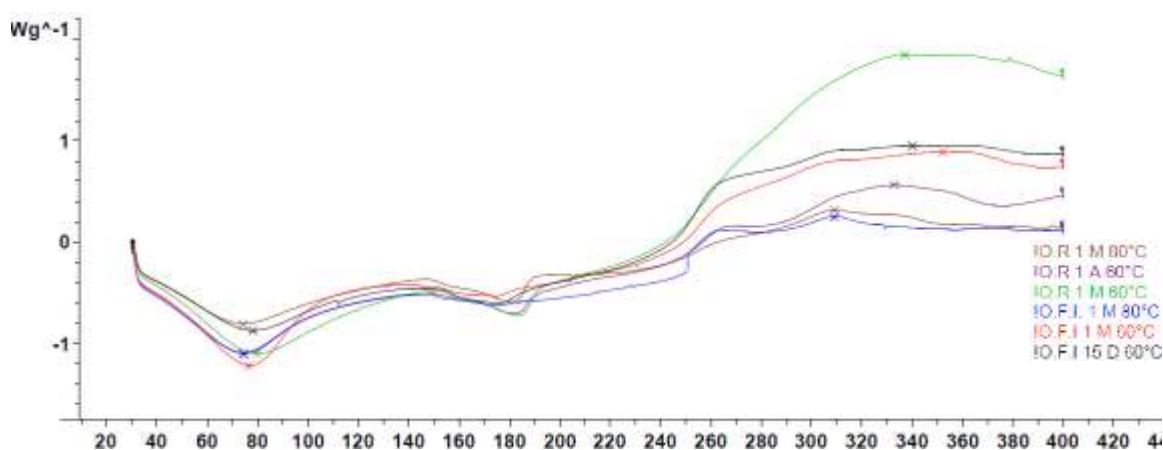


Figura 11. Termogramas DSC de los polvos de nopal (*Opuntia ficus-indica* y *Opuntia robusta*) a diferentes temperaturas de secado y estados de madurez.

Ahora bien, en los polvos de nopal O.F.I. obtenidos a diferentes temperaturas de secado y estados de madurez, mostrados en la gráfica 12, se observa que entre 40 °C y 100 °C aproximadamente ocurre la primera etapa de calentamiento, presentando curvas pronunciadas asociadas principalmente a la pérdida de humedad residual presente en los polvos. Las variaciones observadas en esta región pueden atribuirse a las diferentes temperaturas de secado aplicadas a cada uno de los tratamientos. Posteriormente, entre 140 °C y 165 °C se observan cambios relacionados con la degradación de compuestos y la transición vítrea (T_g) de las muestras. Los valores de T_g obtenidos fueron de 154.16 °C para O.F.I. 15 días a 60 °C, 153.45 °C para O.F.I. 30 días a 60 °C y 148.84 °C para O.F.I. 30 días a 80 °C. Estos resultados indican que las muestras secadas a 80 °C presentaron una menor respuesta térmica, posiblemente debido a los efectos del secado convectivo sobre la estructura de los compuestos presentes en el polvo.

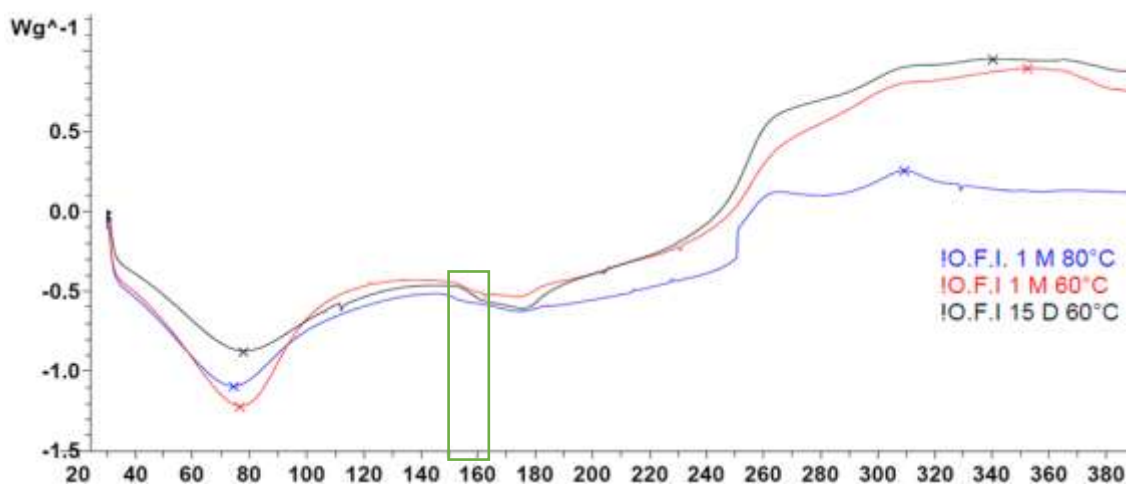


Figura 12. Termogramas DSC de los polvos de nopal (*Opuntia ficus-indica*) deshidratado a diferentes temperatura de secado (60°C y 80°C) y etapas de madurez (15 y 30 días).

