



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLÁN

---

---

Caracterización física y química de sólidos  
granulares de nopales con diferente estadio de  
maduración

TESIS  
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERA EN ALIMENTOS

PRESENTA:  
MARISOL RODRÍGUEZ JIMÉNEZ

ASESORA:  
Dra. Elsa Gutiérrez Cortez  
COASESORA:  
I.Q. Guadalupe Franco Rodríguez

CUAUTITLÁN IZCALLI, ESTADO DE MÉXICO, 2018



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.





UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN  
UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR  
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTO APROBATORIO

M. en C. JORGE ALFREDO CUÉLLAR ORDAZ  
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLAN  
PRESENTE

ATN: I.A. LAURA MARGARITA CORTAZAR FIGUEROA  
Jefa del Departamento de Exámenes Profesionales  
de la FES Cuautitlán.

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos comunicar a usted que revisamos el: Trabajo de Tesis

**Caracterización física y química de sólidos granulares de nopales con diferente estadio de maduración.**

Que presenta la pasante: **Marisol Rodríguez Jiménez**

Con número de cuenta: 302819234 para obtener el Título de la carrera: Ingeniería en Alimentos

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro **VOTO APROBATORIO**.

**ATENTAMENTE**

**"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"**

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 16 de Mayo de 2018.

**PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO**

	NOMBRE	FIRMA
<b>PRESIDENTE</b>	Dra. Elsa Gutiérrez Cortez	
<b>VOCAL</b>	M. en C. Sandra Margarita Rueda Enríquez	
<b>SECRETARIO</b>	M. en C. Araceli Ulloa Saavedra	
<b>1er. SUPLENTE</b>	I.Q. Guillermo Martínez Morua	
<b>2do. SUPLENTE</b>	I.A. Janeli Solís Garfias	

NOTA: los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional (art. 127).



## DEDICATORIAS

Dedico este proyecto a mi familia...

A mis padres **Guadalupe** y **Felipe**, por su amor incondicional, por la paciencia que me han tenido siempre, sobre todo por el esfuerzo y sacrificios tan grandes que han hecho por mi y mis hermanos. Gracias por todo su tiempo invertido.

A mis hermanos **Oscar** y **Andrea**, por ser mis amigos y compañeros de toda la vida, por todas las risas, peleas y recuerdos, por enseñarme con su ejemplo a siempre ser auténtica y fiel a mi misma.

A mis perritos **Popeye**, **Puck** y **Pankun**, aunque se que no pueden leer esto, son mi gran inspiración, gracias por sacar lo mejor de mi y convertirme en un mejor ser humano.

Los quiero mucho, sin ustedes nada tendría sentido...



## AGRADECIMIENTOS

Agradezco principalmente a mi asesora la **Dra. Elsa Gutiérrez Cortez**, por su apoyo incondicional, por todo el tiempo dedicado, su comprensión, consejos, confianza, ya que su invaluable soporte fue fundamental para lograr este trabajo.

Gracias por que su apoyo fue más allá del trabajo de Tesis, como el gran ser humano que es siempre me brindo su ayuda y consejos ante cualquier adversidad.

A la **M. en I.Q. Alicia del Real López**, por el análisis e interpretación de las imágenes obtenidas por Microscopía Electrónica de Barrido, de las muestras del trabajo de Tesis, realizadas en el Laboratorio de Microscopía, perteneciente al Laboratorio Nacional de Caracterización de Materiales, CFATA, UNAM.

A la **Dra. María de los Angeles Cornejo Villegas** por el apoyo técnico brindado, por el análisis y la interpretación en la caracterización de las muestras realizadas en el Laboratorio de Procesos de Transformación y Tecnologías Emergentes de Alimentos UIM FES-Cuautitlán campo 4.

Agradezco al **Programa Interno de Apoyo para Proyectos de Investigación “PIAPI 1647”** Evaluación y diseño de sistemas nanoparticulados para la conservación refrigerada y/o congelada de productos de origen vegetal. Proyecto de investigación interno FES-CUAUTITLÁN.





---

## CONTENIDO

Índice general.....	1
Lista de Figuras.....	3
Lista de Tablas.....	5
RESUMEN.....	6
INTRODUCCIÓN.....	7
<b>1. ANTECEDENTES</b>	
1.1. Generalidades del Nopal.....	10
1.2. Origen y distribución.....	11
1.3. Importancia histórica y económica.....	12
1.4. Taxonomía y descripción botánica.....	14
1.4.1 Taxonomía.....	14
1.4.2 Morfología.....	15
1.5. Usos del Nopal.....	16
1.6. Composición química y valor nutritivo.....	18
1.7. Estructura del Nopal.....	19
1.8. Propiedades funcionales y medicinales del Nopal.....	21
1.9. La fibra soluble e insoluble en los alimentos.....	23
1.10. Operaciones unitarias utilizadas en la elaboración de sólidos de nopal.....	25
1.10.1 Secado.....	25
1.10.2 Reducción de tamaño.....	29
1.10.3 Análisis granulométrico.....	30
1.11. Técnicas de análisis para la evaluación de sólidos de nopal.....	32
1.11.1 Determinación de color.....	32
1.11.2 Microscopia electrónica de barrido.....	33
1.11.3 Espectroscopia de absorción atómica.....	34
1.11.4 La determinación de pH.....	35
1.11.5 Análisis químico proximal.....	36
<b>2. METODOLOGÍA</b>	
Objetivo general.....	37
Objetivos particulares.....	37
Cuadro metodológico.....	38



---

2.1. Descripción de actividades preliminares.....	39
2.2. Actividades para el Objetivo 1.....	40
2.3. Actividades para el objetivo 2.....	41
2.4. Actividades para el objetivo 3.....	43
2.5. Actividades para el objetivo 4.....	45
2.5.1 Reducción de tamaño.....	45
2.5.2 Análisis granulométrico.....	47
2.6. Actividades para el objetivo 5.....	51
2.6.1 Determinación de color.....	51
2.6.2 Determinación de pH.....	53
2.7. Actividades para el objetivo 6.....	53
2.7.1 Determinación de humedad por secado en estufa.....	54
2.7.2 Determinación de cenizas.....	54
2.7.3 Determinación de proteína cruda (PC) o bruta (nitrógeno total microkjeldahl).....	55
2.7.4 Determinación del extracto etéreo (EE).....	55
2.7.5 Determinación de fibra dietética insoluble y fibra dietética soluble.....	56
2.7.6 Determinación de calcio.....	57
<b>3. RESULTADOS Y ANÁLISIS</b>	
3.1. Actividades preliminares.....	59
3.2. Resultados del objetivo 1: Caracterización.....	59
3.3. Resultados del objetivo 2: Morfología.....	59
3.4. Resultados del objetivo 3: Optimizar establecimiento de las condiciones de secado.....	62
3.5. Resultados del objetivo 4: Reducción de tamaño y análisis granulométrico.....	64
3.6. Resultados del objetivo 5: Color y pH.....	67
3.7. Resultados del objetivo 6: Análisis químico Proximal (AQP) y calcio.....	71
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>74</b>



---

RECOMENDACIONES.....	75
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	76
<b>Lista de Figuras</b>	
Figura 1.1 Pintura de la recolección de tuna por un español.....	10
Figura 1.2 Distribución de los nopales en el mundo.....	12
Figura 1.3. Producción de nopalitos en México en 2015.....	13
Figura 1.4) Partes anatómicas de cladodios de nopal <i>Opuntia ficus indica</i> . a) parte externa (colénquima); b) parte interna (parénquima).....	19
Figura 1.5 partes del parénquima a) Idioblastos de nopal (células mucilaginosas), b) Oxalatos de calcio.....	20
Figura 1. 6 Clasificación de Secadores.....	28
Figura 1.7 Molino Pulverizador de turbina.....	30
Figura 1.8 Rotap y serie de tamices.....	31
Figura 1.9 Colorímetro Minolta a) Tablero, b) Brazo de lectura.....	32
Figura 1.10 Microscopio electrónico de barrido.....	33
Figura 1.11 Espectrofotómetro de absorción atómica.....	35
Figura 1.12 Equipo para determinar el pH.....	36
Figura 1.13 Análisis químico proximal (AQP).....	36
Figura 2.1 Cuadro metodológico.....	38
Figura 2.2 Rancho los Lores en Silao estado de Guanajuato.....	39
Figura 2.3 nopales cortados con diferente estado de maduración.....	40
Figura 2.4 nopales o cladodios de diferente peso y espesor.....	40
Figura 2.5 Corte longitudinal a los nopales de diferente edad.....	41
Figura 2.6 Montaje para observar la morfología de las fracciones de nopal; a) Porta muestras de bronce; b) Porta muestras con muestra pegada; c) Baño de oro a las muestras; d) Porta muestras en el carro en el interior del microscopio; e) microscopio electrónico; f) captura de las micrografías en la computadora.....	42
Figura 2.7 Preparación de las muestras de nopales para el secado a) desespinado, b) corte longitudinal, c) troceado de nopales.....	43
Figura 2.8 Muestras de nopal deshidratadas de 50 días (200g), 100 días (400g), 150 días (600 g).....	45



---

Figura 2.9 Molienda de nopal a) Pulvex 200, b) Sólidos granulares de nopal.....	46
Figura 2.10 Análisis granulométrico a) Ro-tap b) serie de tamices.....	48
Figura 2.11. Ejemplo de gráfico diferencial de distribución de partícula.....	49
Figura 2.12. Gráfica acumulativa de FTR y FTP.....	50
Figura 2.13 Determinación de color de sólidos granulares de nopal; a) Colorímetro Minolta Modelo CR300, b) Llenado con sólidos granulares de nopal harina del dispositivo de sólidos y toma de lectura.....	51
Figura 2.14 Círculo de color L* a* b*.....	52
Figura 2.15 Determinación de pH de muestras de nopal deshidratado a) preparación de las soluciones b) medición de pH.....	53
Figura 2.16 Determinación de cenizas de nopal deshidratado.....	55
Figura 2.17 Determinación de extracto etéreo.....	56
Figura 2.18 Determinación de fibra dietética insoluble y fibra dietética soluble.....	57
Figura 2.19 Derminación de calcio.....	58
Figura 3.1 Micrografías de nopales de diferente estado de maduración para la identificación de oxalatos a) De 50 días, b) De 100 días, c) De 150 días.....	60
Figura 3.2 Micrografías de nopal de diferente estado de maduración para identificar células buliformes. a) De 50 días, b) De 100 días, c) De 150 días.....	61
Figura 3.3 Cinética de secado del nopal de 100 días en horno de aire forzado a 3 diferentes temperaturas.....	62
Figura 3.4 Cinética de degradación de proteína del nopal de 100 días durante el secado en estufa.....	63
Figura 3.5 Muestras de nopal deshidratado a diferentes edades.....	64
Figura 3.6 Sólidos granulares de nopal de diferentes edades.....	65
Figura 3.7 Gráfica diferencial de sólidos granulares de nopal.....	66
Figura 3.8 Gráfica acumulativa de sólidos granulares de nopal.....	67
Figura 3.9 Valores de luminosidad de muestras de nopal.....	68



---

Figura 3.10 Valores de croma de sólidos granulares de nopal obtenidas con diferentes estadios de madurez.....	69
Figura 3.11 Valores de hue de las muestras de harina de nopal obtenidas con diferentes estadios de madurez.....	70
Figura 3.12 Evaluación del pH de las muestras de harina de nopal obtenidas con diferentes estadios de madurez.....	71
Figura 3.13 Concentración de calcio de nopal deshidratado.....	72

### **Lista de tablas**

Tabla 1.1 Taxonomía del nopal.....	14
Tabla 1.2. Composición química de cladodios de distintas edades (porcentaje materia seca).....	18
Tabla 2.1. Representación tabular del análisis granulométrico.....	48
Tabla 3.1 Dimensiones y peso de nopales con diferente estado de maduración.....	59
Tabla 3.2 Consumo de potencia y energía consumida de nopal deshidratado...	65
Tabla 3.3 Análisis químico proximal del nopal deshidratado.....	71



---

## RESUMEN

El nopal es una cactácea de origen mexicano con un importante contenido de nutrientes. Esta planta es abundante en nuestro país el cual desataca como el principal productor. El objetivo del presente trabajo fue evaluar las características de nopal deshidratado con tres estados de maduración 50, 100 y 150 días, mediante pruebas fisicoquímicas, morfológicas, análisis químico proximal, análisis granulométrico, cantidad de fibra soluble e insoluble y concentración de calcio presente, para poder recomendar los cladodios de mayor aporte nutrimental. La variedad utilizada fue redonda *Opuntia ficus indica*. Se caracterizaron cladodios de diferente estado de maduración, mediante su peso, espesor y dimensiones. De las unidades experimentales, se obtuvieron micrografías de nopal con diferente estado de maduración, mediante microscopia electrónica de barrido a bajo vacío para evidenciar su distinta morfología. Se introdujeron en el microscopio electrónico de barrido a alto vacío (JEOL, modelo JSU-5600 AV). Las micrografías se captaron a diferentes ampliaciones para identificar las sales de calcio y las células buliformes. Los cladodios fueron cortados en piezas con tamaño de 2x4 cm para deshidratarse, de edad de 100 días de maduración y peso aproximado de 400 g, posteriormente se realizó el secado por convección en estufa a diferentes temperaturas 50, 60 y 70 °C, para encontrar las mejores condiciones de secado hasta una humedad del 4 % utilizando como parámetro los cambios en proteína cruda (PC) o bruta (nitrógeno total Microkjeldahl). Se realizó la determinación de acuerdo al método 2001.11 usando 0.5 g de muestra en un equipo Microkjeldahl BUCHI. Posteriormente se redujo el tamaño de nopales deshidratados de diferente estado de maduración, mediante la aplicación de fuerzas de cizalla e impacto en un molino de martillos móviles Pulvex 200, obteniendo la potencia y gasto de energía. Para realizar el cálculo del gasto de energía se utilizó un amperímetro digital Steren Mul-100 (EU) que se colocó en uno de los cables de corriente para registrar la cantidad de corriente eléctrica consumida durante la operación de molienda, este registro se grabó y luego se obtuvo una gráfica de amperaje vs tiempo. La restricción a la salida se llevó a cabo con una criba de 0.5 mm. Las velocidades de alimentación al molino fueron constantes a 10 g/s para todas las muestras molidas. Se evaluó su granulometría de los sólidos granulares de nopal deshidratado de diferente estado de maduración. Se seleccionó la serie de tamices rigurosa USA de acuerdo a pruebas preliminares con número de mallas 20, 25, 35, 40, 45, 50, 60, 70, 80, 100, 120, 140, 170, 200, 230, 270, 325, 400 y charola, adicional mediante pruebas de color, pH, diferenciando sus propiedades físicas y químicas. Se determinó el análisis químico proximal y la concentración de calcio presente en las tres muestras. Las unidades experimentales con mayor aporte nutrimental fueron las de 150 días, con pesos de nopal de 600 g. Estas muestras fueron las de mayor cantidad de fibra soluble e insoluble. Las muestras de mayor edad tienen un bajo costo hasta de 0.25 pesos por nopal de 600 g. Adicionalmente son las unidades experimentales más abundantes en los huertos y sembradíos. Por otro lado nopales deshidratados tienen un promedio de vida útil de hasta siete años, siempre y cuando se mantengan a humedad del 4 % en lugares ventilados y a temperaturas promedio de 20 °C.

**Palabras clave:** *Buliformes, granulometría, nopal, micrografías, sólidos.*



---

## INTRODUCCIÓN

En América el nopal ha tenido un importante papel en el desarrollo de las culturas en el centro, norte y sureste por ser un alimento considerado como verdura fresca, juega un papel importante en su vida económica, social, religiosa y fundamentalmente en la salud.

El nopal es una cactácea perteneciente al género *Opuntia*. Este vegetal, como casi todos los nopales en México, tiene una gran diversidad de usos, muchos de los cuales están ligados a la alta concentración de mucílago presente en sus cladodios (Ginestra *et al.*, 2009). Los nopales para ser comercializados como verdura fresca deben tener pesos menores de 150 g. Los nopales de mayor tamaño hasta de 180 g se destinan a la elaboración de nopal mínimamente procesado. La edad de los nopales determina la concentración de sales de calcio, de magnesio, potasio, fibra insoluble y fibra soluble (Rodríguez-García *et al.*, 2007). Su elevado contenido de agua (90-96 % g/100g) hace que su vida útil sea muy corta de 7 a 15 días sin acondicionamiento, dependiendo de la tasa de respiración y de la temperatura en que se almacenen. Nopales de pesos mayores de 200 g no se consumen en frescos por su textura extremadamente fibrosa, pero se deshidratan y muelen para obtener sólidos granulares (Contreras-Padilla *et al.*, 2012). Adicionalmente, nopales de este peso no se comercializan como verdura y su costo es por lo menos seis veces menor.

El deshidratado hace que estos sólidos granulares concentren sus nutrientes y sean alternativas de ingredientes naturales muy deseables para la salud ósea y gastrointestinal (Rojas-Molina *et al.*, 2015). Últimamente, se han estudiado más a fondo las propiedades nutrimentales del nopal para fortificar alimentos (Cornejo-Villegas *et al.*, 2010). Así como también, el potencial del mucílago para ser utilizado para mejorar las propiedades funcionales en la industria alimentaria (Sáenz *et al.*, 2004).

En la dieta autóctona del pueblo mexicano el nopal fue utilizado ampliamente como remedios y medicina correspondiente a la herbolaria con fines terapéuticos, como bálsamo para la piel, como protector del sistema digestivo, pomada para quemaduras entre otros usos sin un sustento científico. Hoy en día el nopal es



---

reconocido de manera internacional debido a su composición. Al nopal se le atribuyen ciertos efectos terapéuticos en el organismo como por ejemplo, es considerado como un agente anticarcinogénico, antiviral, antiinflamatorio, cardiovascular, auxiliar en la obesidad, además de que ayuda a reducir los niveles de colesterol y azúcar en sangre, estos efectos en la salud están ampliamente comprobados (Stintzing y Carle, 2005; Feugang-Magloire *et al.*, 2006). En la actualidad, el asunto tiene aún mayor importancia, dado que se le ha considerado como un nutraceutico con efectos benéficos a la salud (Sáenz *et al.*, 2004).

Hoy en día es posible encontrar en el mercado una gran variedad de formas farmacológicas con varias marcas y presentaciones, entre los que destacan tabletas, cápsulas, comprimidos. El hecho que los nopales formen parte de la dieta humana desde hace al menos 9000 años y que se encuentren presentes en zonas extremas, desde los desiertos más cálidos hasta las montañas nevadas, da una idea de la gran utilidad de esta planta (Nobel, 1998). Sin embargo, su consumo predominante es en fresco; más aún, en la mayoría de los países son muy limitadas las formas de industrialización.

Hay una gran tarea por delante para que los habitantes de muchos países que disponen de estas plantas en forma silvestre o que las pueden cultivar sin mayores dificultades, desarrollen pequeñas agroindustrias o al menos conozcan las diversas formas de consumo que presentan sus diferentes partes. Sin duda, la agroindustria es el motor de la agricultura, por lo que cualquier esfuerzo en este sentido se reflejará en beneficio de los campesinos y agricultores, muchas veces habitantes de zonas de escasos recursos en las que ocurren en muchas ocasiones, hambre y desnutrición. (FAO, 2006).

México es el productor principal de nopal verdura (74 %) en el mundo y el consumidor más importante en su forma fresca y procesada, pero el mercado extranjero, principalmente el de EE.UU. y Canadá, es una oportunidad creciente. Las características nutraceuticas de los nopales han despertado interés en mercados europeos y asiáticos (Peña-Valdivia *et al.*, 2012) pues son benéficos para el tratamiento de diversos padecimientos (Stintzing y Carle, 2005), y además



---

son fuente de vitamina C (Betancourt-Domínguez *et al.*, 2006), minerales (Rodríguez-Félix y Cantwell, 1988) y fibra soluble e insoluble (Peña- Valdivia *et al.*, 2012). Ningún otro país produce tanto nopal ni cuenta con 104 variedades de esta cactácea como México. Sus propiedades nutricionales y medicinales cobran tal importancia a nivel mundial que China ambiciona un acuerdo con productores mexicanos a fin de garantizar el abasto para su industria y Japón se ha convertido en el segundo destino de exportación del país, aseguró Margarita García de Alba, presidenta del Consejo de Promoción del Nopal y de la Tuna (Comentuna, 2009).

Así pues, por la creciente demanda que se tiene hoy día de consumir productos naturales y/o naturistas considerados como alimentos funcionales trajo el interés a este proyecto el obtener sólidos granulares de nopales con diferente estado de maduración y caracterizarlos con el fin de mostrar cual presenta el mayor aporte nutrimental a la salud humana.

Para obtener estos sólidos granulares es necesario hacer uso de diferentes operaciones unitarias y de diversas técnicas para caracterizar las diferentes unidades experimentales.



### 1.1 Generalidades del nopal

El interés del ser humano por los nopales data de miles de años. Su origen e historia están íntimamente relacionados con las antiguas civilizaciones mesoamericanas, en particular con la cultura azteca. Existen evidencias arqueológicas que permiten afirmar que fueron las poblaciones indígenas asentadas en las zonas semiáridas de Mesoamérica las que iniciaron su cultivo de modo formal (Pimienta, 1990).