Por otra parte, los resultados de los polvos de O.R. obtenidos a diferentes temperaturas de secado y estados de madurez, mostrados en la figura 13, también presentan cambios en la primera etapa de calentamiento entre 40 °C y 100 °C, asociados a la disminución de la humedad presente en los polvos. Sin embargo, se

observó una ligera diferencia en comparación con O.F.I., ya que las curvas no fueron tan pronunciadas, posiblemente debido a que los polvos conservaron un menor contenido de humedad después del proceso de secado. Posteriormente, entre 150 °C y 165 °C se observaron los valores de transición vítrea (T_g) de los diferentes polvos.

Los valores registrados fueron de 152.72 °C para O.R. 30 días a 60 °C, 151.41 °C para O.R. 365 días a 60 °C y 150.42 °C para O.R. 30 días a 80 °C. Estos resultados muestran que las muestras obtenidas a 80 °C presentaron una menor respuesta térmica, atribuida al efecto del secado convectivo sobre los componentes estructurales del polvo.

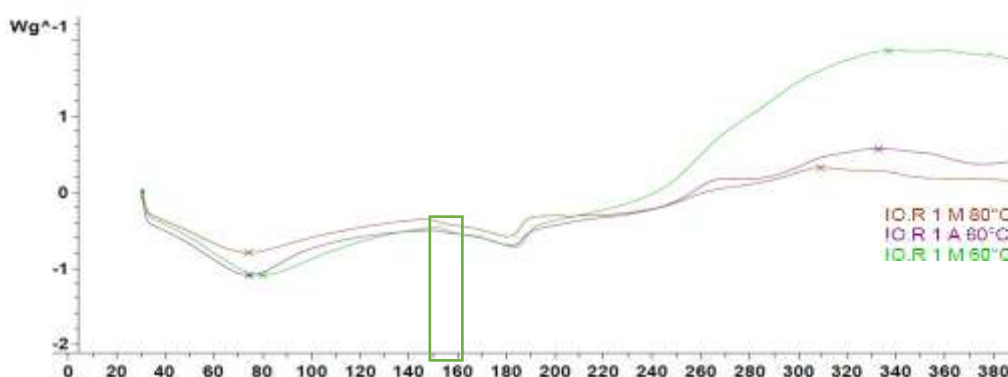


Figura 13. Termogramas DSC de los polvos de nopal (*Opuntia robusta*) deshidratado a diferentes temperatura de secado (60°C y 80°C) y etapas de madurez (30 y 365 días).

De acuerdo con los resultados obtenidos del comportamiento termogravimétrico de los diferentes polvos de nopal O.F.I. y O.R. secados a distintas temperaturas, mostrados en las figuras 13 y 14, se observa que los valores obtenidos presentan similitud con lo reportado por Otálora et al., (2019), quienes obtuvieron una curva térmica similar a la observada en este estudio. Dicha curva representa principalmente la pérdida de humedad residual, la cual ocurre entre 80 °C y 100 °C. Sin embargo, existen algunas diferencias con respecto a lo reportado por dichos autores, ya que ellos utilizaron únicamente mucílago de nopal O.F.I., además de emplear diferentes estados de madurez en el material evaluado. En cuanto a lo reportado por Camelo Caballero et al., (2019), estos autores presentaron

una pérdida de humedad entre 25 °C y 225 °C, con un pico máximo a 105.66 °C para este comportamiento térmico. Asimismo, reportaron una temperatura de transición vítrea (T_g) cercana a 273 °C en muestras de gelatina y mucílago de cactus.

Estos resultados difieren de los obtenidos en el presente estudio, donde se registraron valores menores de T_g . Estas diferencias pueden atribuirse a las especies utilizadas, así como al proceso industrial aplicado para la obtención de los polvos de nopal evaluados. Además de Rivera Cañón et al., (2021), reportaron un comportamiento similar en cuanto a la pérdida de humedad, registrando valores entre 60 °C y 100 °C asociados a la eliminación de agua libre y agua ligada en polvos de nopal O.F.I.

Los resultados obtenidos en el presente estudio se encuentran dentro de los rangos reportados por dichos autores. Sin embargo, existen pequeñas variaciones que pueden atribuirse a las diferencias metodológicas empleadas, así como a las especies de cladodios utilizadas y al estado de madurez evaluado en cada investigación.

En la figura 14 se muestran los resultados del comportamiento térmico de las diferentes curvas correspondientes a los polvos comerciales y algunos polvos experimentales de nopal O.F.I. y O.R. secados a 80 °C, observándose cambios significativos entre cada una de ellas. Las curvas térmicas presentan un patrón similar en las primeras etapas de calentamiento, donde se observa una disminución del contenido de humedad residual entre 40 °C y 100 °C, asociada a la pérdida de agua y otros compuestos volátiles presentes en los polvos. Conforme aumenta la temperatura, se observan variaciones en el comportamiento térmico de los diferentes polvos. Entre 120 °C y 220 °C se aprecia una posible degradación de compuestos como azúcares, mucílago y polisacáridos, principalmente en las muestras M8S y M913. Al comparar los polvos comerciales con los obtenidos de manera experimental, se observa que los productos comerciales presentan una menor estabilidad térmica, lo cual puede atribuirse a los procesos industriales

aplicados, la composición del material y las condiciones de almacenamiento de los cladodios utilizados para la obtención de dichos polvos. En contraste, los polvos experimentales mostraron un comportamiento más estable durante el calentamiento, evidenciando una mayor resistencia térmica.