Es muy probable que ya en los muestrarios de plantas y animales llevados a España por Cristóbal Colón se incluyeran nopales y otras cactáceas como muestra de la exótica flora del nuevo mundo (Velásquez, 1998; Barbera, 1999). Cuando Hernán Cortés llegó al Valle de México en 1519, no pudo menos que asombrarse ante los *nopalli* (término náhuatl que significa nopal) y las tunas (*nochtli*), sus atractivos y deliciosos frutos. En la Figura 1 se presenta una pintura donde un español recolecta el fruto del nopal.



Fuente: Pimienta (1990)

Figura 1.1 Pintura de la recolección de tuna por un español



---

El nopal ha sido motivo de atención en nuestro país desde tiempos remotos. La importancia que tuvo entre las tribus prehispánicas quedó registrada en sus tradiciones, códices y monumentos. Los mexicas ya utilizaban el nopal en su alimentación, como medicina, en la industria y las artes. Su uso fue adoptado por los conquistadores, colonos y la población mestiza y criolla, siendo uno de sus usos principales como hospedero de la grana o "cochinilla" para cultivarla y obtener el color rojo carmín. Actualmente, el nopal ha adquirido gran importancia debido al uso integral que se puede hacer de él y por el potencial que ofrece en los diversos ámbitos en que se puede aprovechar, como es la industria alimentaria (humana y animal), la medicina, la cosmetología, manejo biotecnológico, conservación de suelo, construcción, etc. (Pimienta, 1990).

## **1.2 Origen y distribución**

La familia *Cactaceae*, es endémica del continente Americano, donde por lo general crece en regiones áridas y semiáridas (Flores-Valdez *et al.*, 1995).

México es considerado el centro de origen del nopal y en donde la mayoría de las 104 especies del género *Opuntia* crecen de manera silvestre, de las cuales 60 son endémicas en nuestro país (Labra *et al.*, 2003; Griffith, 2004).

El nombre científico le fue asignado por Tournefort en 1700, por su semejanza con una planta espinosa que crecía en el poblado de Opus en Grecia (Velásquez, 1998; Scheinvar, 1999). Esta especie una vez introducida en España desde México, se distribuyó por toda la cuenca del Mediterráneo. Probablemente los primeros nopales fueron cultivados cerca de Sevilla o Cádiz, puntos terminales de los viajes a las Indias (Barbera e Inglese, 1999). Es así como actualmente existen en forma silvestre o cultivada en el sur de España, y en toda la cuenca del Mediterráneo: Francia, Grecia, Italia y Turquía, llegando hasta Israel. Los árabes la llevaron desde España a África, difundiéndose en Argelia, Egipto, Eritrea, Etiopía, Libia, Marruecos y Túnez. Sin embargo, su distribución es aún mayor; en el continente americano, se encuentra desde Canadá a Chile, en Argentina, Bolivia, Brasil, Colombia, Chile, Estados Unidos de América, México, Perú, Venezuela, varios países de América Central y el Caribe; en otros continentes se encuentra en Angola, Sudáfrica, en Australia y la India, existiendo especies tanto cultivadas



como silvestres. En estos países, se encuentra parte de las más de 5 000 millones de hectáreas de zonas áridas y semiáridas del planeta y sus pueblos buscan especies que puedan desarrollarse y prosperar en su hábitat como muestra la Figura 1.2.



Fuente: FAO (2006)

**Figura 1.2 Distribución de los nopales en el mundo**

### **1.3 Importancia histórica y económica**

El interés del ser humano por los nopales data de miles de años. Su origen e historia están íntimamente relacionados con las antiguas civilizaciones mesoamericanas, en particular con la cultura azteca. Existen evidencias arqueológicas que permiten afirmar que fueron las poblaciones indígenas en las zonas semiáridas de Mesoamérica las que iniciaron su cultivo de modo formal (Pimienta, 1990).

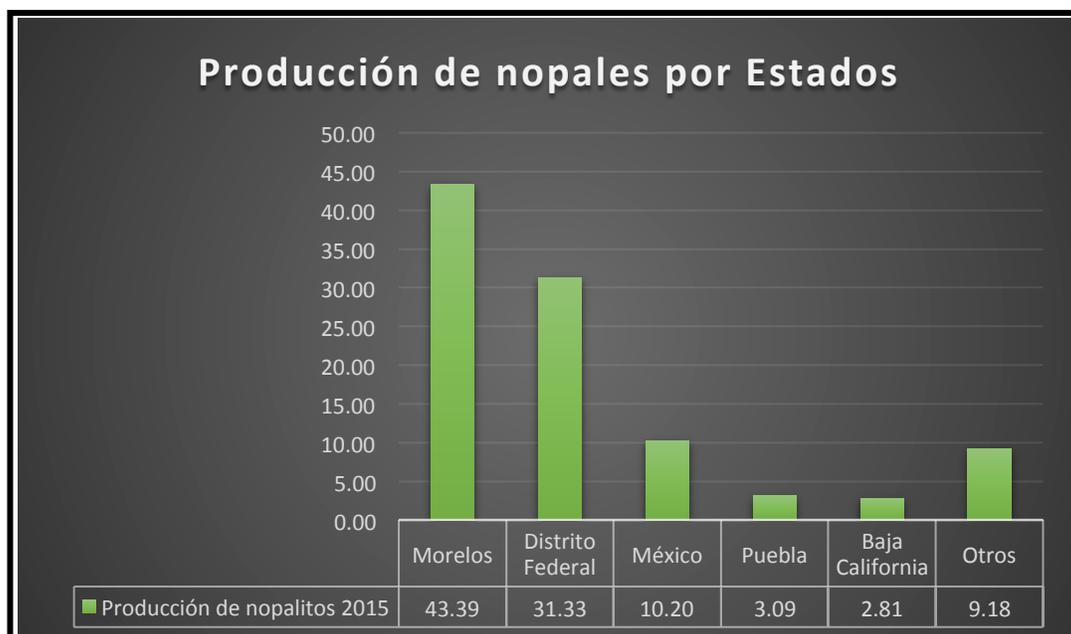
Los nopales están ligados de modo particular a la historia de México y Mesoamérica, su centro de origen genético; por ejemplo, en el escudo de México figura un águila posada sobre un nopal, un símbolo que ha llegado hasta nuestros días del jeroglífico de la Gran Tenochtitlán y significa *sitio del nopal que crece*



sobre la piedra. Ésta, era la ciudad de los sacrificios de los náhuatlés, capital del Imperio azteca, hoy ciudad de México, para los que tuvo especial relevancia en la vida económica, social y religiosa (Granados y Castañeda, 1996; Flores-Valdez, 2003).

La evidencia del conocimiento y uso del nopal por los primeros pobladores mexicanos se encuentra en las excavaciones de Tamaulipas y Tehuacán, Puebla, donde se encontraron fosilizadas semillas y cáscaras de tuna, así como fibras de pencas de nopal, de una antigüedad de siete mil años (Flores-Valdez, 2003).

México es el principal productor de nopal con un 90% de la producción mundial (SAGARPA, 2011). En 25 estados se producen nopalitos, de acuerdo con datos del SIAP, en el 2015 la producción fue de 812,705.09 toneladas, con Morelos a la cabeza de la producción nacional con 3903 ha sembradas y con una producción de 352,602.7 toneladas (Ver Figura 1.3).



Fuente: SIAP (2015)

**Figura 1.3. Producción de nopalitos en México en 2015**

Le sigue el Distrito Federal con 2,918 ha sembradas y una producción de 254,610.8 toneladas. Otras entidades cuya producción es importante, son los estados de México con 82,903.06 toneladas, Puebla con 25,142.61 toneladas y Baja California con 22,860.15 toneladas.



## 1.4 Taxonomía y descripción botánica

Se conocen casi 300 especies del género *Opuntia*. Sin embargo, hay solo 10 o 12 especies utilizadas por el hombre, ya sea para producción de fruta y nopalitos para alimentación humana, forraje o cochinilla para obtención de colorante. Entre los que destacan: *Opuntia ficus-indica*, *O. amyclaea*, *O. xocconostle*, *O. megacantha* y *O. streptacantha* Especies silvestres: *Opuntia hyptiacantha*, *leucotricha* y *robusta*. Se han descrito hasta la fecha 125 géneros y 2,000 especies. En México se cuenta con más de 100 especies del género *Opuntia*, y es en las zonas semiáridas donde existe la variación más amplia (Bravo, 1978; Sáenz *et al.*, 2006).

### 1.4.1 Taxonomía

Según diversos autores reportan la taxonomía del nopal en el cuadro 1.1

Tabla 1.1 Taxonomía del nopal

<b>Nombre común:</b>	<b>Nopal (México)</b>
<b>Nombre científico:</b>	<i>Opuntia ficus indica</i> (L.) Millar
<b>Reino:</b>	Vegetal
<b>Subreino:</b>	Embryophita
<b>División:</b>	Angiospermae
<b>Clase:</b>	Dicotiledoneae
<b>Subclase:</b>	Dialipetalas
<b>Orden:</b>	Opuntiales
<b>Familia:</b>	Cactaceae
<b>Subfamilia:</b>	Opuntioideae
<b>Tribu:</b>	Opuntiae
<b>Género:</b>	Opuntia
<b>Subgénero:</b>	Platyopuntia

Fuente: Bravo, (1978), Sáenz, (2006)



---

## 1.4.2 Morfología

Los nopales son plantas arbustivas, rastreras o erectas que pueden alcanzar 3.5 a 5 m de altura. Uno de sus mayores atractivos es su anatomía y morfología adaptada a condiciones de fuerte estrés ambiental, por lo que son una alternativa de cultivo para regiones donde difícilmente crecen otras especies.

### Raíz

El sistema radical es muy extenso, densamente ramificado, rico en raíces finas o absorbentes y superficiales en zonas áridas de escasa pluviometría. La longitud de las raíces está en relación con las condiciones hídricas y con el manejo cultural, especialmente el riego y la fertilización (Sudzuki *et al.*, 1993; Sudzuki, 1999).

### Tallos

Los tallos suculentos y articulados o cladodios, comúnmente llamados pencas, presentan forma de raqueta ovoide o alongada alcanzando hasta 60-70 cm de longitud, dependiendo del agua y de los nutrientes disponibles. Cuando miden 10-12 cm son tiernos y se pueden consumir como verdura. El aumento del área del cladodio dura alrededor de 90 días. Sobre ambas caras del cladodio se presentan las yemas, llamadas aréolas, que tienen la capacidad de desarrollar nuevos cladodios, flores y raíces aéreas según las condiciones ambientales (Sudzuki *et al.*, 1993). Las aréolas presentan en su cavidad espinas, que generalmente son de dos tipos: algunas pequeñas, agrupadas en gran número (gloquidios) y las grandes que son, según algunos botánicos, hojas modificadas (Granados y Castañeda, 1996). Cuando el hombre entra en contacto con la planta las espinas se pueden desprender y penetrar en la piel, constituyendo un serio inconveniente tanto para la cosecha de los frutos como para el procesamiento y consumo de los mismos. Los tallos se lignifican con el tiempo y pueden llegar a transformarse en verdaderos tallos leñosos, agrietados, de color ocre blancuzco a grisáceo.

### Flor

Las flores son sésiles, hermafroditas y solitarias, se desarrollan normalmente en el borde superior de las pencas. Su color es variable: hay rojas, amarillas, blancas, entre otros colores. En la mayor parte del mundo la planta florece una vez al año; sin embargo, en Chile bajo ciertas condiciones ambientales y con suministro de



---

agua en verano, se presenta una segunda floración en marzo, que da origen a la llamada fruta «inverniza» (Sudzuki *et al.*, 1993).

### 🌵 Fruto

El fruto es una falsa baya con ovario ínfero simple y carnoso. La forma y tamaño de los frutos es variable. Chessa y Nieddu (1997) y Ochoa (2003) describen en detalle los tipos de frutos; los hay ovoides, redondos, elípticos y oblongos, con los extremos aplanados, cóncavos o convexos. Los colores son diversos: hay frutos rojos, anaranjados, púrpuras, amarillos y verdes, con pulpas también de los mismos colores. La epidermis de los frutos es similar a la del cladodio, incluso con aréolas y abundantes gloquidios y espinas, que a diferencia del cladodio, persisten aún después de la sobre madurez del fruto. La cáscara de los frutos difiere mucho en grosor, siendo también variable la cantidad de pulpa. Esta última presenta numerosas semillas, que se consumen junto con la pulpa. Hay frutos que presentan semillas abortadas, lo que aumenta la proporción de pulpa comestible. Debido a que existen preferencias en algunos mercados por frutos con pocas semillas o sin semillas, el mejoramiento genético está orientado hacia la búsqueda y multiplicación de variedades que presenten esta característica (Mondragón-Jacobo, 2004).

## 1.5 Usos del nopal

El uso integral de esta especie representa un gran atractivo para el sector agroindustrial. Del género *Opuntia* hay sólo 10 ó 12 especies hasta ahora utilizadas por el hombre, entre las que se encuentran, como especies cultivadas, *Opuntia ficus-indica*, *O. amyclaea*, *O. xocostle*, *O. megacantha* y *O. streptacantha* y como especies silvestres: *Opuntia hyptiacantha*, *O. leucotricha* y *O. robusta*. La más ampliamente cultivada en distintas partes del mundo es *Opuntia ficus-indica*. El nombre científico le fue asignado por Tournefort en 1700, por su semejanza con una planta espinosa que crecía en el poblado de Opus en Grecia (Saravia-Tasayco, 2004; Velásquez, 1998). Las características de estas especies son variables, diferenciándose en la forma de los cladodios, en la presencia o ausencia de espinas, en el tamaño y color de los frutos, entre otras (Barrientos, 1983).



---

A lo largo de la historia de México se ha utilizado el nopal y se han desarrollado un gran número de usos y aplicaciones de esta planta:

a) Como fruta: La tuna es una fruta muy aceptada en el mercado nacional, además de que se está exportando, principalmente a los Estados Unidos de América y en cantidades menores se exporta a Canadá y a algunos países europeos y a Japón, Se utiliza para elaborar mermeladas, dulces, ates, nieve y sus semillas para extracción de aceite (Stintzing, 2005; Sáenz, 2006; Feugang *et al.*, 2006).

b) Como verdura: El nopalito está ligado a la comida mexicana del centro del país y su oferta es abundante durante casi todo el año. El nopal como verdura se destina principalmente al consumo humano en la preparación de diferentes platillos, ya sea en fresco, como ensaladas, mínimamente procesado en escabeche o en salmuera y deshidratado en cápsulas o comprimidos. Su demanda es menor en los estados del norte y casi nulo en las costas del país, donde lo consumen en épocas específicas y restringidas como lo son la cuaresma y navidad. Como la tuna, el nopalito también se exporta a Estados Unidos, pero en mayor cantidad (Stintzing, 2005; Sáenz, 2006; Feugang *et al.*, 2006).

c) Como forraje: El nopal se utiliza como forraje suplementario para vacas, ovejas y cabras especialmente en épocas de sequía en países como México, Brasil, Chile, Sudáfrica, Túnez y el sur de Estados Unidos (Sáenz, 2000; Feugang *et al.*, 2006).

d) Como cerco: La utilización de variedades espinosas para formar cercos en los huertos familiares y en los predios ganaderos es común y muy antigua en México, es decir es una barda verde de este vegetal (SEMARNAT, 1994).

e) Como substrato para la producción de la grana de cochinilla: La obtención de colorante carmín, producto de la cochinilla (*Dactilopus coccus costa*) que parasita el nopal. La producción de grana fue en la época de la colonia la segunda fuente de divisas, después de la plata en la Nueva España. El mercado de la grana decayó con el desarrollo de las anilinas artificiales, pero recientemente al considerarse algunas de éstas como cancerígenos se reabrió el mercado para la grana, siendo solicitado por la industria de embutidos cárnicos y cosméticos (Sáenz, 2000, Stintzing, 2005; Feugang *et al.*, 2006).



f) Como materia prima en la producción de cosméticos: En México y otros países se fabrican jabones, cremas, champús y enjuagues que contienen extractos de nopal (Sáenz, 2000; Stintzing, 2005; Feugang *et al.*, 2006).

g) Como materia prima industrial: En México se procesa el nopal como alimento (en salmuera, escabeche y dulces), principalmente para el mercado de exportación; de la tuna se obtiene mermelada, jugos néctares, colorantes, pectinas y fructuosa (Saézn 2006; Semarnat, 1994).

h) En la conservación del suelo: El nopal se utiliza para proteger el suelo y frenar la desertificación, es una planta que puede formar “setos” en curvas de nivel que ayudan a controlar la erosión del suelo, además de que soporta el ambiente poco favorable del desierto, caracterizado por una precipitación pobre y errática y una alta oscilación térmica diaria y anual (SEMARNAT, 1994).

### 1.6 Composición química y valor nutritivo

La composición del cladodio varía en función de los factores edáficos en el lugar de cultivo, la temporada y la edad de la planta. Por lo tanto, respectivos contenidos de nutrientes varían tanto entre especies como en variedades (Stintzing y Carle, 2005). El contenido de agua en el nopal es generalmente mayor al 90%. En la variedad *Opuntia ficus indica* varía desde (80-95%) dependiendo de la edad.

El contenido de los macro componentes en el cladodio cambia con su edad, como lo muestra el cuadro 1.2.

**Tabla 1.2. Composición química de cladodios de distintas edades (porcentaje materia seca).**

Edad (años)	Proteína	Grasa	Cenizas	Fibra cruda	Extracto no Nitrogenado
0.5	9.4	1.00	21.0	8.0	60.6
1	5.4	1.29	18.2	12.0	63.1
2	4.2	1.40	13.2	14.5	66.7
3	3.7	1.33	14.2	17.0	63.7
4	2.5	1.67	14.4	17.5	63.9

*Fuente: Sáenz et al. (2006)*



Los nopalitos por su parte, al igual que otras verduras, contribuyen con una alta proporción de agua a la dieta y son altamente cotizados por su contenido en fibra; forman parte de la dieta común del pueblo mexicano y están siendo ampliamente consumidos en el sur de Estados Unidos de América por la población mexicana allí residente. Esta verdura, es rica en fibra dietética y su contenido es comparable al de varias frutas y hortalizas, entre ellas la espinaca, la alcachofa, la acelga, la berenjena, el brócoli, el rábano y otras. Entre las frutas, es similar al mango, al melón, al damasco y a la uva. Son ricos también en minerales, entre ellos el calcio y el potasio (93 y 166 mg/100 g), respectivamente y tienen bajo contenido de sodio (2 mg/100 g), lo que es una ventaja para la salud humana. Su alto contenido en calcio, los hacen muy interesantes por la importancia de este mineral en la dieta, pero es un problema que debe ser más investigado (Rojas-Molina *et al.*, 2015).

### 1.7 Estructura del Nopal

Las tres estructuras principales del nopal para el consumo humano son el cladodio, la tuna y el xoconostle. Los cladodios o mejor conocidos como pencas, son tallos de cutícula gruesa y cerosa, en forma de paletas, compuestas por la colénquima y parénquima, este último está constituido por células vivas. Este es el tejido interno de los cladodios y constituyen la forma convencional del consumo de nopal (Instituto Nacional de Ecología, 2007). En la Figura se observa las partes de los cladodios de nopal: 1.4a) externa (colénquima) y 1.4 b) interna (parénquima).

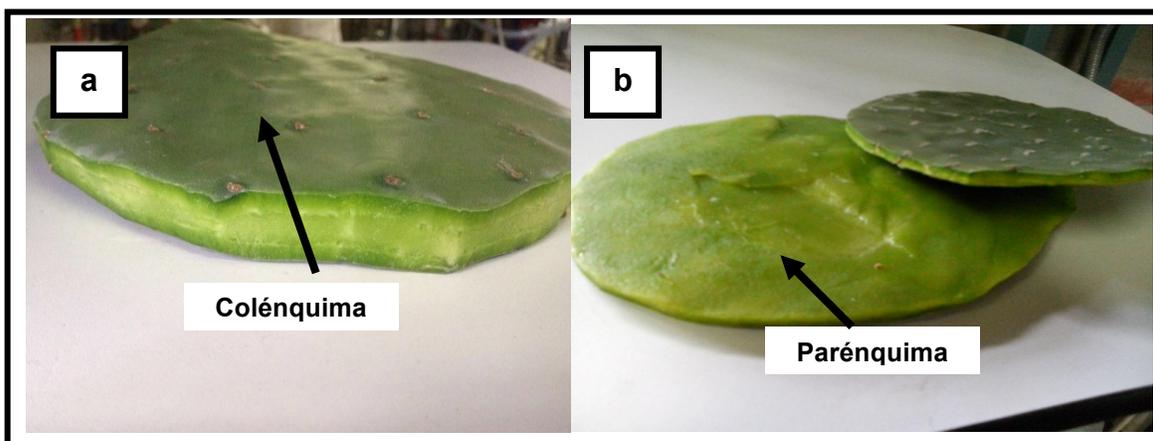
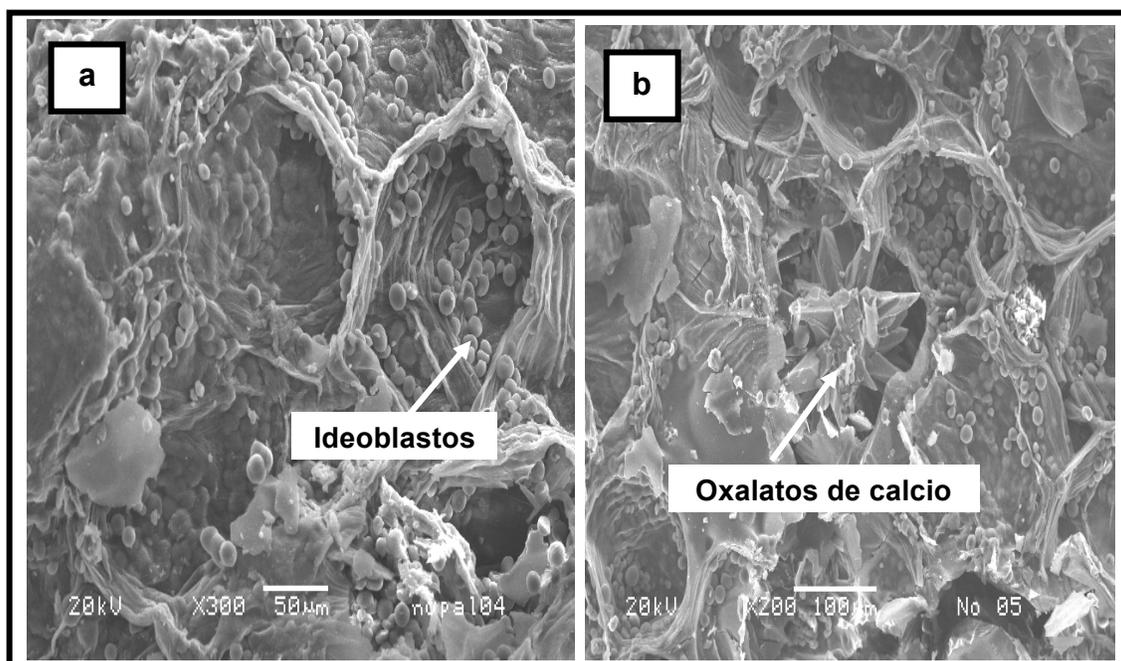


Figura 1.4) Partes anatómicas de cladodios de nopal *Opuntia ficus indica*. a) parte externa (colénquima); b) parte interna (parénquima).



La Figura 1.4 muestra las partes mayoritarias que conforman los cladodios de nopal. Estas fotografías corresponden a nopales de 400 g de peso, es decir de aproximadamente 100 días de maduración. La Figura a) muestra la estructura externa de los cladodios de nopal llamada colénquima, en esta parte es donde se localiza la mayoría de la fibra insoluble. En la Figura b), se muestra mediante un corte longitudinal la estructura interna de los cladodios, llamado parénquima, la cual se caracteriza por contener la mayor parte de la fibra soluble, así como polisacáridos, proteínas y minerales.

En el parénquima se encuentran las células que contienen el mucílago conocidas como idioblastos (Saenz *et al.*, 2007). Las partes del parénquima se observan en la Figura 1.5 en la cual se pueden apreciar la presencia de estas células y sales de oxalato de calcio (forma de drusas)



**Figura 1.5 partes del parénquima a) Idioblastos de nopal (células mucilaginosas), b) Oxalatos de calcio**

Los idioblastos pueden ser de 3 tipos: células buliformes, las cuales son grandes, en forma de burbuja, muy vacuolizadas, con membranas radiales. Estas se encuentran localizados principalmente en la parte blanda del nopal (parénquima), aunque en la colénquima hay una presencia minoritaria también de estos. La función de estas células es la de plegar y desplegar la lámina por cambios de



---

turgencia o almacenamiento de agua. Las células silíceas y suberosas, son típicas de la epidermis de gramíneas, su presencia permite caracterizar especies. Finalmente, los litocistos, son células que contienen cistolitos, los cuales son agregados de cristales de carbonato de calcio. También se encuentran numerosos cristales de calcio conocidos como oxalatos en forma característica de drusas con múltiples puntas. Estos cristales generalmente se les encuentra asociados con la fibra insoluble de los nopales, son de tamaño mucho mayor que los carbonatos de calcio. En la figura se les puede observar en la parte central, escondidos bajo las fibras insolubles de nopal (Sugimura *et al.*, 1999).

### **1.8 Propiedades funcionales y medicinales del nopal**

Los compuestos nutraceuticos son aquellos que tienen efectos benéficos para la salud, los cladodios son una fuente interesante de tales componentes, entre los que destacan la fibra, los hidrocoloides (mucílagos), los minerales (calcio, potasio) y algunas vitaminas como la vitamina C, buscada entre otros motivos por sus propiedades antioxidantes; todos estos compuestos son muy valorados desde el punto de vista de una dieta saludable y también como ingredientes para el diseño de nuevos alimentos (Sáenz *et al.*, 2004). Los cladodios poseen un alto contenido de fibra, estos compuestos forman parte de los alimentos que se conocen como alimentos funcionales, los cuales se definen como “un alimento o bebida que proporciona un beneficio fisiológico, que fortalece la salud, ayuda a prevenir enfermedades, o mejora el rendimiento físico o mental por la adición de un ingrediente funcional, por la modificación de un proceso o por el uso de la biotecnología” (Sloan, 2000).

Entre estos compuestos funcionales, la fibra dietética es uno de los componentes más estudiados desde el punto de vista de la nutrición y la relación que existe entre fibra y salud, por ejemplo para el control del colesterol y prevención de algunas enfermedades como diabetes y obesidad (Sloan, 1994; Hollingsworth, 1996; Grijspaardt-Vink, 1996; Stintzing y Carle, 2005; Feugang *et al.*, 2006), lo que es conocido por los consumidores.



---

El consumo de nopales y de tuna ácida (el xoconostle) ha probado que abate en la sangre los niveles de azúcar y colesterol, por lo que la gente los consume cocinados, así como en cápsulas y comprimidos.

Los pigmentos presentes en los frutos de los nopales, como los carotenoides y las betalaínas, se destacan por su poder antioxidante. El poder antioxidante de los betacarotenos y flavonoides es bien conocido, pero el de las betalaínas ha comenzado a ser estudiado recientemente (Galati *et al.*, 2003) por lo que su consumo para evitar el envejecimiento de los tejidos podría competir con el que se busca en otros vegetales como la naranja o la uva roja. Además de los efectos benéficos que ya se mencionaron, se están estudiando los posibles efectos como capacidad antioxidante, acción analgésica, propiedades antiinflamatorias, efecto antiulceragénico, efectos diuréticos, propiedades antivirales (Stintzing y Carle, 2005; Feugang *et al.*, 2006).

La fibra dietaria en la dieta reduce el colesterol y reduce la presión sanguínea: el hígado es el sitio principal de la síntesis de colesterol en nuestro cuerpo. Parte del colesterol sintetizado por el hígado se incorpora a los ácidos y sales biliares. La bilis se secreta en el intestino para ayudar a la digestión y absorción de grasas. Por lo general lo reabsorbe el intestino y lo captura el hígado después de la digestión del alimento. La fibra en la dieta interrumpe este ciclo al disolver las sales biliares en ella e impedir reabsorción de las sales biliares en el intestino. Así la fibra se excreta en el alimento sin digerir. De la misma manera, las fibras solubles se unen al colesterol de la dieta que se excreta del cuerpo junto con la fibra. Al aumentar la excreción del colesterol la fibra reduce la disponibilidad del colesterol en el hígado para la incorporación en lipoproteínas y su liberación en la sangre circulante, al reducir el colesterol en la sangre, la fibra ayuda en forma indirecta a reducir la presión sanguínea (Kaur y Gupta, 2002).

Entre otras cosas la fibra controla la concentración de azúcar en la sangre: la fibra reduce la velocidad de absorción de la glucosa en el intestino y reduce la concentración de glucosa en la sangre y por lo tanto ayuda a tratar la diabetes la fibra ayuda a reducir la dosis de insulina que se administra al paciente diabético. La fibra insoluble previene el estreñimiento, ya tiene una gran capacidad para atrapar agua, ayuda a mantener las heces más suaves y con masa, ayuda a que



---

el alimento se mueva por el tracto intestinal con mayor rapidez. Ésto previene el estreñimiento y reduce el riesgo de cáncer del intestino grueso (Kaur y Gupta, 2002).

### **1.9 La fibra soluble e insoluble de los alimentos**

Según su solubilidad la fibra se clasifica en soluble e insoluble; la primera la conforman los mucílagos, gomas, pectinas y algunas hemicelulosas, esta fibra está asociada con la reducción de los niveles de glucosa y colesterol en sangre y la estabilización del movimiento gástrico. La fibra insoluble con la capacidad de retención de agua, el intercambio iónico, la absorción de ácidos biliares, minerales, vitaminas y su interacción con la flora microbiana (Feugang *et al.*, 2006).

- Definición.

El mucílago es una sustancia vegetal líquida viscosa presente en el nopal análogo a las gomas. Formada principalmente por polisacáridos de estructura altamente ramificada que en contacto con el agua pueden formar dispersiones viscosas y poseen una enorme facilidad de absorberla, propiedad que es de suma importancia en el mecanismo de retención de agua de las cactáceas.

- Composición.

McGarvie y Parolis (1981) encontraron que el mucílago de nopal está compuesto de una familia de polisacáridos altamente ramificados. Estos polisacáridos consisten en una cadena principal de unidades  $\alpha$ -D-ácido galacturónico unido por 1 2 a unidades  $\beta$ -L- de ramnosa unidas a 1-4 con ramificaciones en C-4, las ramificaciones empiezan a ser oligosacáridos de galactosa los cuales contienen L-arabinosa y D-xilosa como sustituyentes. Diferentes estudios han encontrado que el mucílago es un polisacárido neutro que contiene L-arabinosa, D-galactosa, L-ramnosa, D-xilosa y ácido galacturónico en distintas proporciones (Tranchtenberg y Mayer, 1981; Medina-Torres *et al.*, 2000) La estructura del mucílago se ha propuesto compuesta de dos fracciones solubles en agua. Una de ellas como pectina con propiedades gelificantes con cal,  $Ca_2^+$  y la otra es un mucílago sin propiedades gelificantes (Goycoolea y Cárdenas, 2004).



---

Majdoub *et al.* (2001) reportó que en *Opuntia ficus indica* la fracción soluble de los polisacáridos con propiedades espesantes representa menos del 10% del material que es soluble en agua. La principal función del mucílago es almacenar agua, dentro de la estructura del nopal, entre los tejidos del clorénquima y parénquima se encuentran células del mucílago denominado “baba de nopal”. Estas células son más abundantes en el parénquima. Este complejo del mucílago posee propiedades osmóticas para retener fuertemente el agua. Estudios realizados del tejido del nopal han demostrado que el mucílago está presente sólo en el aparato de Golgi y la síntesis del mucílago tiene lugar probablemente en ese lugar de donde es derivado a las vesículas (Trachtenberg y Mayer, 1981). Estos polisacáridos se hinchan cuando son disueltos en agua y pueden formar coloides y suspensiones altamente viscosas o masas gelificadas. Diferentes autores han utilizado diversos métodos de extracción que tienen influencia en el rendimiento obtenido. Estudios realizados por Sáenz y Sepúlveda (1993) en la cáscara de la tuna reportaron que el rendimiento de la extracción del mucílago fue de 1.0% a 1.2% en peso fresco del nopal. Mientras que Sepúlveda *et al.* (2007) obtuvo rendimientos de 1.48% en peso fresco.

Los mucílagos o hidrocoloides son productos que empiezan a tener gran interés en la investigación médica y en el sector industrial, incluyendo el área de alimentos, cosmética y farmacéutica. Estos compuestos pueden ser extraídos de las pencas y de las cáscaras de los frutos de los nopales (Mcgarvie *et al.*, 1981; Medina *et al.*, 2000; Sáenz-Torres *et al.*, 2004). Este tipo de polisacáridos, suelen ser utilizados por sus capacidades texturizantes, son usados para estabilizar emulsiones, para controlar la cristalización, como estabilizador de suspensiones, para inhibir la sinéresis, como películas comestibles, y algunos de ellos tienen la capacidad de formar geles (Sáenz *et al.*, 2004). El mucílago de nopal es un ingrediente interesante para la industria alimentaria, debido a sus propiedades de viscosidad puede ser un aditivo para mejorar las propiedades funcionales (Sepúlveda *et al.*, 2007).



---

Las operaciones de secado son importantes en la industria química y de alimentos. El objetivo principal del secado de fruta y verduras es remover agua del sólido hasta un nivel en donde el crecimiento microbiológico y el deterioro por reacciones químicas sean mínimos (Geankoplis, 2006).

## **1.10 Operaciones unitarias utilizadas en la elaboración de sólidos de nopal.**

### **1.10.1 Secado:**

El secado es la operación unitaria más antigua utilizada para la preservación de alimentos, siendo actualmente uno de los métodos más importantes en todos los sectores para la producción de sólidos.

La gran variedad de alimentos deshidratados que hoy están disponibles en el mercado como botanas, fruta deshidratada, vegetales, carnes entre otros, han generado interés en cuanto a las especificaciones de calidad y conservación de energía del proceso de secado. Las principales ventajas de los alimentos deshidratados en formas de harinas y sólidos granulares tienen una mayor estabilidad biológica, fácil de transportar y de almacenar en menor espacio comparado con los productos frescos.

La deshidratación de alimentos es una operación que involucra la transferencia de masa y de energía (calor). El entendimiento de estos dos mecanismos durante el secado, así como de las propiedades termo físicas, de equilibrio y de transporte del sistema son importantes para modelar el proceso de secado (Treybal, 1998; Geankoplis, 2006;).

Cuando un sólido húmedo es sometido a la operación de secado se presentan 2 fenómenos: Transferencia de la masa interna del sólido hacia la superficie de este y su subsecuente evaporación (transporte de humedad). El movimiento de la humedad dentro del sólido es una función de la naturaleza física del sólido, de su temperatura y de su contenido de humedad.

Transferencia de energía en forma de calor del ambiente que rodea al sólido para evaporar la humedad de su superficie. Este mecanismo depende de las



---

condiciones externas de temperatura, humedad y flujo del aire, presión, área de exposición y el tipo de secador empleado.

En el secado, cualquiera de los dos fenómenos puede ser el factor limitante que gobierne la velocidad de secado, aun cuando ambos ocurren al mismo tiempo durante el secado (Treybal, 1998; Geankoplis, 2006).

La deshidratación es un proceso donde los alimentos se someten a la eliminación de agua para su conservación y de esta manera prolongar la vida de anaquel.

Aunque el contenido en humedad de un alimento puede ser un factor indicativo de su propensión al deterioro, también se ha observado que diferentes alimentos con el mismo contenido de humedad pueden ser muy diferentes en su estabilidad por lo que el concepto de contenido de humedad es insuficiente para indicar lo perecedero que es un alimento, al no tener en cuenta las interacciones del agua con otros componentes del mismo.

La operación de deshidratación conlleva además una apreciable reducción del peso y volumen de los alimentos que se deshidratan, consiguiéndose así una importante reducción de los costes de transporte y almacenamiento de estos productos. La máxima reducción de volumen es la que se consigue al convertir alimentos líquidos en alimentos en polvo, sobre todo si el polvo obtenido se prensa en bloques o tablas. Otros objetivos que se persiguen con la deshidratación de los alimentos son la transformación de estos en materias primas adecuadas para el mezclado y formulación de nuevos productos, como es el caso de las sopas deshidratadas, frutas y cereales para el desayuno (SUCA *et al.*, 2010).

Sin embargo, también puede provocar cambios indeseables en los alimentos. El tamaño y la forma pueden cambiar considerablemente tal y como se ha expuesto anteriormente, de manera que cuando se reconstituye el alimento, este no recupera el tamaño ni forma originales. Los cambios de color también se pueden dar por el secado a altas temperaturas, cambios que perduran después de la reconstrucción. Otro aspecto importante también es el cambio de textura, debido al encogimiento celular provocado por la pérdida de agua y las altas temperaturas así como el estado gomoso a vítreo (Barbosa-Canovas *et al.*, 2005).



---

Los cambios en el sabor y aroma de los productos deshidratados se deben fundamentalmente a la pérdida de componentes volátiles durante el proceso así como el desarrollo de sabores y aromas típicos de productos cocidos provocados por altas temperaturas. Estos cambios son mayores en cuanto más altas sean las temperaturas y el tiempo de secado, pudiendo minimizarse utilizando métodos de secado que impliquen el uso de de temperaturas moderadas o bajas.

En el mercado de equipo para la industria química y de alimentos existen un gran número de procedimientos y aparatos de secado, cada uno diseñado para su propia especialidad y algunos lo suficientemente versátiles como para secar más de un tipo de material húmedo (Gordon, 2002). Consideraciones:

- a. características y propiedades físicas del producto húmedo. Procedimiento apropiado para la selección de un grupo de secadores para su estudio preliminar en un problema dado.
- b. La clasificación de los equipos de secado se puede hacer en base a: Las El procedimiento para transmitir el calor al sólido húmedo. Más interesante industrialmente y revela diferencias en el funcionamiento de los secadores.

De acuerdo con este segundo criterio se distingue los **secadores directos**, que utilizan gases calientes en contacto con el sólido húmedo para suministrar el calor y arrastrar el líquido vaporizado.

Los **secadores indirectos** en los que el calor se transmite al sólido húmedo a través de la pared que lo contiene, eliminándose el líquido vaporizado independientemente del medio calefactor, secadores dieléctricos y secadores por radiación.

Los secadores pueden clasificarse de diferentes formas, sin embargo la más usual es según su método de operación de acuerdo a como se puede apreciar en la Figura 1.6 (Fito *et al.*, 2001).

Los secadores pueden clasificarse de diferentes maneras:

- 1) Por el método de operación, es decir por lotes o continuo.

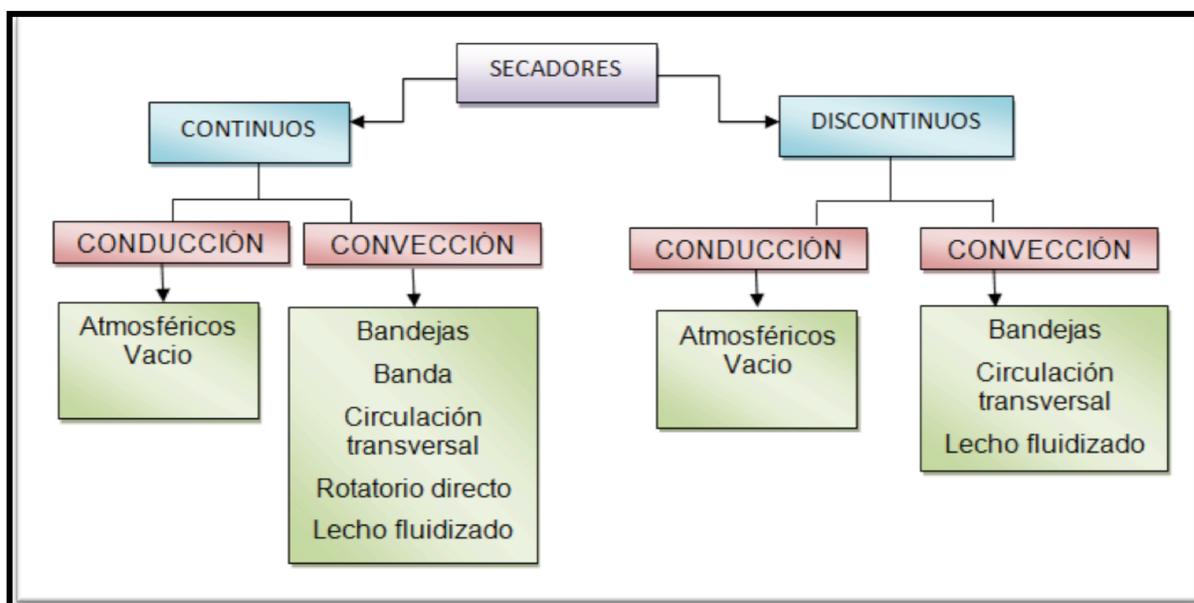


- 2) Por el método de la transferencia del calor necesario para la evaporación de la humedad.
- a) Conducción
  - b) Convección
  - c) Radiación (Treybal, 1998; Geankoplis, 2006; Mujumdar, 2006).

Cuando se quiere diseñar un secador es necesario conocer el mecanismo y la cinética del secado del material en cuestión; es decir, se debe establecer relaciones cuantitativas (gráficas o analíticas) entre el tiempo que debe durar la operación y las condiciones del secado antes de efectuar cualquier intento de cálculo de diseño.

Las variables que determinan el tiempo de secado de un material, son:

- 🌿 Del aire: temperatura, velocidad másica, humedad y características del flujo de circulación.
- 🌿 Del producto: humedad, tamaño, forma y estructura y composición química.



**Figura 1. 6 Clasificación de Secadores**

Por lo tanto, deberán hacerse experimentos en el laboratorio fijando las condiciones experimentales y determinando la relación, tiempo-humedad del producto (Fito, *et al.*, 2001).



- 
- 🌿 Disposición del producto
  - 🌿 Densidad del lecho
  - 🌿 Circulación del aire
  - 🌿 Mecanismos de transmisión de calor

(Nonhebel, 2002)

Dada la composición química de nopal no se representa ningún riesgo durante el secado, ya que sus componentes no son termolábiles. Sin embargo por su alto contenido de humedad tendrá un período muy largo de deshidratación.

### **1.10.2 Reducción de tamaño:**

La molienda es la operación unitaria que reduce el volumen promedio de las partículas sólidas al dividir y/o fraccionar una muestra sólida, implica solo una transformación física que debe conservar las características de la materia prima. El objetivo de la reducción de tamaño es la aplicación de fuerzas a un material sólido para fracturarlo y de esta forma aumentar la relación superficie/volumen con el menor consumo de energía. (Zeki-Berk, 2009).