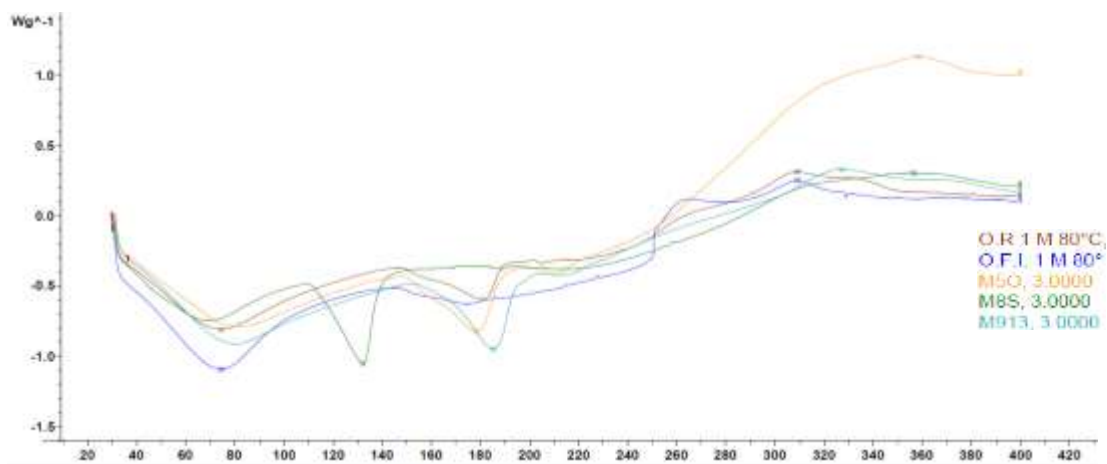


Figura 14.-Comportamiento térmico de polvos comerciales de nopal así como de los polvos de (*Opuntia ficus-indica* y *Opuntia robusta*) obtenidos por secado convectivo a diferentes temperatura a 30 días de crecimiento, determinado por análisis DSC.

19. Conclusiones

En función de la hipótesis planteada al inicio de esta investigación y de los resultados obtenidos, se concluye que fue posible estandarizar tiempos adecuados para la obtención de los diversos polvos de nopal O.F.I. y O.R., evitando periodos prolongados de secado convectivo y permitiendo preservar sus características químicas, fisicoquímicas y funcionales, manteniendo así la calidad del producto final.

Por otro lado, durante el secado convectivo de los diferentes tratamientos se obtuvieron polvos de cladodios de nopal de distintas especies y estados de madurez, observándose que los cladodios con 365 días de madurez presentaron mayores rendimientos en la obtención de polvo. Estos resultados indican que los cladodios con mayor estado de madurez pueden representar una mejor alternativa para su aprovechamiento industrial, ya que permiten obtener una mayor cantidad de producto en comparación con los cladodios jóvenes.

Por otro lado, el rendimiento de extracción de mucílago de los diferentes tratamientos de cladodios de nopal O.F.I. y O.R., en comparación con lo reportado en diversas investigaciones científicas, mostró que el tratamiento O.R. 365 días a 80 °C presentó los mejores rendimientos en este estudio, debido principalmente al mayor tamaño y grosor de los cladodios, concordando con lo reportado en la literatura. Además, se observó que los polvos sometidos a temperaturas de secado más elevadas presentaron mejores resultados de extracción, ya que los compuestos solubles quedan más expuestos como consecuencia de la degradación de la membrana celular durante el secado convectivo. Asimismo, los polvos comerciales presentaron diferencias en comparación con los obtenidos experimentalmente, lo cual puede atribuirse al estado de madurez de los cladodios utilizados y a los procesos industrializados aplicados durante la obtención de los polvos en la industria alimentaria.

Con respecto a los análisis proximales, los diferentes tratamientos de cladodios de nopal presentaron diferencias significativas entre sí. Al compararlos con investigaciones científicas reportadas, se observó que los polvos obtenidos cumplen con componentes adecuados y con una calidad nutricional aceptable, a

excepción del porcentaje de cenizas, cuyos valores fueron inferiores al 17 % en los diferentes tratamientos, posiblemente debido a las condiciones de cultivo aplicadas. En comparación con los polvos comerciales, también se observaron diferencias importantes en el contenido de cenizas, destacando la muestra M8S, la cual presentó un porcentaje considerablemente elevado, posiblemente asociado a la adición de materiales inorgánicos durante su formulación. Por lo tanto, se concluye que existe una alta variabilidad en la composición de los productos comerciales de nopal deshidratado.