Se pueden emplear molinos que aplican fuerzas preponderantes de impacto, cizalla, abrasión y compresión o la combinación algunas de las fuerzas. La forma en que se aplica la fuerza depende de su magnitud, dirección y velocidad del equipo, permitiendo que las partículas la absorban en forma de tensión, produciendo una deformación en su estructura y cuando se sobrepasa este límite, es entonces que el material se fractura produciendo nuevas superficies (Cortazar *et al.*, 2008). La selección del equipo de molienda también depende del tipo de material que se va a moler, es decir de las características del material. Las principales características son el contenido de humedad, la dureza, el contenido de grasa, el contenido fibroso. En el caso del nopal como tienen un alto contenido de fibra se debe utilizar para su molienda un equipo que utilice como principal fuerza la cizalla, es recomendable un molino pulvex (Figura 1.7) debido a que sus elementos molientes son estriados.

El molino pulverizador de turbina es el sistema más eficiente para la reducción de partículas y tiene diversas aplicaciones que auxilian a las diferentes industrias que



requieren moler en sus procesos productivos. Es un molino muy versátil que puede reducir de tamaño materiales muy duros y muy fibrosos, es de alta resistencia ya que sus elementos molientes en la carcasa son fundidos en una sola pieza. La cámara de molienda consta de un forro de molienda dentado o media luna, con seis martillos dentados y fijos al rotor que permiten la reducción del material al aplicar la combinación de fuerzas de impacto y cizalla. En la parte inferior de la cámara de molienda se ajustan las cribas con dispositivos sujetadores, cuenta con un motor de 1.61 KW, trabaja con cribas de diferente abertura.



**Figura 1.7 Molino Pulverizador de turbina**

### **1.10.3 Análisis granulométrico**

El análisis granulométrico por tamizado consiste en la separación mecánica de las fracciones de tamaño de partícula del cualquier material por medio de un juego de tamices con una abertura conocida.



Los tamices se componen de una malla metálica formada de alambres de diversos grosores. El grosor de los alambres y su tamaño está normado y depende del sistema utilizado. Los sistemas de tamices más utilizados son las series Tyler (Gran Bretaña), escala A.S.T.M. (E.U.A.), escala Gost 3585-73 (URSS). Escala internacional ISO. En la Figura 1.8 se muestra el Ro-Tap con una serie de tamices.



**Figura 1.8 Rotap y serie de tamices**

Los tamices se colocan uno encima de otro de mayor a menor abertura y la muestra de sólidos granulares cuidadosamente pesada se vierte en el tamiz superior para colocar después la tapa, a continuación el conjunto de tamices es colocado en un Rot-Tap, donde se somete a vibraciones y golpes durante un período de tiempo determinado, para la mayoría de los productos el tiempo recomendado es de 10- 15 minutos. Así para los sólidos granulares por un tamizado quedan los tamaños de partícula retenidos a través de las diferentes



aberturas de cada uno de los tamices. Cuando el proceso termina, se pesa cada uno de los tamices incluyendo a la charola y se registra el peso obtenido para continuar con el análisis, dicho análisis puede realizarse de manera gráfica, tabular o analítica de acuerdo a las necesidades del trabajo. De esta manera se obtiene el rendimiento de los sólidos granulares molidos o las harinas (Zeki-Berd, 2009).

## 1.11 Técnicas de análisis para la evaluación de sólidos de nopal

### 1.11.1 Determinación de color

Para determinar el color de manera estandarizada se utiliza el espacio de color, un método para expresar el color de un objeto usando algún tipo de anotación, como pueden ser los números. La Commission Internationale de l'Éclairage (CIE), una organización que es considerada como la autoridad en la ciencia de la luz y el color, ha definido espacios de color, incluyendo CIE XYZ, CIE L\*C\*h, y CIE L\*a\*b\*, para comunicar y expresar el color objetivamente. En la Figura 1.9 se muestran los dispositivos del colorímetro.

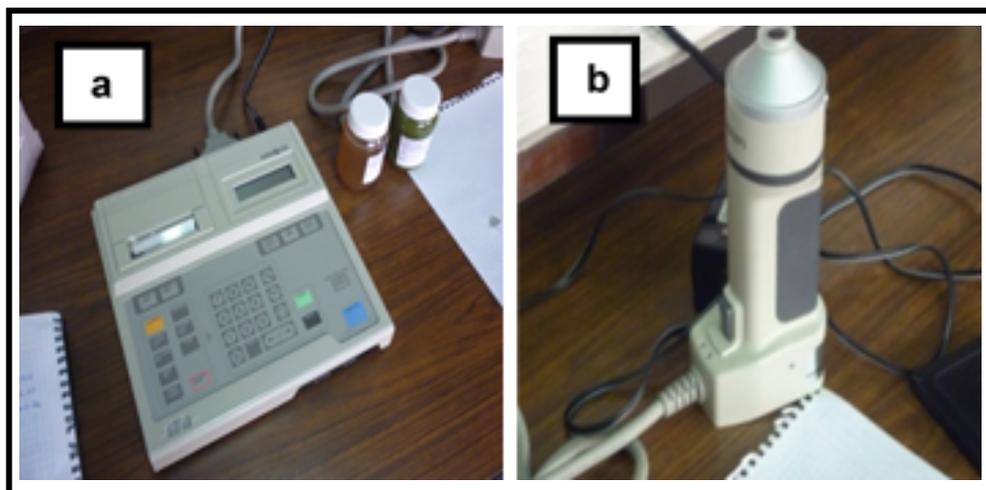


Figura 1.9 Colorímetro Minolta a) Tablero, b) Brazo de lectura

Este espacio de color es ampliamente usado porque correlaciona los valores numéricos de color consistentemente con la percepción visual humana. Investigadores y fabricantes lo usan para evaluar los atributos de color, identificar inconsistencias, y expresar precisamente sus resultados en términos numéricos.



El espacio de color  $L^*a^*b^*$  fue creado en base a una teoría de color que establece que dos colores no pueden ser rojo y verde al mismo tiempo o amarillo y azul al mismo tiempo.  $L^*$  indica la luminosidad y  $a^*$  (+a indica rojo, -a indica verde) y  $b^*$  (+b indica amarillo, -b indica azul) son las coordenadas cromáticas.

Los instrumentos de medición de color, incluyendo espectrofotómetros y colorímetros, pueden cuantificar éstos atributos de color fácilmente; determinan el color de un objeto dentro del espacio de color y muestran los valores para cada coordenada  $L^*$ ,  $a^*$ , y  $b^*$  (Minolta, 1994).

### 1.11.2 Microscopia electrónica de barrido

El Microscopio electrónico de barrido o SEM (Figura 1.10), utiliza un haz de electrones en lugar de un haz de luz para formar una imagen ampliada de la superficie de un objeto. Es un instrumento que permite la observación y caracterización superficial de sólidos inorgánicos y orgánicos. Tiene una gran profundidad de campo, la cual permite que se enfoque a la vez una gran parte de la muestra.



**Figura 1.10 Microscopio electrónico de barrido**

El microscopio electrónico de barrido está equipado con diversos detectores, entre los que se pueden mencionar: el detector de electrones secundarios para obtener imágenes de alta resolución SEI (Secondary Electron Image), un detector de



---

electrones retrodispersados que permite la obtención de imágenes de composición y topografía de la superficie BEI (Backscattered Electron Image), y un detector de energía dispersiva EDS (Energy Dispersive Spectrometer).

Las principales utilidades del SEM son la alta resolución (~1 nm), la gran profundidad de campo que le da apariencia tridimensional a las imágenes y la sencilla preparación de las muestras la cual es relativamente sencilla. Las principales características son: muestra sólida o conductora, caso contrario, la muestra es recubierta con una capa de carbón o una capa delgada de un metal como el oro para darle propiedades conductoras.

De lo contrario, las unidades experimentales no conductoras se trabajan en bajo vacío (Arenas, 1999).

### **1.11.3 Espectroscopía de absorción atómica**

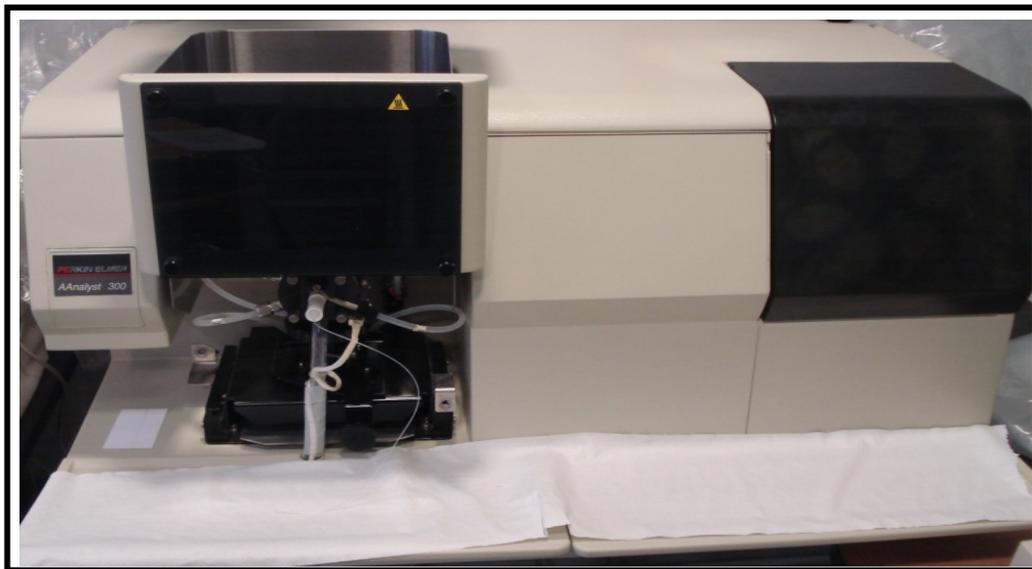
La espectrofotometría de absorción atómica es una de las técnicas analíticas más utilizadas para la determinación de trazas de elementos inorgánicos como Ca, Cu, Fe y Pb debido a su alta selectividad, sensibilidad y la posibilidad de ser ajustada al análisis directo con una mínima preparación de muestra.

En este método la solución muestra es directamente aspirada a una llama de flujo laminar. La llama tiene como función generar átomos en su estado fundamental, de los elementos presentes en la solución muestra. Temperaturas cercanas a los 1,500–3,000 °C son suficientes para producir la atomización de un gran número de elementos, los que absorberán parte de la radiación proveniente de la fuente luminosa. La determinación de calcio endógeno es importante para conocer la concentración de calcio en nopal. Esta actividad se realiza por espectrofotometría de absorción atómica para muestras de grano, pericarpio, germen y endospermo crudo de acuerdo al método descrito por Fernández-Muñoz *et al.*, (2004).

El espectrofotómetro que se muestra en la Figura 1.11 está equipado con una lámpara de deuterio con corrector de trasfondo y una lámpara de cátodo hueco para determinar calcio. Las condiciones en que se operó el equipo fueron: aire 12 psi, flama 422.7 nm, lámpara de uso corriente 10 mA y corte de ancho 0.7 nm.



Las determinaciones se realizan por triplicado, Se utiliza un microondas para digerir las muestras, un estándar de 1000 ppm de calcio para preparar la curva de calibración y una referencia certificada *corn meal-solid*, para establecer el porcentaje de recuperación en un espectrofotómetro AA-110 VARIAN.



**Figura 1.11 Espectrofotómetro de absorción atómica**

#### **1.11.4 La determinación de pH**

Esta expresión pH es una medida de acidez o alcalinidad de una disolución. El pH indica la concentración de iones hidrógeno  $[H]^+$  presentes en determinadas disoluciones. La sigla significa potencial hidrógeno o potencial de hidrógenos. El término "pH" se ha utilizado universalmente por lo práctico que resulta para evitar el manejo de cifras largas y complejas. En disoluciones diluidas, en lugar de utilizar la actividad del ion hidrógeno, se le puede aproximar empleando la concentración molar del ion hidrógeno. En disolución acuosa, la escala de pH varía, típicamente, de 0 a 14. Son ácidas las disoluciones con pH menores que 7 (el valor del exponente de la concentración es mayor, porque hay más iones hidrógeno en la disolución). Por otro lado, las disoluciones alcalinas tienen un pH superior a 7. La disolución se considera neutra cuando su pH es igual a 7, por ejemplo el agua. (Fernández-Muñoz et al ., 2004).



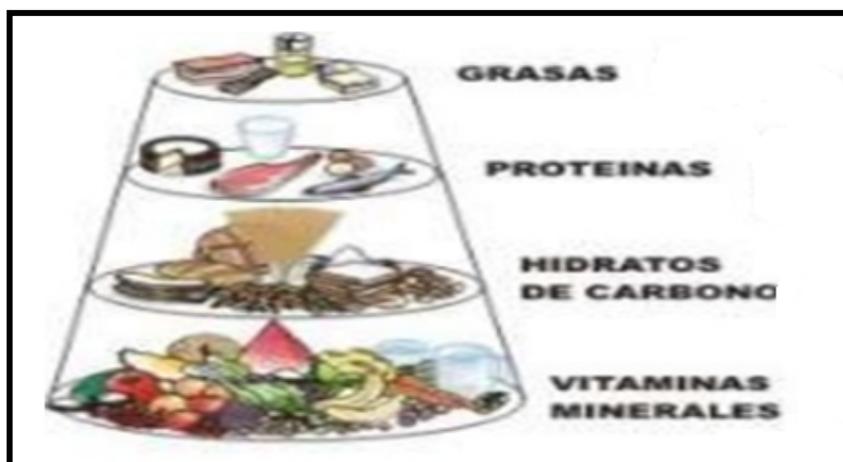
En la Figura 1.12 se muestra un potenciometro.



**Figura 1.12 Equipo para determinar el pH**

#### **1.11.5 Análisis químico proximal**

El análisis químico proximal (AQP) es un conjunto de pruebas que se realiza a una materia prima o a un producto para conocer su composición química. Este tipo de análisis incluye la determinación de humedad, extracto etéreo, proteínas, carbohidratos, cenizas, fibra cruda entre otros (Figura 1.13). Juega un papel muy importante, tanto en el establecimiento y mantenimiento de la calidad de los alimentos y de su valor nutritivo.



**Figura 1.13 Análisis químico proximal (AQP)**



**PROBLEMA:** ¿Las propiedades fisicoquímicas de nopales deshidratados son diferentes en las distintas edades de maduración?

**Objetivo General:**

Evaluar las características de nopal deshidratado con tres estados de maduración 50, 100 y 150 días, mediante pruebas fisicoquímicas, morfológicas, análisis químico proximal, análisis granulométrico, cantidad de mucílago y concentración de calcio presente, recomendando los cladodios de mayor aporte nutrimental.

**Objetivos particulares:**

**Objetivo 1:** Caracterizar cladodios de diferente estado de maduración, mediante su peso, espesor y dimensiones de las unidades experimentales, para conocer sus características físicas.

**Objetivo 2:** Obtener micrografías de nopal con diferente estado de maduración, mediante microscopía electrónica de barrido para evidenciar su distinta morfología.

**Objetivo 3:** Deshidratar nopales de edad de 100 días de maduración, 400g, mediante el secado por convección en estufa a diferentes temperaturas, para encontrar las mejores condiciones de secado hasta una humedad del 4%.

**Objetivo 4:** Reducir el tamaño de nopales deshidratados de diferente estado de maduración, mediante la aplicación de fuerzas de cizalla e impacto en un molino de martillos móviles Pulvex 200, obteniendo la granulometría característica de las unidades experimentales, potencia consumida, consumo de energía.

**Objetivo 5:** Evaluar sólidos granulares de nopal deshidratado de diferente estado de maduración, mediante pruebas de color, pH, diferenciando sus propiedades fisicoquímicas.

**Objetivo 6:** Determinar el análisis químico proximal y la concentración de calcio de nopal deshidratado de diferente edad de maduración, mediante técnicas AOAC para obtener el de mayor aporte nutrimental.

Para la solución del **problema:** Se planteó el cuadro metodológico en la Figura 2.1, que resume todas las actividades del desarrollo de objetivos, variables y sus evaluaciones.

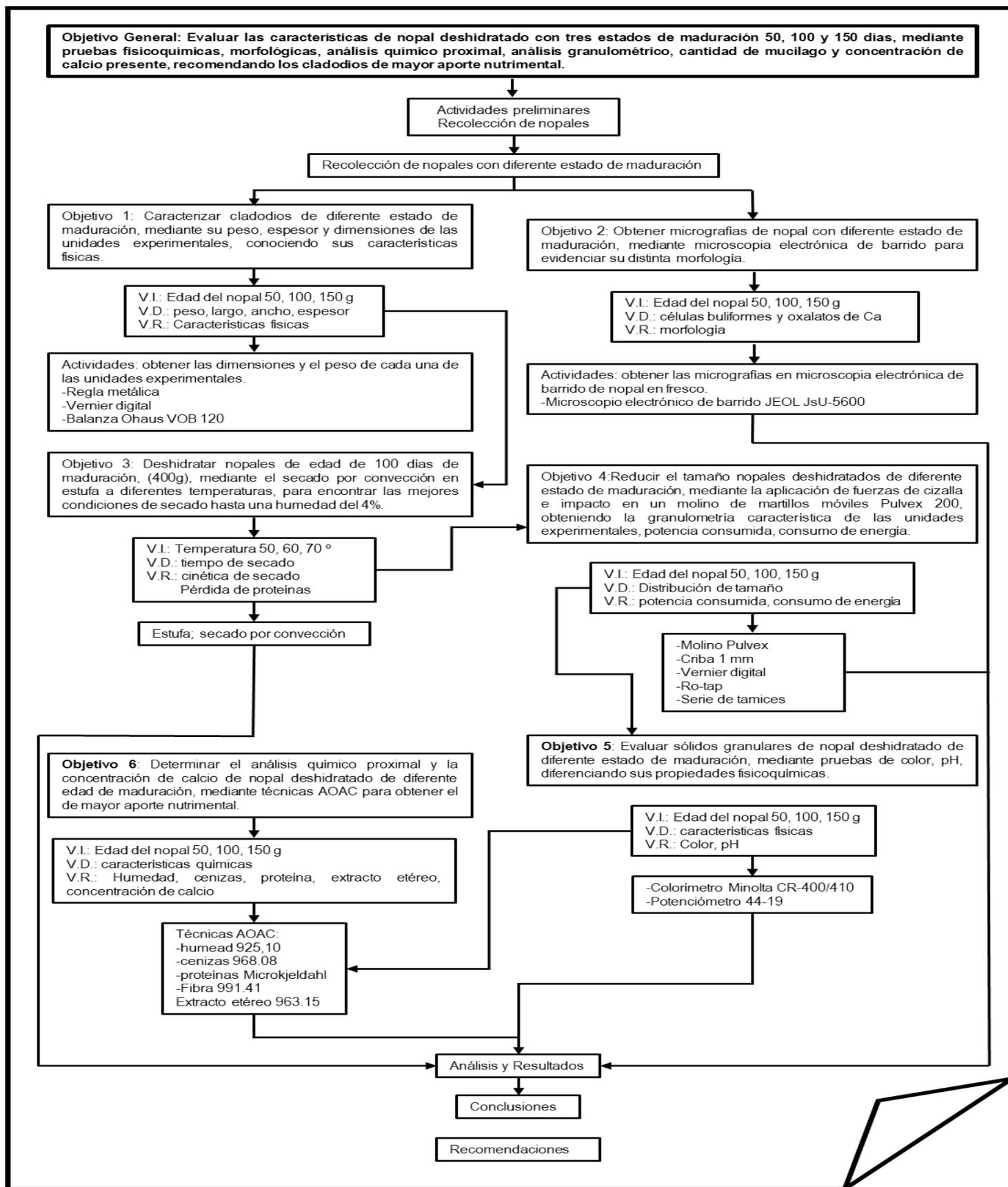


Figura 2.1 Cuadro metodológico



## 2.1 Descripción de actividades preliminares

Los nopales fueron recolectados en un rancho experimental ubicado en el Estado de Guanajuato (*rancho los Lores*) el cual se muestra en la Figura 2.2. Los nopales fueron seleccionados de acuerdo al estado de madurez de 50, 100, 150 días aproximadamente.



**Figura 2.2 Rancho los Lores en Silao estado de Guanajuato**

Los cladodios fueron cortados con un instrumento punzo cortante de acero inoxidable desde la raíz, con ayuda de papel o guantes para evitar espinarse. La recolección del nopal se realizó un día antes de la deshidratación. El nopal con que se trabajó es *Opuntia ficus indica* variedad redonda en tres diferentes estados de madurez. La temporada en la que se cosechó el nopal fue la primavera-verano del 2017. Para determinar la edad de los cladodios estos fueron marcados y fechados durante el brote de los mismos. Cada muestra consistió en aproximadamente 50 kg de nopal el cual fue colectado de diferentes plantas en la misma zona de muestreo. Todas las muestras se cosecharon entre las 10 a.m. y 14 p.m. Las muestras se recolectaron y se colocaron en cajas plásticas para su traslado al Estado de México, Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, Laboratorio experimental multidisciplinario Nave 2000 Ingeniería en Alimentos.



La Figura 2.3 muestra la recolección y clasificación que se realizó de los nopales para ser trabajados en este proyecto.

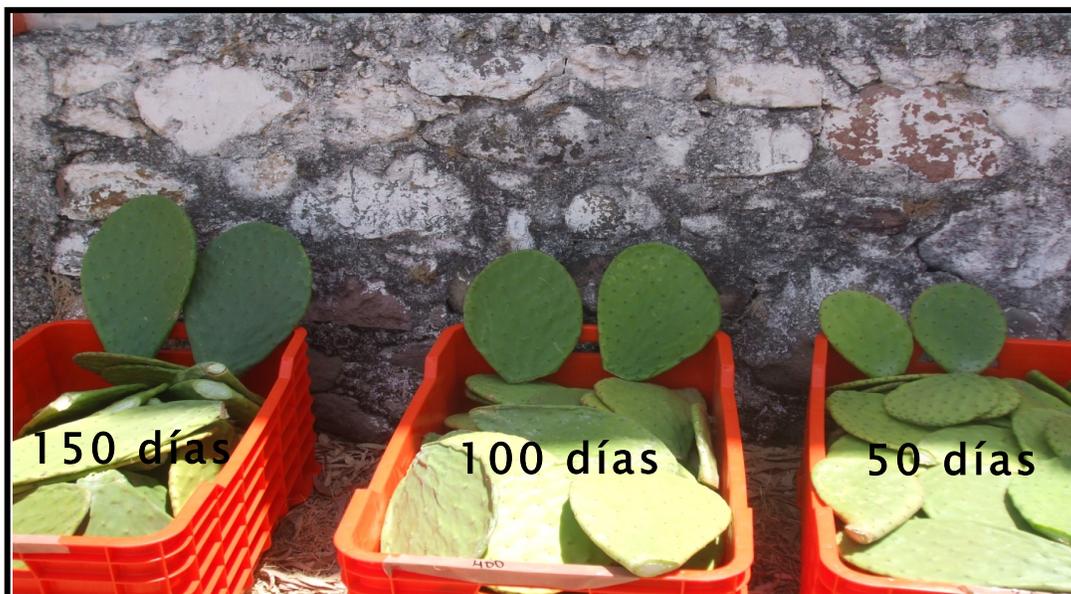


Figura 2.3 nopales cortados con diferente estado de maduración

## 2.2 Actividades para el Objetivo 1:

En la caracterización física de los nopales se llevó a cabo la medición del largo, ancho y espesor, se realizaron con una regla metálica de 50 cm y con un vernier digital, Marca Seteren Mul-100 y para pesarlos se empleó una balanza granataria digital Marca Ohaus, modelo VOB 120. De acuerdo a La Figura 2.4.



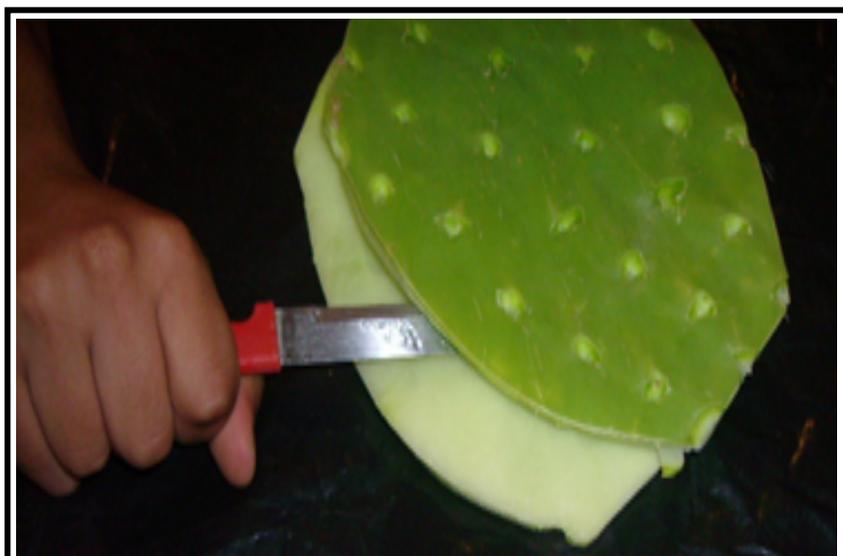
Figura 2.4 nopales o cladodios de diferente peso y espesor



### 2.3 Actividades para el objetivo 2:

Estas actividades permitieron conocer la morfología de las sales de calcio presentes en cada una de las unidades experimentales (nopales de 50, 100 y 150 días de maduración). Para esto las muestras se colocaron en un porta muestra de bronce adheridas con cinta de carbón electro conductiva, con el fin de que la emisión de electrones fuese continua dentro del microscopio, se introdujeron en el microscopio electrónico de barrido a alto vacío (JEOL, modelo JSU-5600 AV) con la finalidad de tomar a diferentes ampliaciones las micrograffías. También se observó al microscopio las células buliformes.

Se tomaron muestras de nopal fresco en pequeños trozos de nopales de diferente edad, preferentemente de la parte central de las unidades experimentales y se abrieron por el parénquima para observar las células buliformes en la parte interior del nopal como muestra la Figura 2.5

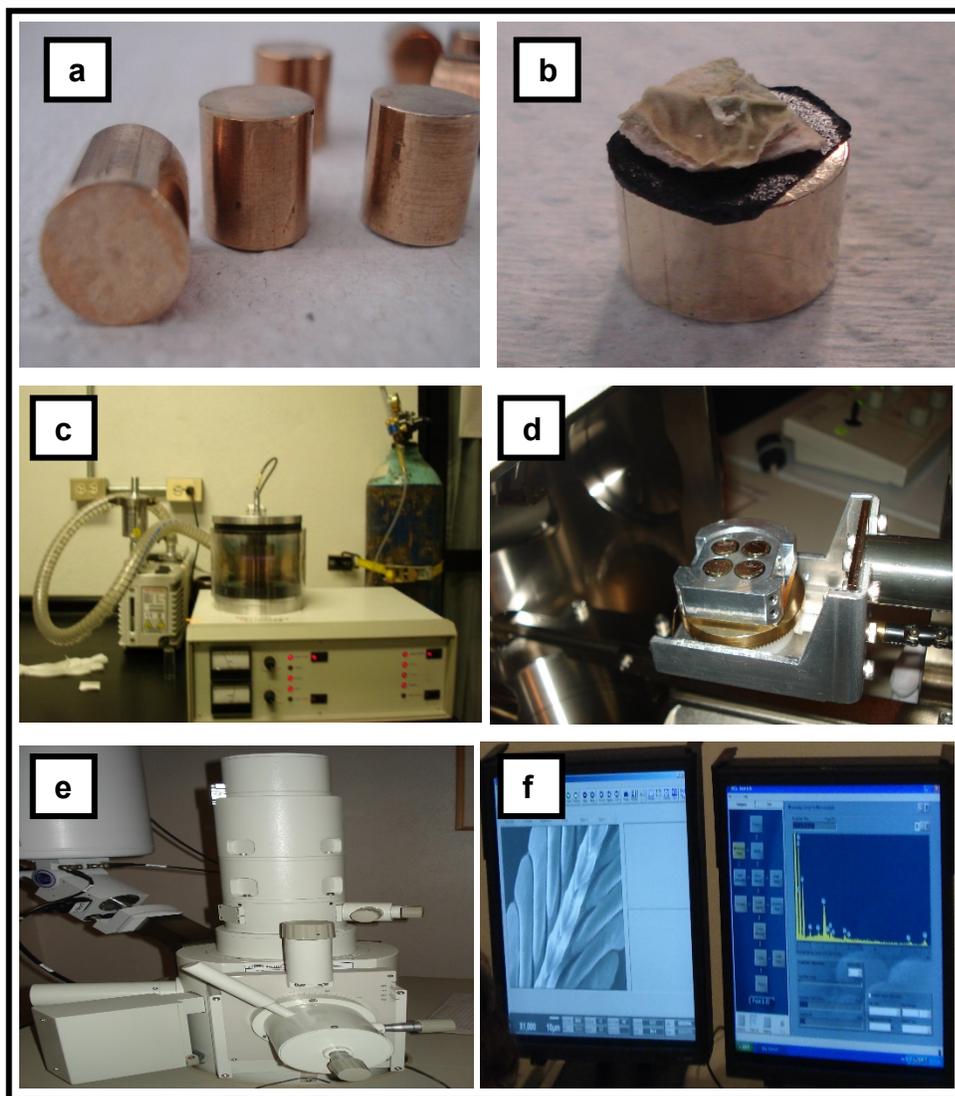


**Figura 2.5 Corte longitudinal a los nopales de diferente edad**

Las muestras fueron preparadas con cortes delgados para montarlas, previamente en los porta muestras de bronce se limpiaron para retirar impurezas (ver Fig. 2.6 a). Las muestras se colocaron en un porta muestra de bronce adheridas (ver Fig. 2.6 b) con cinta de carbón electro conductiva, con el fin de que la emisión de electrones fuera continua dentro del microscopio (Arenas, 1999). A las muestras se les dió, un baño de oro para su deshidratación (ver Fig.2.6 c). Las muestras ya



con baño de oro, se montaron en un porta muestras de aluminio para cuatro unidades (ver Fig. 2.6 d); se ajustaron los porta muestras en el soporte del microscopio JEOL JSU 5600 (ver Fig.2.6 e) y finalmente fueron observadas a diferentes aumentos en una computadora (ver Fig. 2.6 f).



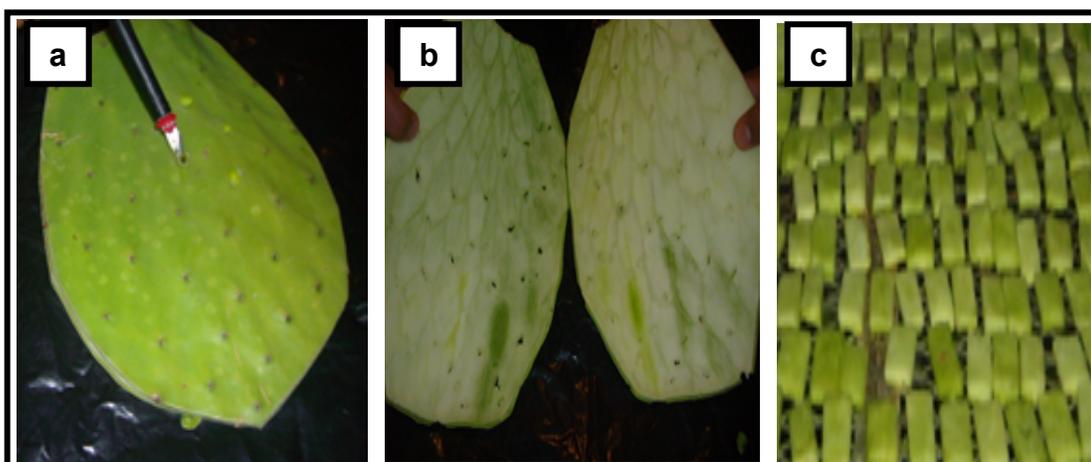
**Figura 2.6 Montaje para observar la morfología de las fracciones de nopal; a) Porta muestras de bronce; b) Porta muestras con muestra pegada; c) Baño de oro a las muestras; d) Porta muestras en el carro en el interior del microscopio; e) microscopio electrónico; f) captura de las micrografías en la computadora.**

Las micrografías se captaron a diferentes amplificaciones para identificar las sales de calcio y las células buliformes.



## 2.4 Actividades para el objetivo 3:

Se tomaron nopales de 100 días de maduración para definir el tiempo de secado. Con ayuda de un instrumento punzo cortante filoso (sacabocado) de acero inoxidable para evitar cortar exceso de pulpa, el instrumento se incrustó y giró en cada una de las espinas ya que en este estadio de maduración son muy gruesas y están muy insertadas al cuerpo del cladodio. Se retiró la corona del nopal debido a que es la parte más dura y reseca del mismo. En la Figura 2.7 el desespinado y corte de los nopales de 100 días de maduración. (Figura a), se abrieron los nopales por el parénquima (Figura b), se cortaron trozos de nopal de 2 x 4 cm (Figura c), se colocaron en charolas, estos fueron introducidos en una estufa a deshidratar en eventos diferentes a temperaturas de 50, 60 y 70 °C.



**Figura 2.7 preparación de las muestras de nopales para el secado a) desespinado, b) corte longitudinal, c) troceado de nopales.**

Los nopales no tienen componentes termolábiles a excepción de las proteínas. A pesar de que su valor es menor al 10 % se utilizaron para analizar cómo le afecta la temperatura de secado (Sáenz *et al.*, 2006).

La determinación de proteína cruda (PC) o bruta (nitrógeno total Microkjeldahl). Se realizó la determinación de acuerdo al método 2001.11 usando 0.5 g de muestra en un equipo Microkjeldahl BUCHI. El principio se basa en que una gran proporción del nitrógeno de los alimentos se encuentra en forma proteínica. Las proteínas de un alimento pueden calcularse químicamente a partir de su contenido de nitrógeno.



---

Dentro de los métodos más empleados para la determinación del nitrógeno total se encuentra el descrito por Kjeldahl. El método se basa en la determinación de la cantidad de Nitrógeno orgánico contenido en productos alimentarios, consta de dos pasos consecutivos:

- a) La descomposición de la materia orgánica bajo calentamiento en presencia de ácido sulfúrico concentrado.
- b) El registro de la cantidad de amoníaco obtenida de la muestra.

Durante el proceso de descomposición ocurre la deshidratación y carbonización de la materia orgánica combinada con la oxidación de carbono a dióxido de carbono. El nitrógeno orgánico es transformado a amoníaco que se retiene en la disolución como sulfato de amonio. La recuperación del nitrógeno y velocidad del proceso pueden ser incrementados adicionando sales que abaten la temperatura de descomposición (sulfato de potasio) o por la adición de oxidantes (peróxido de hidrógeno, tetracloruro, persulfatos o ácido crómico) y por la adición de un catalizador (Nollet, 1996).

Conociéndose la cantidad de nitrógeno contenido en la muestra, puede ser multiplicado por el factor de conversión 6.25 (comúnmente empleado), con lo que obtenemos la cantidad de proteína cruda o bruta presente en la muestra.

Una vez que se establece la temperatura de secado para la muestra de 100 días de maduración, con el mismo procedimiento se deshidratan todos los nopales de 50 y 150 días de maduración. Los primeros 20 minutos de secado consistieron en una rampa de calentamiento hasta que el equipo alcanzó la temperatura de 50 °C. Una vez alcanzada la temperatura, posteriormente, el secado se llevó a cabo con la isoterma correspondiente hasta que alcanzo una humedad de 4 % de acuerdo a la Figura 2.8., determinado por la diferencia de pesos de las charolas. En la isoterma el equipo suspende la energía en ciclos de cada 20 minutos. La temperatura se controla con un termómetro digital Marca Extech Instruments, modelo 42500. Esta misma operación se repitió para 60 y 70 °C y se obtienen los diferentes tiempos. Las tomas de las lecturas de temperatura se realizaron cada media hora para monitorear que esta fuera constante. Previamente se



caracterizaron las camas del secador para conocer su temperatura real. La Figura 2.8 muestra nopales secos de diferente estado de maduración.



**Figura 2.8 Muestras de nopal deshidratadas de 50 días (200g), 100 días (400g), 150 días (600 g)**

Durante el secado de las muestras de nopal, se tomaron los pesos de la charola con las muestras, cada hora con una balanza digital Marca Ohaus, modelo VOB 120 para registrar la pérdida de humedad del material y con estos datos se realizaron las gráficas de la pérdida de humedad. Se colocaron charolas, donde se tomaron muestras para la determinación de proteína. Esta prueba definió la temperatura en que deberán secarse todas las unidades experimentales. Además, también se construyeron las cinéticas de secado de cada una de las muestras. Los nopales de 150 días al tener mayor espesor sus tiempos de deshidratado fueron más largos. Todos los experimentos se realizaron por triplicado. Se calculó la media y desviaciones estándar para graficar los datos experimentales obtenidos de las muestras durante la deshidratación.

## **2.5 Actividades para el objetivo 4**

### **2.5.1 Reducción de tamaño:**

Las muestras de nopal deshidratado fueron molidas en un molino de martillos estriado (PULVEX 200) el cual aparece en la Figura 2.9, se vertieron los trozos de



nopal a la tolva de alimentación (Figura a). La restricción a la salida se llevó a cabo con una criba de 0.5 mm. Las velocidades de alimentación al molino fueron constantes a 10 g/s para todas las muestras molidas. Se puede apreciar sólidos granulares de nopal deshidratados (Figura b).



**Figura 2.9 Molienda de nopal a) Pulvex 200, b) Sólidos granulares de nopal**

Para realizar el cálculo del gasto de energía se utilizó un amperímetro digital Steren Mul-100 (EU) que se colocó en uno de los cables de corriente para registrar la cantidad de corriente eléctrica consumida durante la operación de molienda, este registro se grabó y luego se obtuvo una gráfica de amperaje vs tiempo.

Con los valores obtenidos de voltaje y de intensidad de corriente se realizó el cálculo de la potencia de acuerdo a la ecuación 1.

$$P = VI [=]W \quad \text{Ecuación (1)}$$

Dónde:

*P: Potencia (Watt)*

*V: Tensión, (Volt)*

*I: Intensidad de corriente (A)*



---

Para conocer el consumo de energía que se requirió para la reducción de tamaño, se determinó la potencia del equipo sin carga (al arranque) y el consumo de potencia con carga (durante la molienda) con la ecuación (2)

$$E = \frac{P_c - P_0}{T} [=] \frac{Wh}{kg} \quad \text{Ecuación (2)}$$

Donde:

*E*: Energía requerida por el equipo, (W/kg)

*P<sub>c</sub>*: Potencia consumida por el molino durante la molienda, (Watt)

*P<sub>0</sub>*: Potencia consumida sin carga, (Watt)

*T*: Velocidad de alimentación durante la molienda, (kg/h)

### **2.5.2 Análisis granulométrico**

A los sólidos granulares de nopal deshidratado obtenido de la molienda, se les determinó su granulometría. Se seleccionó la serie de tamices rigurosa USA de acuerdo a pruebas preliminares con número de mallas 20, 25, 35, 40, 45, 50, 60, 70, 80, 100, 120, 140, 170, 200, 230, 270, 325, 400 y charola. Cada uno de los tamices se pesó incluyendo la charola y se registró el diámetro de apertura de cada uno. Posteriormente, los tamices se acomodaron en pila en orden ascendente del número de malla. Se pesaron 100 gramos de muestra y se colocaron en la parte superior del primer tamiz y posteriormente se colocó la tapa. Después la pila de tamices se acomodó en el Ro-tap modelo KH59986-60 (USA) y se programaron 12 minutos de movimiento para las muestras. Al terminar el movimiento en el equipo cada uno de los tamices fue pesado para construir las gráficas diferencial y acumulativa, incluyendo la charola como muestra la Figura 2.10 a) Ro-tap, b) serie de tamices.

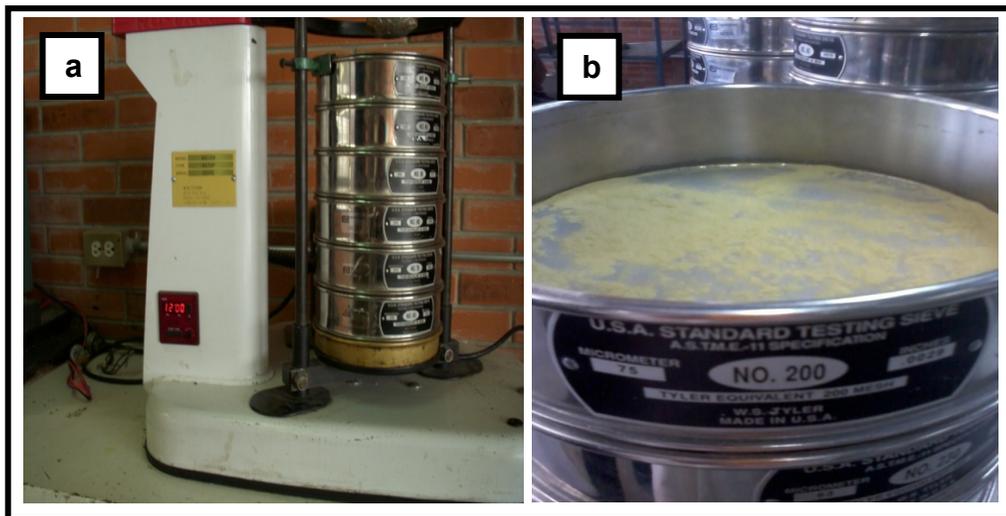


Figura 2.10 Análisis granulométrico a) Ro-tap b) serie de tamices

Al finalizar las fracciones retenidas en cada tamiz y en el plato fueron pesadas y se registraron los datos de acuerdo a lo descrito en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Representación tabular del análisis granulométrico

No. de malla	Masa Retenida (g)	Xi	Abertura de malla que pasa (in)	Abertura de malla que retiene (in)	Dpi (in)	FTR	FTP
20/25							
25/35							
35/40							
40/45							
45/50							
50/60							
60/charola							
CHAROLA							

La representación tabular del análisis granulométrico se realizó con una serie de cálculos, descritos a continuación: En la columna 1 de la tabla se identifica el número de mallas que se emplean y las aberturas de los diámetros correspondientes.

En la segunda columna se registra la masa retenida después de la agitación en el Ro-Tap, una vez pesadas las fracciones (en gramos).



En la columna 3 se registra la fracción masa ( $X_i$ ) y es la función diferencial de distribución para un módulo de tamices dado, calculándolo con la ecuación 3.