En cuanto al contenido de azúcares reductores de los diferentes tratamientos aplicado evidencian que las condiciones de secado, así como el estado de madurez tiene diferencia significativo en los polvos de nopal en cuanto a este contenido, además las muestra sin hidrolizar presenta mayores concentraciones de azucares reductores que las hidrolizadas, indicando que existe modificaciones en las estructuras de los carbohidratos a causa de los procesos realizados. Los tratamientos que destacan mejores concentraciones son O.F.I 30 días a 80°C y O.R 365 días a 60°, así mismo la muestra comerciales presentaron similitud con los diferentes tratamientos a excepción de la muestra M5O debido al proceso industrial realizado o bien la materia prima utilizada.

Aunado a esto, el análisis TLC permitió identificar la posible presencia de monosacáridos, los cuales están asociados a polisacáridos estructurales y mucilaginosos característicos del nopal. Los tratamientos experimentales y las muestras comerciales mostraron similitudes principalmente con xilosa, manosa, arabinosa, ácido galacturónico y ramnosa, evidenciando la presencia de compuestos relacionados con hemicelulosas, pectinas y mucílagos

Con relación, al análisis al fitoquímico, presente atributos funcionales, esto respaldado con la cuantificación de polifenoles totales, flavonoides y capacidad antioxidante por el método de ABTS y DPPH, una vez después del proceso de secado de los cladodios de nopal O.F.I y O.R a diferentes temperatura de secado y al compararse con investigaciones científicas de la presencia de estos compuestos en los cladodios de nopal , evidencian que los mejores valores se obtuvieron en polvos de nopal O.F.I en etapas de crecimiento de 15 y 30 días de crecimiento.

Referente a los polvos comerciales de nopal deshidratados presenta valores muy variables en cuanto estos análisis fitoquímicos, a excepción de la muestra M8S, que muestra valores significativamente mejores debido al procesamiento industrial realizado que las que las demás, por lo que se puede deducir que utilizan cladodios de estas especies con estado de madurez muy alto el cual son casi similares al obtenido con este estudio.

Mientras que a los parámetros fisicoquímicos de polvos de nopal de O.F.I y O.R y al ser comparado con investigaciones científicas cumplen con parámetros adecuados en solubilidad densidad y viscosidad, evidenciando que los polvos secados a 80°C son los que obtienen mejores resultados, por su parte los polvos comerciales presentaron valores muy variables en solubilidad y viscosidad excepción de las densidades la cual ni muestras diferencia significativa entre los tratamientos con dichas muestras, a los que se evidencia que estos productos están elaborado con este tipo de cladodios de nopal pero con estado de crecimiento alto.

Adicionalmente, los parámetros colorimétricos de los diferentes tratamientos ya al comprarse con literatura científica cumplen con parámetros visuales deseables destacando con un color deseable O.R 15días a 80°C, además de tener diferencias significativas entre especie, estado de madures y temperaturas de secado, evidenciando colores verde – amarillas, en comparación con las muestras las cuales evidencian tonalidades rojizas o marrones en cada uno de los polvos, polo que no presentan aspectos visuales adecuados, a causas de los procesos de secados utilizados o a la utilización de cladodios con etapas de crecimiento altos.

Asimismo, el comportamiento termogravimétrico de los diferentes tratamientos así como de los polvos comerciales de nopal deshidratado, en comparación con investigaciones científicas cumple con la estabilidad térmica evidenciando que los tratamiento presentan una mejor estabilidad térmica que los polvo comerciales, temiendo una mejor conservación de compuestos estructurales como fibra mucílago y polisacáridos. En conjuntos estos resultados obtenidos mediante el DSC evidencian que las condiciones de secado así como el estado de madures, afecta la estabilidad y funcionalidad de los polvos como se muestras con los obtenido comercialmente.

Finalmente se determina que al obtener polvos de nopal con condiciones adecuadas, en el proceso industrial puede considerarse como un alimento funcional en la industria, para presentar mejores polvos comerciales a la sociedad por lo que si existe diferencias entre los polvos obtenidos de manera experimental y comercial en cuanto a ciertos análisis realizados en dicho estudio, debido a los procesos industriales aplicados en dichos polvos, almacenamientos o el utilizar cladodios más viejos para obtener mejores rendimientos del polvo.

20. Referencias

Abdel-Razek, A. G., Shehata, M. G., Badr, A. N., Gromadzka, K., & Stępień, L. (2019). The Effect of Chemical Composition of Wild *Opuntia Ficus Indica* Byproducts on its Nutritional Quality, Antioxidant and Antifungal Efficacy Adel the effect of chemical composition of wild *Opuntia ficus indica* byproducts on its nutritional quality, antioxida. *Egyptian Journal of Chemistry*, 62(Part 1), 47–61. <https://doi.org/10.21608/EJCHEM.2019.15895.1967>

Ayadi, M. A., 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(1), 40–47. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2009.01.003>

Becerá, M. Sc. S. M., Hernández, Antihus Gómez, Dr. C., Pereira, García, Annia, Dr. C., & Lagunas, Dra. L. M. (2013). Empleo del método de secado convectivo combinado para la deshidratación de papaya (*Carica papaya* L.), variedad Maradol roja Use of convective dry method combined for dehydration of papaya fruit (*Carica papaya* L.), variety Maradol roja. *Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 22, 31–37.