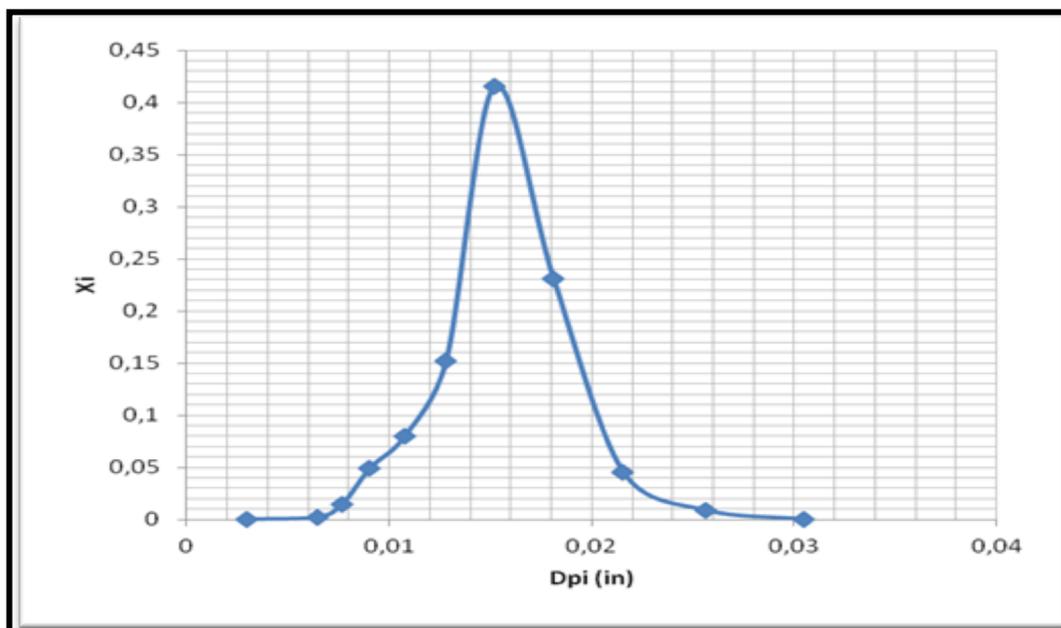
$$X_i = \frac{\text{masa retenida}}{\text{masa total}} \quad \text{Ecuación (3)}$$

En las columnas 4 y 5 se registra la abertura de la malla por la que pasa la harina en pulgadas (in) y la abertura de la malla que retiene la harina en pulgadas (in) respectivamente. Este valor se obtiene de la placa de cada tamiz.

En la columna 6 se registra el  $D_{pi}$  (diámetro de la partícula en cada fracción), según los tamaños tomados como valores de media aritmética en mallas de los dos tamices consecutivos que proporcionan a dicha fracción se obtiene de la ec. 4.

$$D_{pi} = \frac{\text{Abertura de la malla que pasa} + \text{Abertura de la malla que retiene}}{2} \quad \text{Ecuación (4)}$$

En la Figura 2.11 se presenta un ejemplo de la gráfica de distribución diferencial de tamaño de las harinas evaluadas, donde se gráfica:  $X_i$  vs  $D_{pi}$ .



**Figura 2.11. Ejemplo de gráfico diferencial de distribución de partícula**

En la Figura 2.11 se presenta la distribución de tamaño y la homogeneidad de la muestra, así como el diámetro promedio.

En la columna 7 se registra la fracción masa retenida acumulada (FTR), obteniendo el cálculo con la ecuación 5.

$$FTR = \sum_n^i = X_{i-1} + X_i \quad \text{Ecuación (5)}$$



Dónde:

$X_{i-1}$ : Porcentaje de peso anterior

$X_i$ : Porcentaje de peso inicial

En la columna 8 se registra FTP: Fracción masa retenida acumulada pasada obteniendo el cálculo con la ecuación 6.

$$FTP = (1 - FTR) \quad \text{Ecuación (6)}$$

Con los datos obtenidos para FTR y FTP se obtiene una gráfica acumulativa (Figura 2.12) para obtener la fracción pasada y la fracción retenida.

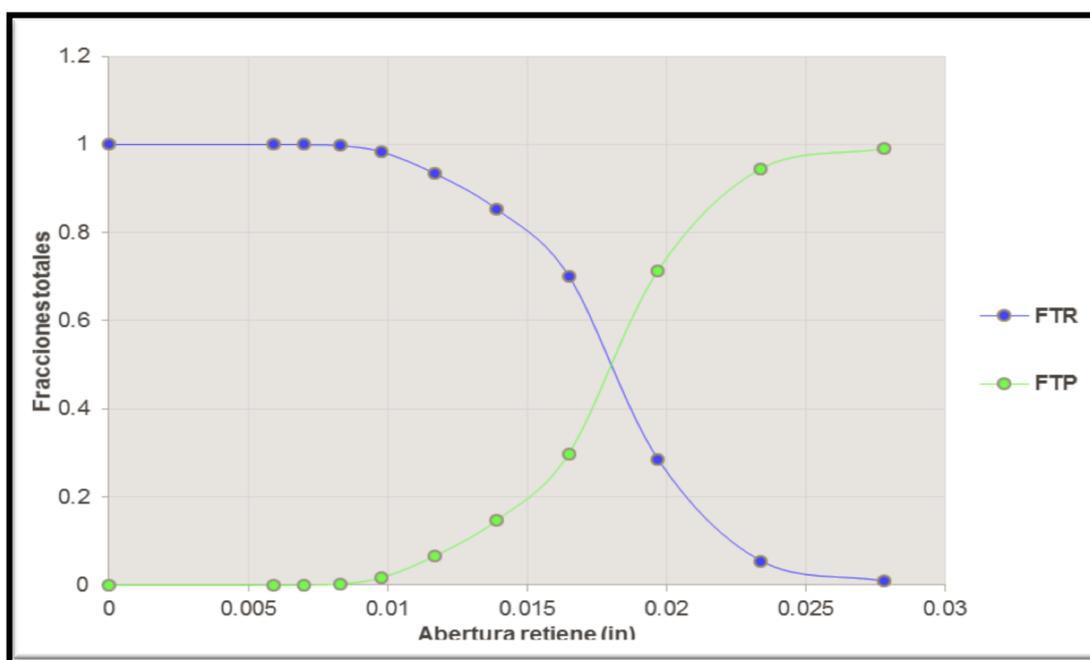


Figura 2.12. Gráfica acumulativa de FTR y FTP.

Gráfica donde se puede obtener el rendimiento harinero, tomando el valor de la apertura en el eje X hasta que cruce la FTR y luego interceptar el eje Y. El valor se multiplica por 100 para obtener el %.



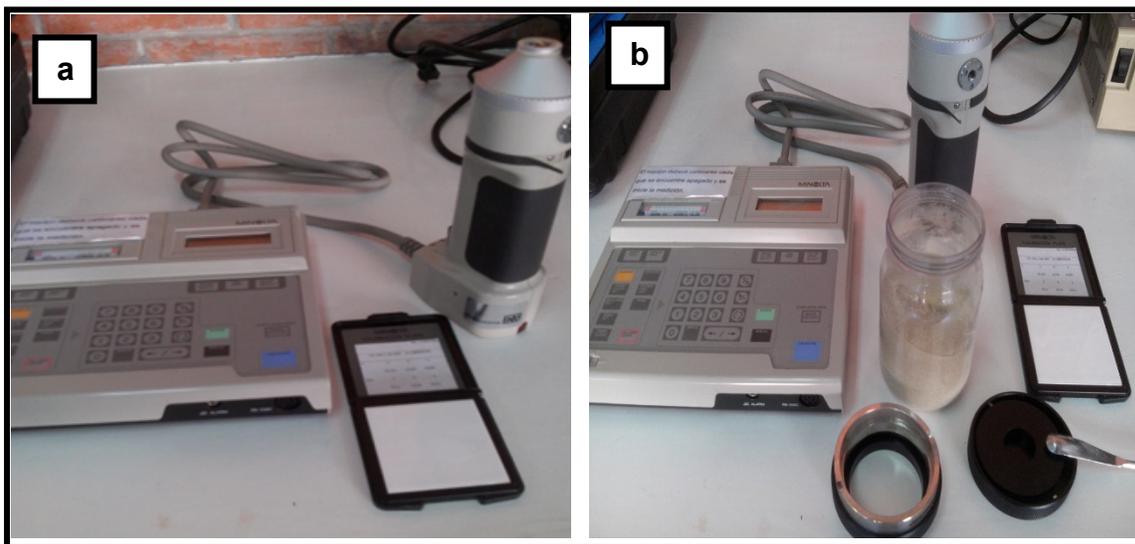
## 2.6 Actividades para el objetivo 5.

### 2.6.1 Determinación de color

Análisis de color por el método de CIELAB que consideraron los parámetros de  $H^\circ$ ,  $C^*$ ,  $L^* a^*$ ,  $b^*$ , a través de un colorímetro Minolta.

El color se reportó como valor de hue ( $H^\circ$ ), croma ( $C^*$ ) y luminosidad ( $L^*$ ). En la Figura 2.13 se muestra el colorímetro:

- Partes del colorímetro: La pantalla, el brazo y la placa b) dispositivo de sólidos granulares.
- Esta determinación se realizó con el propósito de hacer un análisis comparativo de las tonalidades de verdes de las diferentes muestras experimentales.



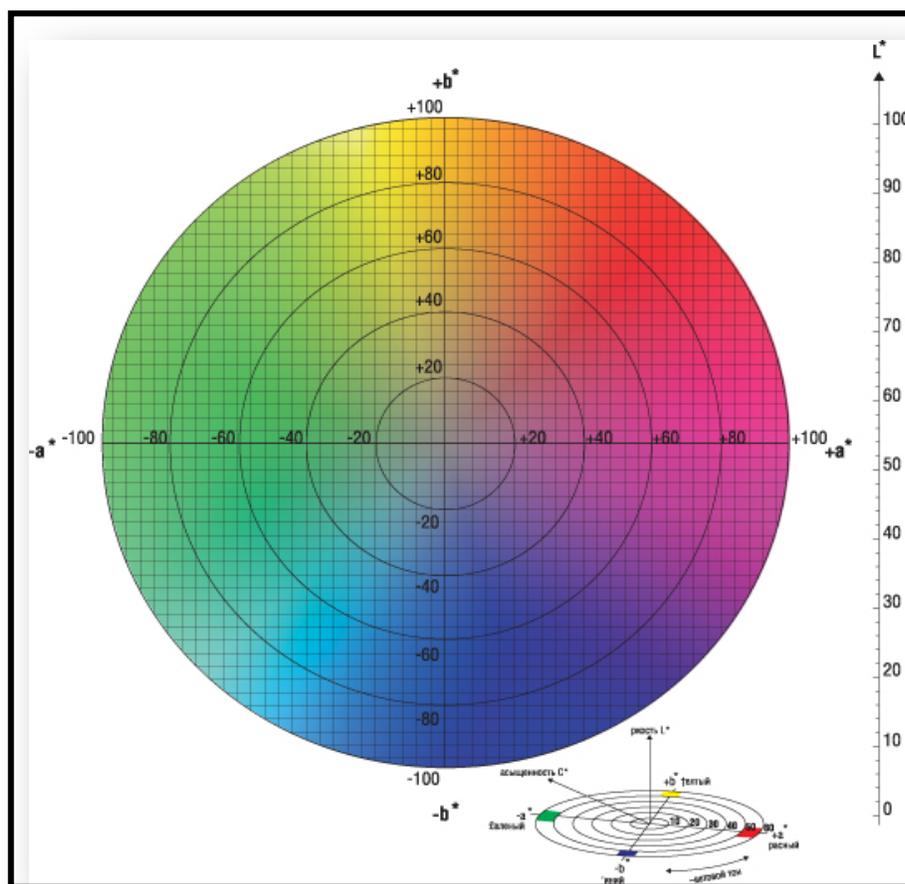
**Figura 2.13 Determinación de color de sólidos granulares de nopal; a) Colorímetro Minolta Modelo CR300; b) Llenado con sólidos granulares de nopal harina del dispositivo de sólidos y toma de lectura.**

Se determinó el color de los sólidos granulares de nopal en el colorímetro Minolta (Figura 2.13 a) utilizando el dispositivo de sólidos granulares. El dispositivo se llenó con sólidos granulares de nopal (Figura 2.13 b) y se colocó el lente, a continuación se realizó la lectura con el brazo para obtener los valores de las coordenadas de color CIE  $L^* a^* b^*$  (Donde:  $L^*$  representa la diferencia entre la



luminosidad ( $L^*=100$ ) y la oscuridad ( $L^*=0$ );  $a^*$  representa la diferencia entre verde (-100) y rojo (+100);  $b^*$  representa la diferencia entre azul (-100) y amarillo (+100)); utilizando un ángulo de observador de  $2^\circ$  y un iluminante C (Minolta, 1994).

Los resultados obtenidos para los valores  $L^*$   $a^*$   $b^*$  se pueden revisar en el círculo de color mostrado en la Figura 2.14.



**Figura 2.14** Círculo de color  $L^*$   $a^*$   $b^*$ .

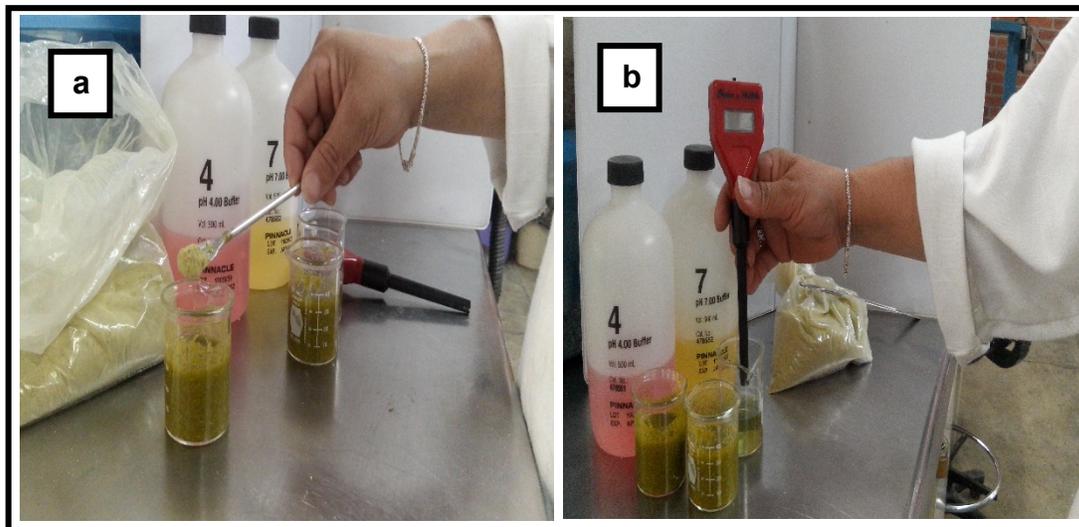
Utilizando el colorímetro se ubicaron en el círculo de color las coordenadas de la tonalidad del color de cada una de las muestras experimentales deshidratadas y molidas para realizar un análisis comparativo en función del estado de madurez.

Las tonalidades del color verde son diferentes y por esa razón es necesario evidenciar con valores.



## 2.6.2 Determinación de pH

El pH de las muestras se determinó con el método 44-19 AACC (2000) con un potenciómetro Jenco Electronics, Modelo 6071. Como muestra la Figura 2.15.



**Figura 2.15 Determinación de pH de muestras de nopal deshidratado a) preparación de las soluciones b) medición de pH.**

Las determinaciones se realizaron por triplicado con el propósito de establecer la alcalinidad del nopal. Se calculó el promedio y la desviación estándar de los datos. El potenciómetro se calibró a temperatura ambiente con dos soluciones amortiguadoras de referencia (J.T. Baker buffer standard pH 4, pH 7). Se prepararon soluciones de 100mL de nopal al 1% con agua destilada, se colocaron agitadores magnéticos y se sellaron herméticamente, después se pasaron al vibrador y se agitaron durante dos horas y reposaron por 6 horas, se registró la lectura del pH en el sobrenadante con un potenciómetro (JENCO Electronics LTD, mod. 6071).

## 2.7 Actividades para el Objetivo 6

El Análisis Químico Proximal (A.Q.P) se emplea para determinar la composición aproximada de un alimento, en cuanto al contenido de humedad, materia seca, cenizas, proteína cruda, fibra dietética, extracto etéreo y extracto libre de nitrógeno.



---

Para el estudio proximal se siguieron las metodologías descritas en la AOAC (2000), las cuales se describen brevemente a continuación.

### **2.7.1 Determinación de humedad por secado en estufa**

El contenido de humedad es indicio de estabilidad, calidad y medida indirecta de sólidos totales; por lo que es importante su cuantificación sobre todo cuando se va a almacenar un alimento. Por otro lado, es necesario conocer la cantidad de materia seca para poder realizar la conversión de los nutrimentos contenidos en los alimentos a base húmeda o base seca según sea lo requerido. Esta determinación se llevó a cabo por estufa. En tres charolas de aluminio puestas previamente a peso constante se pesaron en una balanza analítica marca OHAUS modelo E11140, 10 gramos de nopal deshidratado. Las charolas se colocaron dentro de una estufa a 80 °C hasta llegar a un peso constante. Se obtuvo la humedad. La relación utilizada para la obtención del porcentaje de humedad fue:

$$\% \text{ Sólidos Totales} = \left( \frac{PCM_h - PCM_s - PC}{gM} \right) \times 100$$

*Donde:*

PCM<sub>h</sub> = Peso de la Charola con Muestra húmeda

PCM<sub>s</sub> = Peso de la Charola con Muestra seca

PC = Peso de la Charola

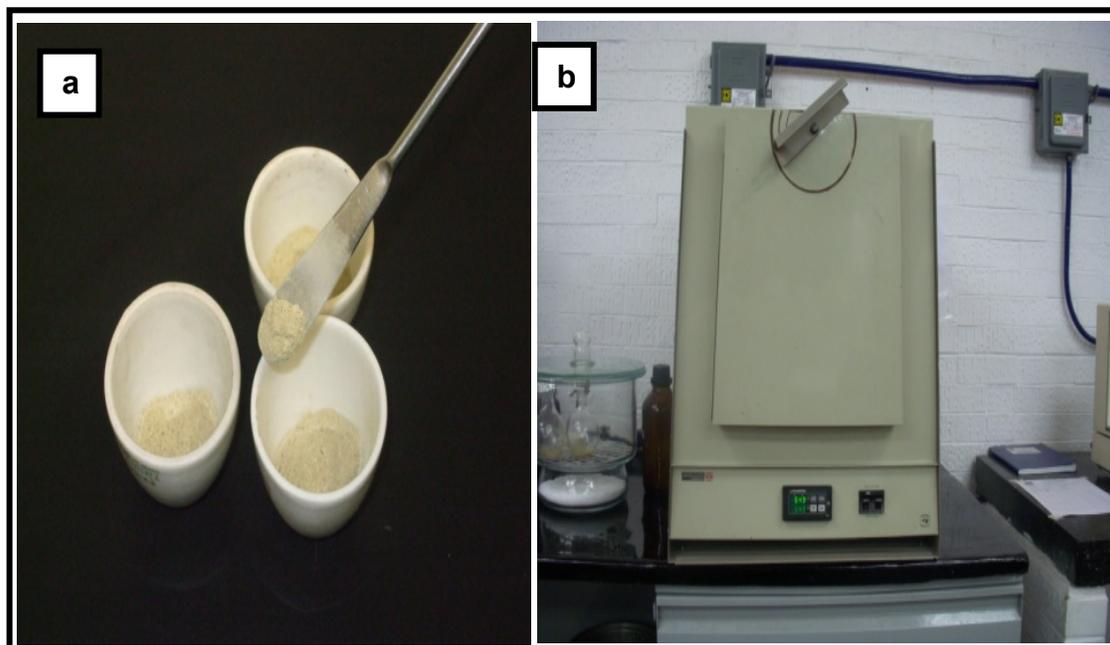
gM = gramos de Muestra

Esta determinación reporta la cantidad de humedad presente en la muestra.

### **2.7.2 Determinación de cenizas.**

Se realizó la determinación de acuerdo al método 942.05. Las cenizas se determinan por combustión, se usaron 2 gramos de muestra y se incineraron a una temperatura de 600 °C. Figura 2.16.

Se basa en la descomposición de la materia orgánica quedando solamente materia inorgánica en la muestra, es eficiente ya que determina tanto cenizas solubles en agua, insolubles y solubles en medio ácido.



**Figura 2.16 Determinación de cenizas de nopal deshidratado**

En este método toda la materia orgánica se oxida en ausencia de flama a una temperatura que fluctúa entre los 550 – 600 °C; el material inorgánico que no se volatiliza a esta temperatura se conoce como ceniza (Nollet, 1996).

### **2.7.3 Determinación de proteína cruda (PC) o bruta (nitrógeno total microkjeldahl).**

Esta determinación se describió en el punto 2.4 de este capítulo, sólo que posteriormente se realizó para las muestras de 50 y 150 días de maduración.

### **2.7.4 Determinación del extracto etéreo (EE).**

Se realizó la determinación de acuerdo al método 963.15 con un extractor de grasa Goldfish LABCONCO. La fracción lipídica se puede separar de otros componentes por medio de la extracción semicontinua con solventes orgánicos tales como el éter etílico, éter de petróleo, benceno, cloroformo, etc. y se reporta como la fracción soluble en éter o grasa cruda o bruta. Figura 2.17.