Beltran, IBQ. Y. G. C. (2022). Optimización del secado convectivo de nopal (*Opuntia ficus-indica* L.) en trozos y evaluación de parámetros de calidad.

Beyá-Marshall, V., Apablaza, E., Dias, A., & Sáenz, C. (2022). Physical and chemical characteristics of cladodes powder (*Opuntia ficus-indica* Mill.) of different maturation stages and drying temperatures. *Acta Horticulturae*, 1343, 519–524. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2022.1343.65>

Caminiti, R., Serra, M., Nucera, S., Ruga, S., Oppedisano, F., Scarano, F., Macr, R., Muscoli, C., Palma, E., Musolino, V., Statti, G., Mollace, V., & Maiuolo, J. (2024). *Antioxidant Activity and Seasonal Variations in the Composition of Insoluble Fiber from the Cladodes of Opuntia ficus-indica (L.) Miller: Development of New Extraction Procedures to Improve Fiber Yield.*

Cárdenas, A., Higuera-Ciapara, I., & Goycoolea, F. M. (1997). Rheology and Aggregation of Cactus (*Opuntia ficus-indica*) Mucilage in Solution. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, 2(February), 152–159.

Carpena, M., Cassani, L., Gomez-Zavaglia, A., Garcia-Perez, P., Seyyedi-Mansour, S., Cao, H., Simal-Gandara, J., & Prieto, M. A. (2023). Application of fermentation for the valorization of residues from Cactaceae family. *Food Chemistry*, 410(May 2022), 135369. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.135369>

Cruz-Rubio, J. M., Mueller, M., Viernstein, H., Loeppert, R., & Praznik, W. (2021). Prebiotic potential and chemical characterization of the poly and oligosaccharides present in the mucilage of *Opuntia ficus-indica* and *Opuntia joconostle*. *Food Chemistry*, 362(April). <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130167>

Cruz-rubio, M., Mueller, M., Viernstein, H., Loeppert, R., & Praznik, W. (2021). Prebiotic potential and chemical characterization of the poly and oligosaccharides present in the mucilage of *Opuntia ficus-indica* and *Opuntia joconostle*. 362(January). <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130167>

Daniloski, D., CD, N. M. D. C., E, H. S. c, A. J. M. cef, Natalie Alexopoulos , D. B. P. c h, I, A. T. P., & Naumovski, N. (2022). Los acontecimientos recientes sobre *Opuntia* spp. , su composición bioactiva, valores nutricionales y efectos sobre la salud. *Biociencia de Los Alimentos*, 47. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.101665>

Del Socorro Santos Díáz, M., Barba De La Rosa, A. P., Héliès-Toussaint, C., Guéraud, F., & Nègre-Salvayre, A. (2017). *Opuntia* spp.: Characterization and Benefits in Chronic Diseases. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/8634249>

Dick, M., Limberger, C., Cruz Silveira Thys, R., de Oliveira Rios, A., & Hickmann Flôres, S. (2020). Mucilage and cladode flour from cactus (*Opuntia monacantha*) as alternative ingredients in gluten-free crackers. *Food Chemistry*, 314(May 2019), 126178. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126178>

Diego-Zarate, L. M., Méndez-Zamora, G., Rivera-De Alba, J. A., & Flores-Girón, E. (2021). Efecto del nopal (*Opuntia* spp) deshidratado en polvo en las propiedades fisicoquímicas, texturales y sensoriales de salchichas Viena. *Biotecnia*, 23(2), 89–95. <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v23i2.1377>

Du Toit, A., De Wit, M., & Hugo, A. (2018). Cultivar and harvest month influence the nutrient content of *Opuntia* spp. Cactus pear cladode mucilage extracts. *Molecules*, 23(4). <https://doi.org/10.3390/molecules23040916>

Ferreira, R. M., Queffelec, J., Flórez-Fernández, N., Saraiva, J. A., Torres, M. D., Cardoso, S. M., & Domínguez, H. (2023). Production of betalain-rich *Opuntia ficus-indica* peel flour microparticles using spray-dryer: A holist approach. *Lwt*, 186(August). <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.115241>

García, A. L., Zamora, C. M. P., Michaluk, A. G., Nuñez, M. B., Gonzalez, A. M., & Torres, C. A. (2024). Caracterización fisicoquímica y funcional del mucílago obtenido a partir de cladodios de dos especies de *Opuntia*. *International Journal of Biological Macromolecules*, 283. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.137802>

Garfias Silva, V., Cordova Aguilar, M. S., Ascanio, G., Aguayo, J. P., Pérez-Salas, K. Y., & Susunaga Notario, A. del C. (2022). Acid Hydrolysis of Pectin and Mucilage from Cactus (*Opuntia ficus*) for Identification and Quantification of Monosaccharides. *Molecules*, 27(18), 1–12. <https://doi.org/10.3390/molecules27185830>

Harholt, J., Suttangkakul, A., & Scheller, H. V. (2010). Biosynthesis of pectin. *Plant Physiology*, 153(2), 384–395. <https://doi.org/10.1104/pp.110.156588>

Hernández, J., Cerón, A., Moctezuma, J., González, M., & Valdez, I. (2020). Procesamiento De Tuna De Nopal (*Opuntia Robusto*) a Partir Del Secado Por Aspersión Para La Obtención De Un Microencapsulado. *Revista de Ingeniería y Tecnologías Para El Desarrollo Sustentable*, 8(1), 30–35.

Hernández-Becerra, E., de los Angeles Aguilera-Barreiro, M., Contreras-Padilla, M., Pérez-Torrero, E., & Rodriguez-Garcia, M. E. (2022). Nopal cladodes (*Opuntia Ficus Indica*): Nutritional properties and functional potential. *Journal of Functional Foods*, 95(May). <https://doi.org/10.1016/j.jff.2022.105183>

Javier, F., Gonz, A., & Moshage, H. (2023). “Efecto del consumo profiláctico de frutos de *Opuntia robusta* en el daño hepático agudo inducido con diclofenaco.”

Jose M Remes-Troche, Taboada-Liceaga, H., Gill, S., Amieva-Balmori, M., Hernández-Ramírez, M. R. G., García-Mazcorro, J. F., & Whelan, K. (2021). Nopal fiber (*Opuntia ficus-indica*) improves symptoms in irritable bowel syndrome in the short term: a randomized controlled trial. *Neurogastroenterology & Motility*, 33(2). <https://doi.org/DOI:10.1111/nmo.13986>

Kivrak, Ş., Kivrak, İ., & Karababa, E. (2018). Analytical evaluation of phenolic compounds and minerals of *Opuntia robusta* J.C. Wendl. and *Opuntia ficus-barbarica* A. Berger. *International Journal of Food Properties*, 21(1), 244–256. <https://doi.org/10.1080/10942912.2018.1451342>

León-Martínez, F. M., Méndez-Lagunas, L. L., & Rodríguez-Ramírez, J. (2010). Spray drying of nopal mucilage (*Opuntia ficus-indica*): Effects on powder properties and characterization. *Carbohydrate Polymers*, 81(4), 864–870. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.03.061>

Mannai, F., Elhleli, H., Mosbah, M. Ben, Khiari, R., Nacer, S. N., Belgacem, M. N., & Moussaoui, Y. (2024). Comparative study of conventional and combined ultrasound-assisted methods on the quality of mucilage extracted from *Opuntia ficus-indica* cladodes. *Industrial Crops and Products*, 214. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118566>

Martins, A. C. S., Medeiros, G. K. V. D. V., Yandro, J., Silva, P., Viera, V. B., Barros, P. D. S., Lima, M. S., Silva, M. S., Tavares, J. F., Nascimento, Y. M., Silva, E. F., Soares, J. K. B., Souza, E. L. De, & Oliveira, M. E. G. De. (2022). Physical, Nutritional, and Bioactive Properties of Mandacaru Cladode Flour (*Cereus jamacaru* DC.): An Unconventional Food Plant from the Semi-Arid Brazilian Northeast. *Food*, 1–17. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/foods11233814>

McGarvie, D., & Parolis, H. (1981). Methylation analysis of the mucilage of *Opuntia ficus-indica*. *Carbohydrate Research*, 88, 305–314.

Medina-Torres, L., Vernon-Carter, E. J., Gallegos-Infante, J. A., Rocha-Guzman, N. E., Herrera-Valencia, E. E., Calderas, F., & Jiménez-Alvarado, R. (2011). Study of the antioxidant properties of extracts obtained from nopal

cactus (*Opuntia ficus-indica*) cladodes after convective drying. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 91(6), 1001–1005. <https://doi.org/10.1002/jsfa.4271>

Mendoza-Ávila, M., Gutiérrez-Cortez, E., Quintero-García, M., Real, A. Del, Rivera-Muñoz, E. M., Ibarra-Alvarado, C., Rubio, E., Jiménez-Mendoza, D., & Rojas-Molina, I. (2020). Calcium bioavailability in the soluble and insoluble fibers extracted from *Opuntia ficus indica* at different maturity stages in growing rats. *Nutrients*, 12(11), 1–15. <https://doi.org/10.3390/nu12113250>

Mill, T. O. L., Albergamo, A., Giorgia, A., Bella, G. Di, Amor, N. Ben, Vecchio, G. Lo, Nava, V., Rando, R., Mansour, H. Ben, & Turco, V. Lo. (2022). *Chemical Characterization of Different Products from the*. 1–19.

Missaoui, M., Antuono, I. D., Imperio, M. D., Linsalata, V., Boukhchina, S., Logrieco, A. F., & Cardinali, A. (2020). Characterization of Micronutrients, Bioaccessibility and Antioxidant Activity of Prickly Pear Cladodes as Functional Ingredient.

Monteiro, S. S., Queiroz, J. V. S. de A., Gomes, H. M., Santos, L., Moreira, J. C. F., Gelain, D. P., Fook, M. V. L., Lisboa, H. M., & Pasquali, M. A. de B. (2025). Characterization of mucilage from *Opuntia cochenillifera* cladodes: Rheological behavior, cytotoxicity, and antioxidant potential. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 707. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2024.135824>

Mounir, B., Younes, E. G., Asmaa, M., Abdeljalil, Z., & Abdellah, A. (2020). Physico-chemical changes in cladodes of *Opuntia ficus-indica* as a function of the growth stage and harvesting areas. *Journal of Plant Physiology*, 251(May), 153196. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2020.153196>

NMX-F-066-S-1978. (1998). 1–18.