**Figura 2.17 Determinación de extracto etéreo**

En este método el disolvente se calienta, se volatiliza y condensa goteando sobre la muestra, la cual queda sumergida en el disolvente. Posteriormente éste es sifoneado al matraz de calentamiento para empezar de nuevo el proceso. El contenido de grasa se cuantifica por diferencia de peso.

#### **2.7.5 Determinación de fibra dietética insoluble y fibra dietética soluble.**

Se realizó la determinación de fibra dietética insoluble y soluble de acuerdo a los métodos 991.41 y 993.19 de la AOAC, respectivamente. Este es un método que se fundamenta en aislar la fracción de interés por una precipitación selectiva y después determinar su peso. Una muestra de alimento seco, desengrasado se digiere enzimáticamente con  $\alpha$ -amilasa, amilogucosidasa y proteasa para hidrolizar al almidón y la proteína. Los componentes solubles e insolubles en agua de la fibra pueden ser determinados filtrando la muestra enzimático-digerida (Figura 2.18), la fibra soluble se encuentra en la solución del líquido filtrado, y la fibra insoluble en el residuo. El componente insoluble se recoge del filtro, se seca y se pesa. El componente soluble es precipitado de la solución agregando alcohol del 95% al líquido filtrado y entonces es recuperado por la filtración, secado y pesado (Lee and Prosky, 1995).



**Figura 2.18 Determinación de fibra dietética insoluble y fibra dietética soluble.**

### **2.7.6 Determinación de calcio**

La concentración de calcio se determinó en las muestras de nopal deshidratados obtenidos a tres estados de maduración. Esta determinación se realizó por espectrofotometría de absorción atómica, para establecer la concentración del mineral. Esto se realizó acorde con el método 974.24 de la AOAC, (2000) modificado, ya que las cenizas se obtuvieron por digestión en ácido en un horno de microondas (CEM, modelo MDS 81D). Posteriormente, se determinó la concentración del analito en un espectrofotómetro Modelo Analyst 300, Marca Perkin Elmer (EU) de absorción atómica de doble haz, con una lámpara de deuterio y una lámpara de cátodo hueco. El equipo es operado a 12 psi de presión de aire seco, 70 psi de acetileno, 422.7 nm de flama y 0.7 nm de abertura de la rendija. Se colocaron 0.25 g de sólidos granulares de nopal en los vasos de Teflón (CEM, modelo, PFA-LV) de microondas y se les agregó 10 mL de ácido nítrico, se taparon y se sellaron herméticamente (ver Figura 2.19 a). Se colocaron los vasos en el carrusel (ver Figura 2.19 b) y se introdujeron al horno de microondas (Figura 2.19 c), el cual se programó a tres rampas de calentamiento: la primera de temperatura ambiente hasta 130 °C en



4:30 minutos, la segunda de 130 °C, hasta 150 °C en 4.0 minutos y la última de 150 a 175 °C en 4.0 minutos, manteniendo la temperatura constante durante 15 minutos. Posteriormente, las muestras se dejaron enfriar. Después de digerir la muestra se filtró con Papel filtro No. 42, se le adicionó 1mL de óxido de lantano y se aforó a 100 mL con agua tridestilada. Se preparó la muestra para introducirla en un vaso de precipitado. Se preparó la curva con el estándar al 2 % de calcio para calibrar y leerlas. Se colocó una lámpara de cátodo hueco para leer Ca en el equipo.

Se introdujo la manguera que manda el líquido al nebulizador, las muestras se leyeron en un equipo de espectroscopía de absorción atómica de flama utilizando como gases aire-acetileno para producir la flama (ver Figura 2.19 d).

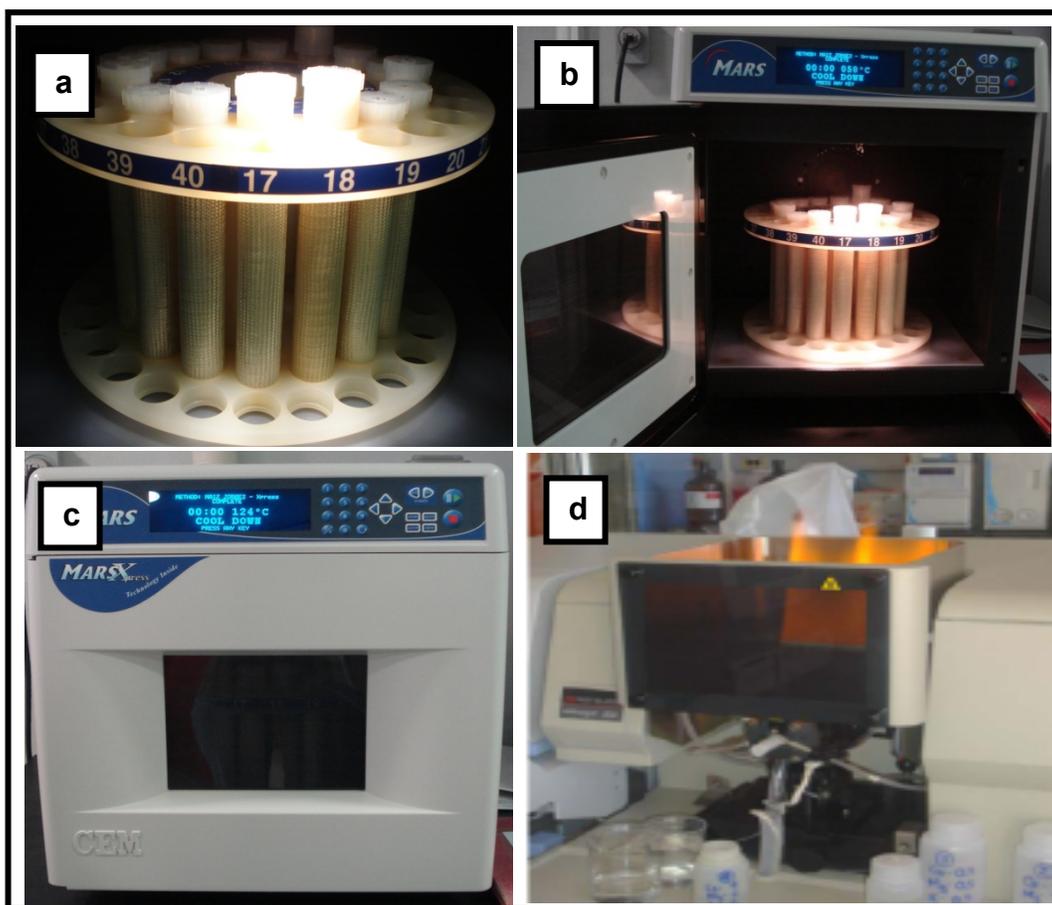


Figura 2.19 Derminación de Calcio.



### 3.1 Actividades preliminares

Al terminar la selección de los nopales de diferente edad las muestras fueron trasladadas al laboratorio.

### 3.2 Resultados del objetivo 1: (Caracterización de cladodios).

Las muestras fueron pesadas y se establecieron sus diferencias típicas de la edad (dimensiones, peso y espesor). Los resultados se reportan en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Dimensiones y peso de nopales con diferente estado de maduración

Madurez (días)		Longitud (cm)	Ancho (cm)	Espesor (cm)	Peso (g)
50	Promedio	19.22	10.56	0.88	202.36
	Desviación estándar	00.22	00.22	0.01	1.39
	CV (%)	1.13	2.10	1.47	0.69
100	Promedio	22.13	13.23	1.29	405.79
	Desviación estándar	00.45	00.62	0.13	4.34
	CV (%)	2.07	4.71	9.81	1.068
150	Promedio	28.22	16.72	2.09	602.31
	Desviación estándar	00.43	00.25	0.17	1.01
	CV (%)	1.51	1.49	7.90	0.17

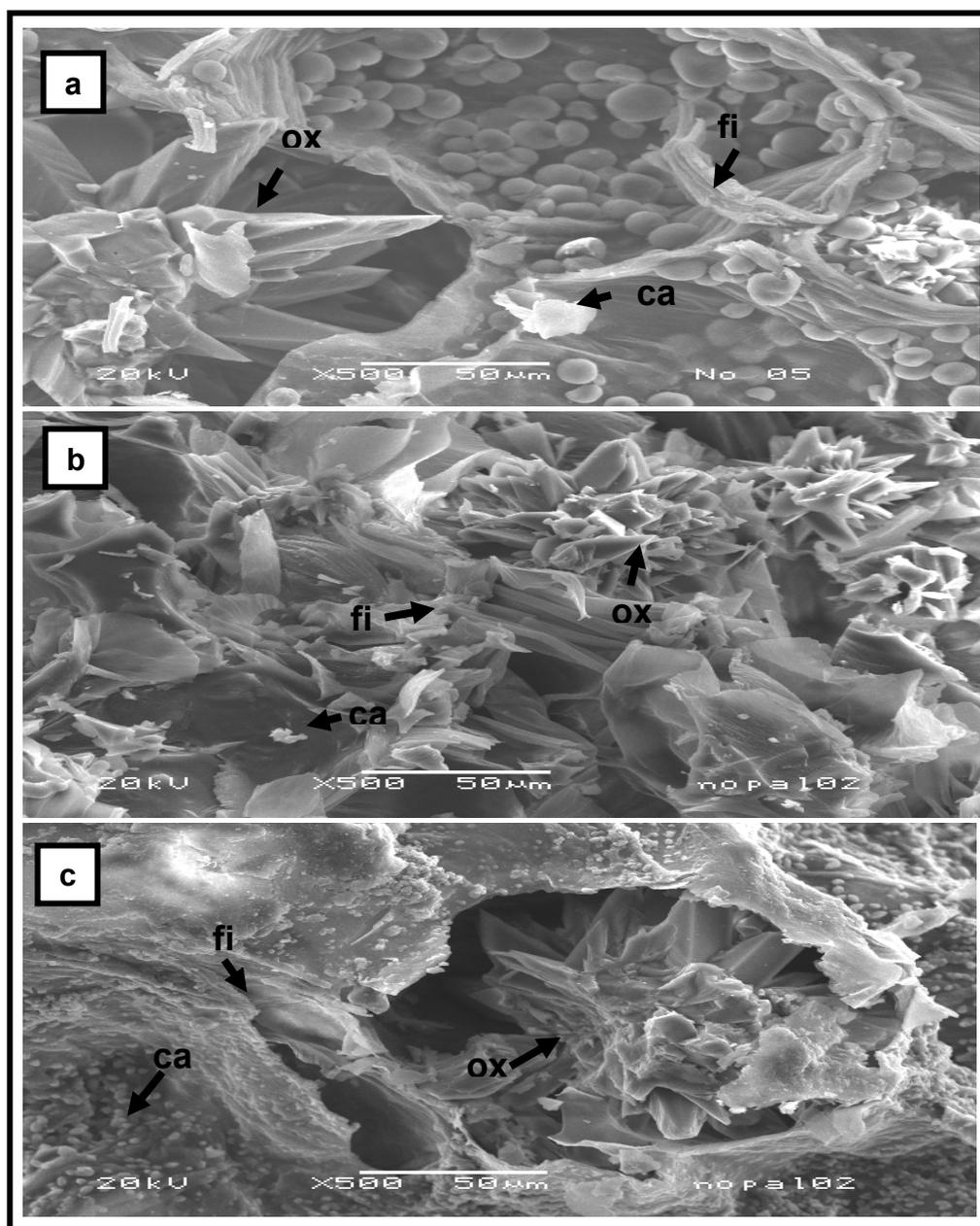
Como puede apreciarse en la tabla los nopales de 50 días corresponden a pesos de 200 g, son de menor espesor y de menores dimensiones, los de 100 días a pesos de 400 y los de 150 días pesaron como promedio 600 g, tienen el más grande espesor y las mayores dimensiones ( largo, ancho y espesor).

### 3.3 Resultados del objetivo 2: (Morfología).

La morfología y los componentes que integran a los nopales de diferente estado de maduración se presentan en las micrografías tomadas a 500 aumentos para



obtener la mayor cantidad de elementos representativos de las unidades experimentales, dentro de los que destacan los oxalatos de calcio (**ox**), carbonatos de calcio (**ca**), y fibras insolubles (**fi**). En la Figura 3.1 se presenta a) para nopales de 50 días, b) para nopales de 100 días y c) para nopales de 150 días.

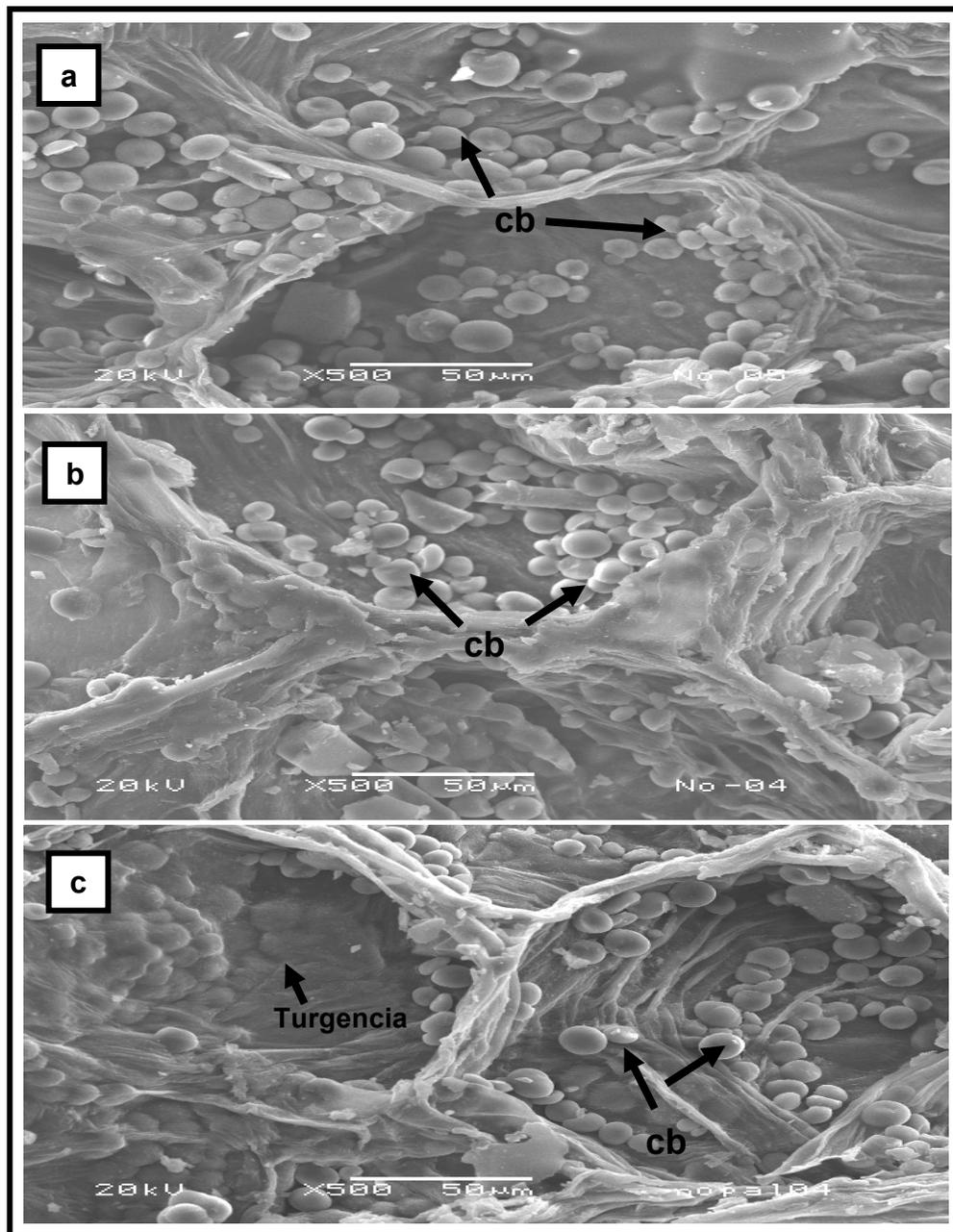


**Figura 3.1** Micrografías de nopales de diferente estado de maduración para la identificación de oxalatos a) De 50 días, b) De 100 días, c) De 150 días.

En todas las micrografías a, b, c aparecen oxalatos de calcio en forma de drusas o estrellas, pero en la micrografía b) correspondiente a 100 días hay mayor



presencia de ellos, de acuerdo a lo que reporta Contreras-Padilla *et al.* (2011). Tienen un estado cíclico. Por otro lado la presencia de carbonatos es mayor en la micrografía c) de nopales de 150 días, al igual que la fibra insoluble. Otro elemento característico de nopales con diferente estadio de maduración son las células buliformes que se presentan en la Figura 3.2.



**Figura 3.2** Micrografías de nopal de diferente estado de maduración para identificar células buliformes. a) De 50 días, b) De 100 días, c) De 150 días.



Las células buliformes son células en forma de esfera, dentro de ellas puede haber agua, carbonatos de calcio (ca) o mucílago.

Las micrografías con mayor cantidad de células buliformes son las de 50 días, porque son nopales frescos, y en la micrografía c) de 150 días parece haber células buliformes que han perdido la turgencia y están por debajo de las fibras.

### 3.4 Resultados del objetivo 3: (Optimizar establecimiento de las condiciones de secado).

Para poder hacer estas actividades, se realizó el secado de nopal de 100 días de maduración o de 400 g, que es el nopal a tres temperaturas diferentes 50, 60 y 70 °C que se seleccionaron tomando en consideración los resultados publicados en artículos de deshidratación de nopal. Dado que la proteína es un componente termolábil se consideró como un patrón para las otras temperaturas.

- **Cinética de secado de nopal.**

Los resultados de la cinética de secado del nopal se muestran en la Figura 3.3 en una estufa de secado convectivo.

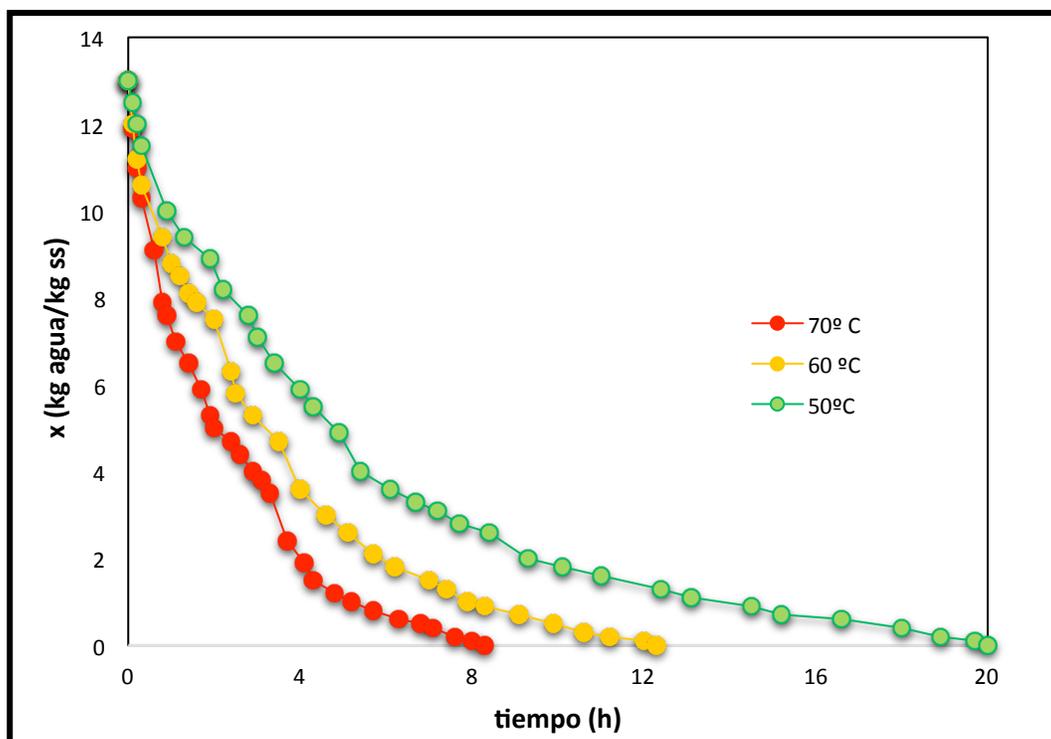


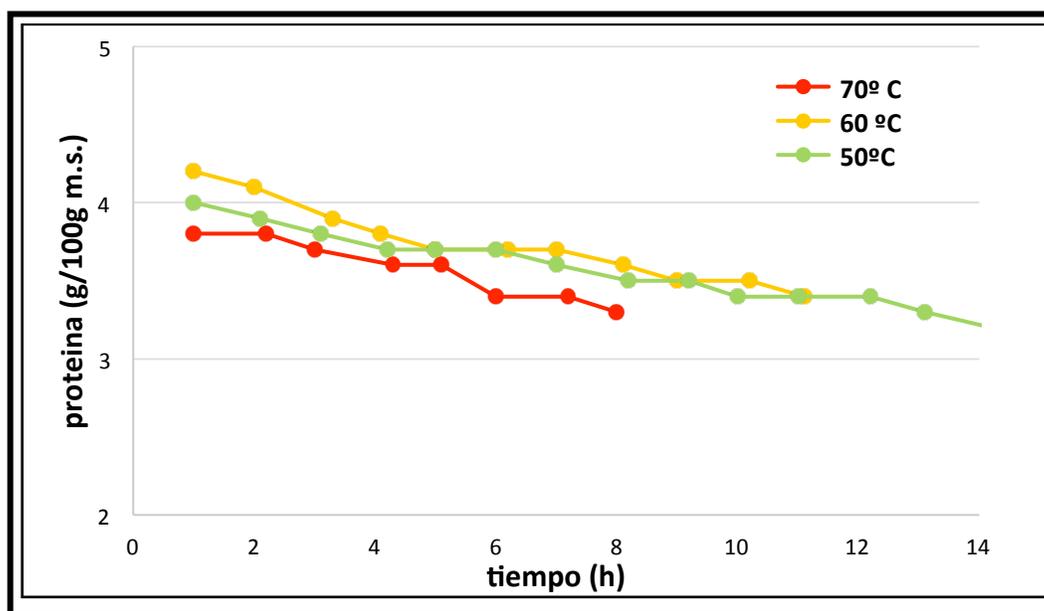
Figura 3.3 Cinética de secado del nopal de 100 días en horno de aire forzado a 3 diferentes temperaturas.