NMX-F-089-S-1978. (1978). Determinación de extracto etéreo (Método Soxhlet) en Alimentos. *Norma Técnica Mexicana*, 3–6.

NOM-116-SSA1-1994. (1994). 4–6.

Núñez Ávila, R., Pérez Rivas, B., Motzezak Hernández, R., & Chirlino, M. (2012). Contenido de azúcares totales, reductores y no reductores en Agave cocui Trelease. *Multiciencias*, 12(2), 129–135.

Olicón-Hernández, D. R., Acosta-Sánchez, Á., Monterrubio-López, R., & Guerra-Sánchez, G. (2019). Quitosano y mucílago de Opuntia ficus-indica (nopal) como base de una película polimérica comestible para la protección de tomates contra Rhizopus stolonifer. *TIP Revista Especializada En Ciencias Químico-Biológicas*, 22(December), 0–9. <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2019.0.194>

Otálora, M. C., Wilches-Torres, A., & Gómez Castaño, J. A. (2021). Extraction and physicochemical characterization of dried powder mucilage from opuntia ficus-indica cladodes and aloe vera leaves: A comparative study. *Polymers*, 13(11). <https://doi.org/10.3390/polym13111689>

Peña -Valdivia, C. B., Trejo, C., Baruch Arroyo-Peña, V., Sá Nchez Urdaneta, A. B., & Morales, R. B. (2012). Diversity of Unavailable Polysaccharides and Dietary Fiber in Domesticated Nopalito and Cactus Pear Fruit (Opuntia spp.).

Pérez-Viveros, D. J., Díaz-Batalla, L., Navarro-Cortez, R. O., Palma-Rodríguez, H. M., & Hernández-Urbe, J. P. (2024). Effect of extrusion on physicochemical and functional properties of cladode flour from Opuntia cochenillifera and Opuntia ficus-indica. *Applied Food Research*, 4(2), 100568. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2024.100568>

Pinheiro, J. C., Silva, L. J. V., Lopes, B. K. A., Ferreira, N. L., Fonseca, K. S., Brito, F. A. L. de, Silva, T. G. F. da, Brito, A. M. S. S., Silva, I. D. de L., Vinhas, G. M., Nascim, A. do, & Simões, E. (2024). Efectos de las estaciones y tiempos de cosecha de clones de tuna sobre las propiedades fisicoquímicas y tecnológicas de las películas de mucílago y biopoliméricos resultantes. *International Journal of Biological Macromolecules*, Volume 257. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.128374>

Ponce-Luna, A., Pérez-Escalante, E., García-Curiel, L., Hernández-Hernández, A. A., Contreras-López, E., & Pérez-Flores, J. G. (2023). Potencial

del nopal (*Opuntia ficus-indica*) para su incursión en la industria de la confitería. *Investigación y Desarrollo En Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 8(1), 491–500. <https://doi.org/10.29105/idcyta.v8i1.66>

Quintero-García, M., Gutiérrez-Cortez, E., Bah, M., Rojas-Molina, A., Cornejo-Villegas, M. de los A., Real, A. Del, & Rojas-Molina, I. (2021). Comparative analysis of the chemical composition and physicochemical properties of the mucilage extracted from fresh and dehydrated *Opuntia ficus indica* cladodes. *Foods*, 10(9), 1–18. <https://doi.org/10.3390/foods10092137>

Renally de Lima Moura a, B, L. M. G. D., C, M. da V. S. do N., C, J. C. N. de O., D, V. B. V., B, B. S. D., E, R. G. C., F, M. S. da S., G, A. N. de M., F, Y. M. do N., F, J. F. T., & Soares, J. K. B. (2023). The aim of this research was to evaluate the effect of cactus flour on the anxious-like behavior and. Our data demonstrated that consumption of cactus flour by rats promoted anxiolytic effects and minimized brain lipid peroxidation in aging. *Giv. Physiology & Behavior*, 272. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2023.114360>

Reyes Escogido, M. de L., Barrón Vilchis, D., Zavala Martínez, L. G., & Angulo Romero, F. (2023). *Opuntia robusta* mucilage combined with alginate as encapsulation matrix for *Lactiplantibacillus plantarum*. *CYTA - Journal of Food*, 21(1), 126–132. <https://doi.org/10.1080/19476337.2023.2168303>

Ribeiro, E. M. de O., Silva, N. H. da, Lima Filho, J. L. de, Brito, J. Z. de, & Silva, M. da P. C. da. (2015). Study of carbohydrates present in the cladodes of *Opuntia ficus-indica* (fodder palm), according to age and season. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 30(4), 933–939. <https://doi.org/10.1590/s0101-20612010000400015>

Rodrigues, C., Paula, C. D. de, Lahbouki, S., Meddich, A., Outzourhit, A., Rashad, M., Pari, L., Coelhoso, I., Fernando, A. L., & Souza, V. G. L. (2023). *Opuntia* spp.: An Overview of the Bioactive Profile and Food Applications of This Versatile Crop Adapted to Arid Lands. *Foods*, 12(7), 1465. <https://doi.org/10.3390/foods12071465>

Ruiz-Gutiérrez, M. G., Amaya-Guerra, C. A., Quintero-Ramos, A., Pérez-Carrillo, E., & Meléndez-Pizarro, C. O. (2017). Use of Red Cactus Pear (*Opuntia*

figus-indica) Encapsulated Powder to Pigment Extruded Cereal. *Journal of Food Quality*, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/7262464>

Salas, A., Félix, C., Ruth, E., & Paucar, E. (2023). Efectividad del deshidratado de nopal (opuntia ficus indica) en polvo en control de hipercolesterolemia en adultos y adultos licenciado (a) en enfermería. Dra. Ramirez Montalvo de Luque, Rosalinda Huánuco-Perú.

SIAP. (2023). Agricultura regenerativa, la vía para un futuro sustentable. *Sistema de Informacion Agricola y Pesquera (SIAP)*, 1, 220.

Silva, L. E. P. da, Moreira, S. R., Neves, N. de A., Aguiar, E. V. de, Capriles, V. D., Amaral, T. N., & Schmiele, M. (2024). Use of Integral Forage Palm Flour as an Innovative Ingredient in New Fettuccine-Type Pasta: Thermomechanical and Technological Properties, and Sensory Acceptance. *Foods*, 13(17). <https://doi.org/10.3390/foods13172683>

Silva, M. A., Albuquerque, T. G., Pereira, P., Ramalho, R., Vicente, F., Oliveira, M. B. P. P., & Costa, H. S. (2021). Opuntia ficus-indica (L.) mill.: A multi-benefit potential to be exploited. *Molecules*, 26(4), 1–20. <https://doi.org/10.3390/molecules26040951>

Singleton, V. L., Orthofer, R., & Lamuela-Raventós, R. M. (1999). Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of folin-ciocalteu reagent. *The Lancet Global Health*, 9(2), e144–e160. [https://doi.org/10.1016/S2214-109X\(20\)30489-7](https://doi.org/10.1016/S2214-109X(20)30489-7)

Soria-Melgarejo, G., Raya-Pérez, J. C., Ramírez-Pimentel, J. G., Covarrubias-Prieto, J., Gutiérrez-Benicio, G. M., Andrade-González, I., & Aguirre-Mancilla, C. L. (2024). Physicochemical, nutritional properties, and antioxidant potential of ‘limilla’ fruit (Rhus aromatica var. schmidelioides (Schltdl.) Engl.). *Heliyon*, 10(15). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e34990>

Stephanie, V.-J. G., Han, M., Javier, A. G. F., Antonio, G.-P. H., Manon, B.-H., Lara, F. G., Sánchez-Alemán, E., Martínez-Hernández, S. L., Juárez, J. V., & Mar, M. C. M.-S. (2023). Caracterización molecular y antioxidante del extracto de fruta de Opuntia robusta y su efecto protector contra la lesión

hepática aguda inducida por diclofenaco en un modelo de rata in vivo. *Antioxidantes (Basilea)*.

Syariah, K. B., & Ilmu, G. (2018). EVALUACIÓN QUÍMICA, FÍSICA Y TECNOLÓGICA DE PURÉS DE PITAYA (*Stenocereus griseus*) CON MUCÍLAGO DE NOPAL (*Opuntia robusta* Wendl) COMO INGREDIENTES EN EL DESARROLLO DE “MUFFINS.” september 2016, 1–6.

Teshager, A. A., Atlabachew, M., & Alene, A. N. (2024). Development of biodegradable film from cactus (*Opuntia Ficus Indica*) mucilage loaded with acid-leached kaolin as filler. *Heliyon*, 10(11), 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31267>

Torres-Ponce, L., Reyna, Morales-Corral, Dayanira, Ballinas-Casarrubias, de L., María, & Nevárez-Moorillón, V. G. (2015). El nopal: planta del semidesierto con aplicaciones en farmacia, alimentos y nutrición animal*. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6, 1129–1142.

Valle, gustavo A. C. (2021). Recuperación de cubierta vegetal y control de erosión por medio de técnicas de bioingeniería, maguey (*Agave salmiana*) y nopal (*Opuntia robusta*) en el Parque Ecológico Cubitos, Pachuca de Soto, Hidalgo.

Yeshius, V. M. E., & Freddy, O. A. D. (2018). PAN FORTIFICADO CON LENTEJA (*Lens Culinaris*) Y LINAZA (*Linum Usitatissimum*), DISEÑO DE MEZCLADORA-AMASADORA. *Bitkom Research*, 63(2), 1–3.

Yusri, A. Z. dan D. (2020). Evaluación del contenido de fenoles, flavonoides y fructosa de una bebida a partir de la hoja y el fruto del nopal (*Opuntia ficus-indica*). *Jurnal Ilmu Pendidikan*, 7(2), 809–820.