De los resultados observados para llegar a la humedad de 4%, al aumentar la temperatura de secado disminuye el tiempo necesario para la deshidratación de la muestra. Cuando el secado se realizó a 50 °C el tiempo de proceso fue de 20 horas, mientras que cuando la temperatura fue de 60 °C el tiempo fue de 12 horas y con 70 °C el tiempo se redujo a 8 horas. Estos resultados indican que la temperatura de secado es un factor importante en el proceso de deshidratado de las muestras, ya que promueve una mayor rapidez en la difusión y evaporación del agua; lo cual concuerda con los resultados encontrados por Lahsasni *et al.* (2004).

- **Cinética de degradación de proteínas durante el secado.**

Las proteínas son compuestos termolábiles que pueden funcionar como un indicador del deterioro de otros compuestos presentes de importancia nutricional y funcional en el nopal. Los resultados obtenidos para la cinética de degradación de proteínas durante el secado se muestran en la Figura 3.4.



**Figura 3.4 Cinética de degradación de proteína del nopal de 100 días durante el secado en estufa.**

La gráfica indica que, durante la operación de secado, hay una pérdida del contenido de proteínas en las temperaturas estudiadas, no siendo estadísticamente significativa la pérdida de proteína para las 3 temperaturas analizadas. En donde la temperatura de 70 °C fue la que presentó una mayor



degradación. Esto se debe a que las proteínas son compuestos sensibles a la temperatura. Mientras que la temperatura de 50 °C presentó la menor variación en cuanto al contenido inicial y final de proteína. Dado que las pérdidas de proteína no fueron significativas, la mejor opción de secado fue a 70 °C ya que es la temperatura que emplea un menor tiempo de secado.

### **3.5 Resultados del objetivo 4: (Reducción de tamaño y análisis granulométrico).**

Una vez deshidratados los nopales de las diferentes edades (ver Figura 3.5) se trituraron hasta que pasaran el tamiz 4 USA.



**Figura 3.5 Muestras de nopal deshidratado a diferentes edades**

A simple vista los nopales de mayor edad se perciben claramente que sus fibras son muy gruesas y grandes. Adicionalmente, puede observarse la tonalidad del verde de las muestras secas cambio a un color más claro. Estas unidades experimentales son las que fueron molidas hasta pasar la criba 0.5 mm. Para obtener sólidos granulares homogéneos y de pequeñas dimensiones. En la Tabla 3.2 se muestran los resultados obtenidos de la potencia consumida y el consumo de energía durante la molienda.



**Tabla 3.2 Consumo de potencia y energía consumida de nopal deshidratado**

Edad del nopal	Molienda Consumo de potencia (Kw)	Molienda Energía consumida W/h/Kg
50 días	4.76.34 ± 0.12	230.51 ± 0.16
100 días	5.32.16 ± 0.08	262.18 ± 0.78
150 días	6.41.86 ± 1.11	284.08 ± 1.04

Los mayores consumos tanto de potencia, como gastos de energía los presentaron las muestras de 150 días, debido a que estos nopales presentan mayor cantidad de fibra y esto aumentó los tiempos de residencia en el molino Pulvex.

Las muestras deshidratadas y trituradas de las edades de nopal a 50 días donde el peso fue de 200 g, las de 100 días pesaron 400g y los de 150 días pesaron 600 g. En la Figura 3.6 se muestran los sólidos granulares.

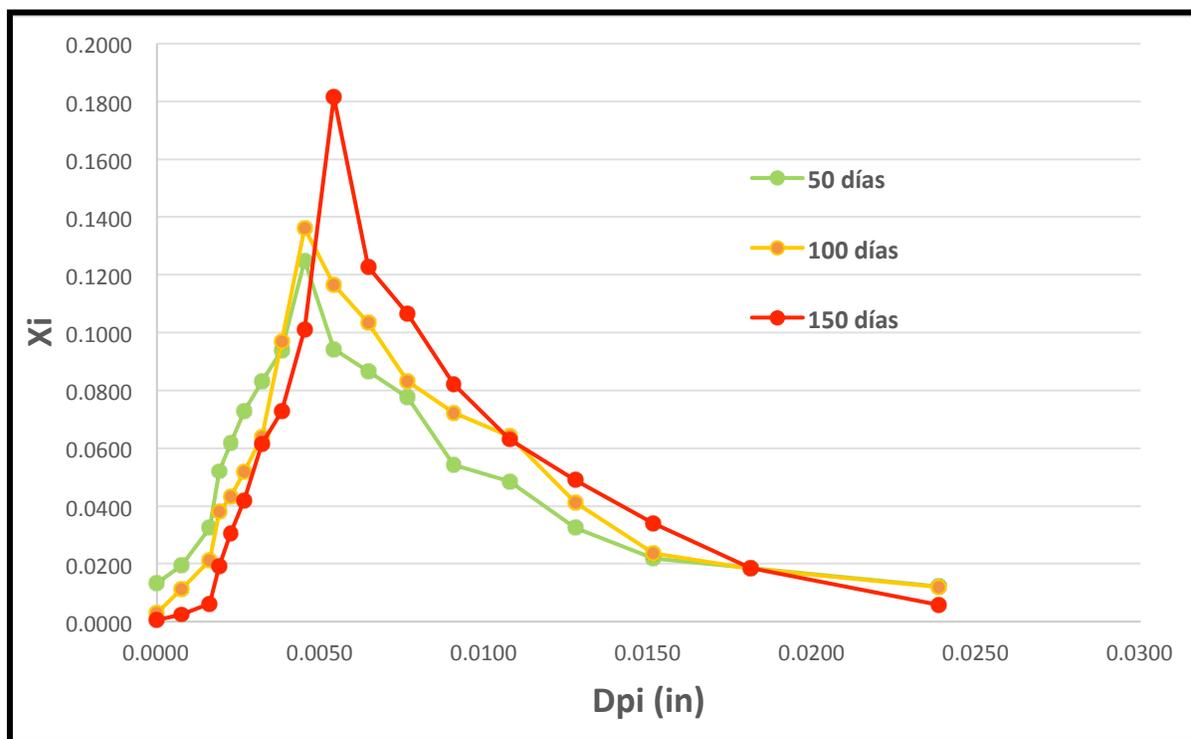


**Figura 3.6 Sólidos granulares de nopal de diferentes edades**

Estos sólidos granulares de nopal de diferente estado de maduración, corresponden a las diferentes unidades experimentales que fueron caracterizados.



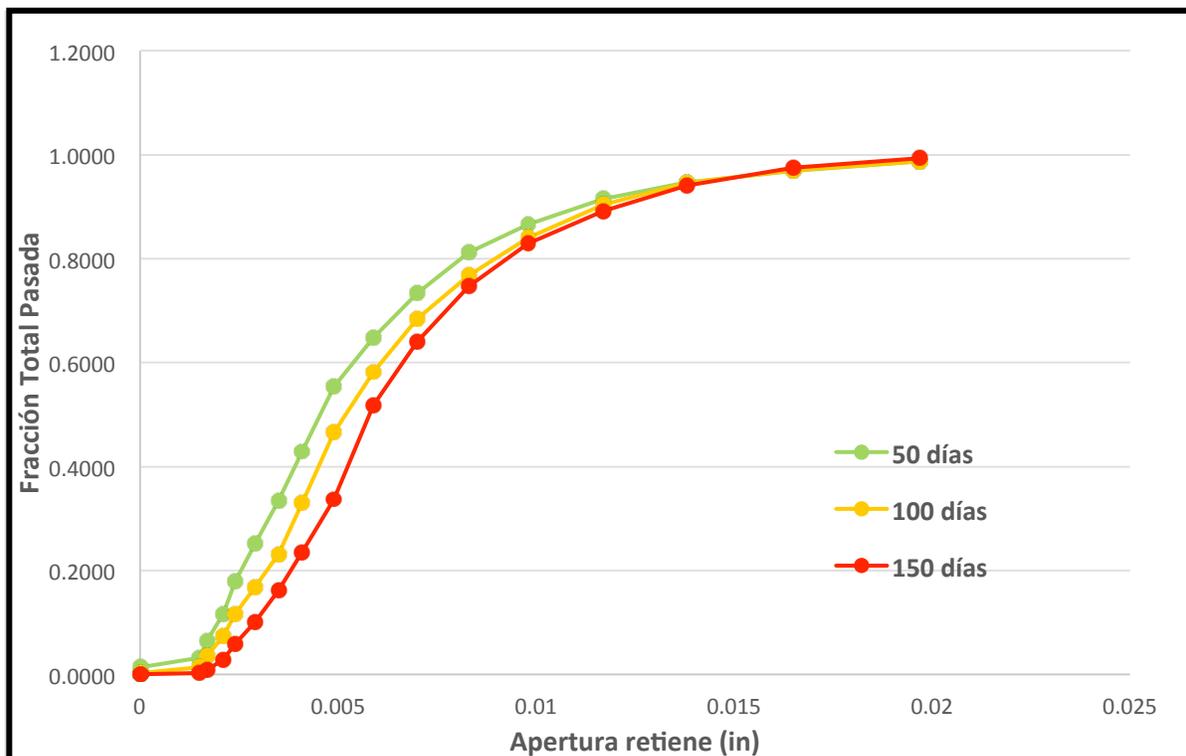
Los resultados del análisis granulométrico se muestran en la Figura 3.7. en la grafica diferencial



**Figura 3.7 Gráfica diferencial de sólidos granulares de nopal**

En la gráfica se reporta la distribución de tamaño de sólidos granulares de nopal de diferente edad. El comportamiento de la granulometría de todas las muestras es polidisperso a pesar que la restricción a la salida durante la molienda fue de 0.5 mm. Debido a que estos sólidos pasan casi toda la serie de tamices USA. Las muestras de 600 g (150 días) son las menos homogéneas y con mayor tendencia a gruesos, mientras que la de 200 g (50 días) presentan mayor tendencia a finos es casi el mismo, la mayor parte de los polvos estuvieron ubicados entre los diámetros promedios de 0.15 a 0.3 mm. Lo anterior indica que las muestras son heterogéneas en su tamaño de partículas.

En la gráfica acumulativa se presentan los datos de los sólidos granulares de nopal, que se aprecian en la Figura 3.8.



**Figura 3.8 Gráfica acumulativa de sólidos granulares de nopal**

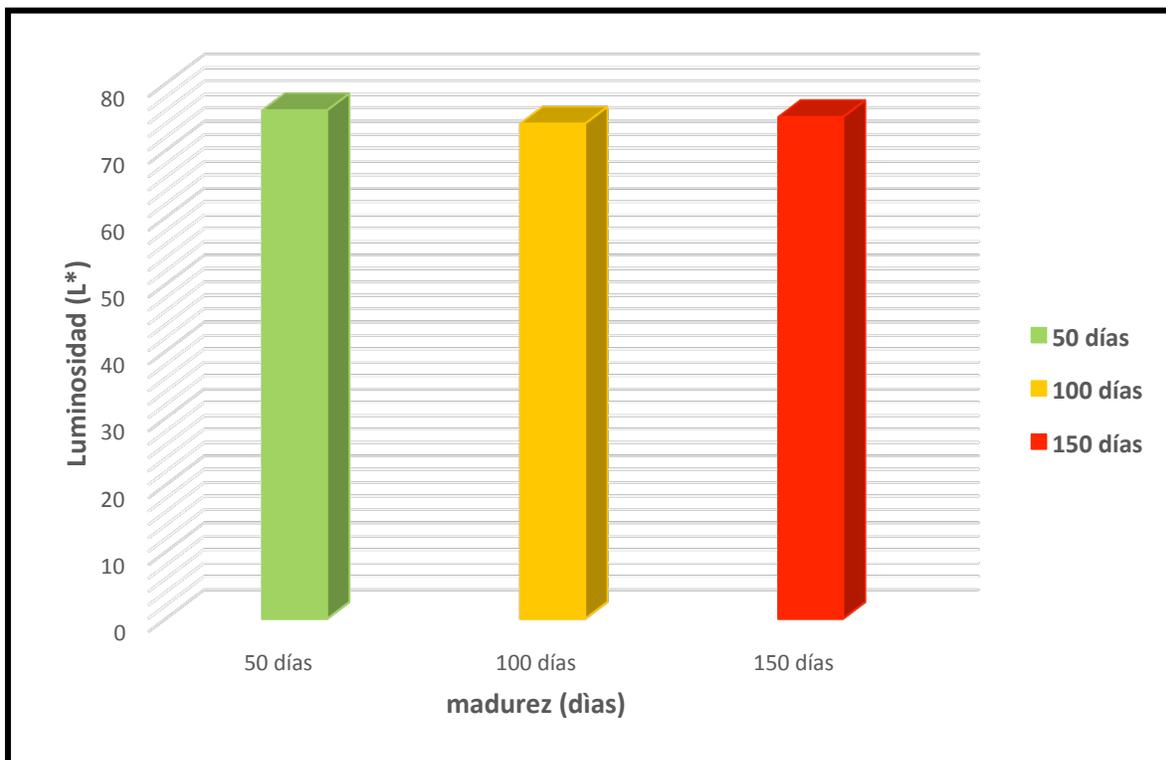
En esta gráfica se puede apreciar que los sólidos de nopal de 50 días (200 g) son los que presentan menores tamaños de partícula de todas las unidades experimentales, siguiéndole la de 100 días de maduración (400 g) y finalmente las de 150 días (600 g). Esto es debido a que al aumentar el estado de maduración las muestras presentan mayor cantidad de fibra insoluble, lo que repercute con tamaños mayores en la molienda y una distribución de tamaño mayor.

### **3.6 Resultados del objetivo 5: (Color y pH).**

- **Resultados de color de las harinas de nopal.**

El valor L indica la luminosidad de la muestra, el valor  $c^*$  o croma indica que tan vivo o pálido es el color de una muestra y el valor de h o hue indica que tonalidad tiene la muestra.

La Figura 3.9. expone los valores de luminosidad ( $L^*$ ) de las muestras de harina de nopal deshidratado.



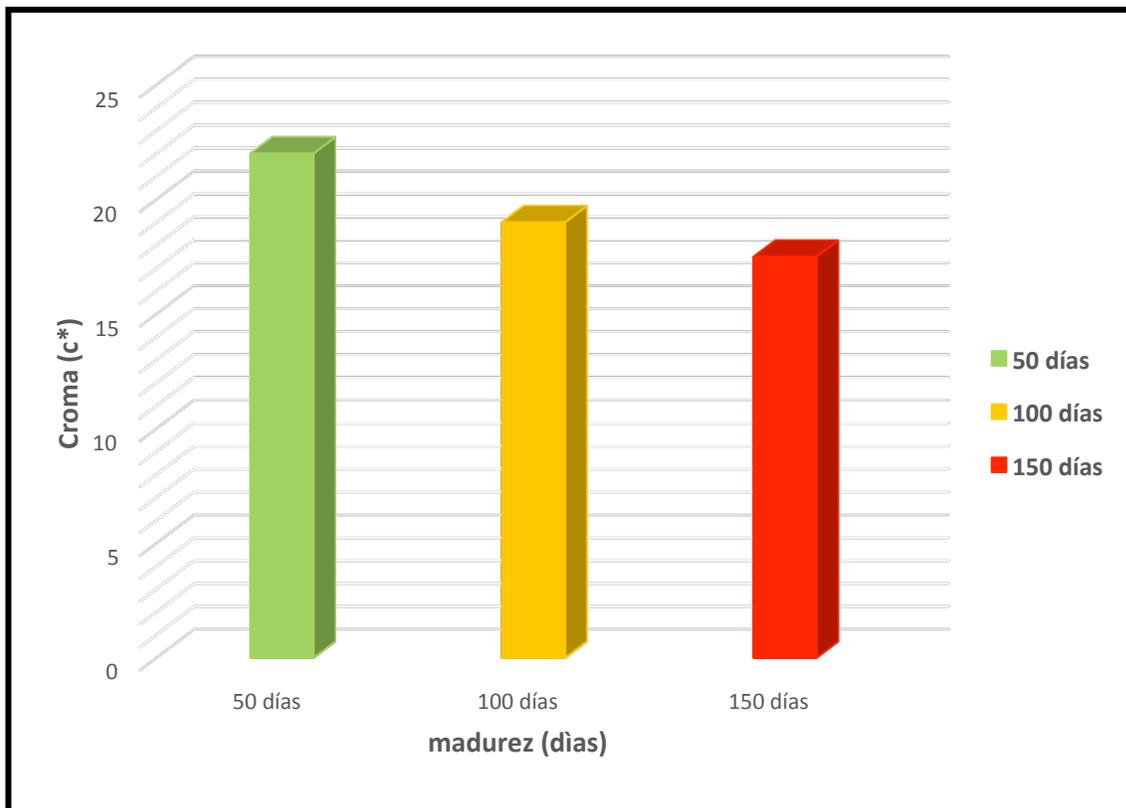
**Figura 3.9 Valores de luminosidad de muestras de nopal**

Los resultados analizados indicaron que no existe diferencia estadística significativa en la luminosidad de las tres edades de maduración de nopal. Ya que las tres mostraron valores similares.

Los resultados de luminosidad obtenidos, mostraron un alto valor, alrededor de 75, lo cual indica que las muestras de sólidos granulares de nopal son verde claro, ya que al ser deshidratadas baja su luminosidad. Este es un atributo deseable para consumo humano.

En la Figura 3.10 se presentan los valores de croma ( $c^*$ ) de las muestras de sólidos granulares de nopal.

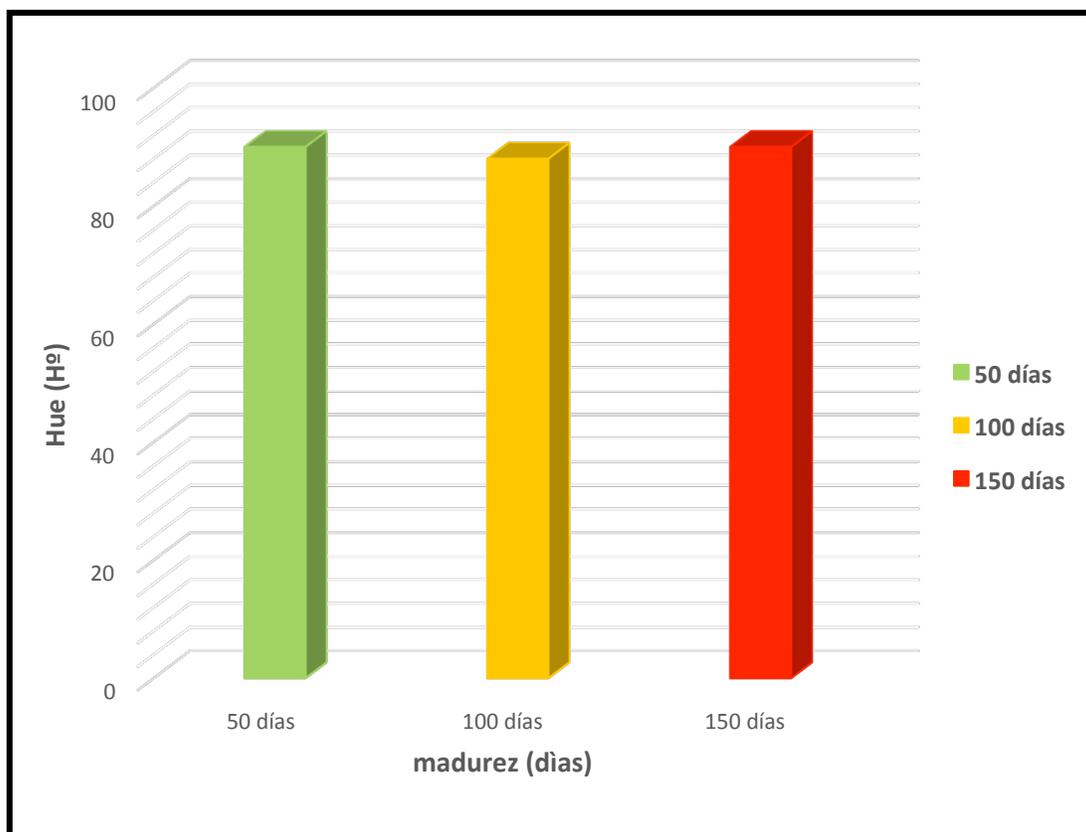
Los valores bajos de croma indican que las muestras son pálidas, es decir, su color no es vivo, y que puede perderse el color por efecto de algún tratamiento en alimentos.



**Figura 3.10 Valores de croma de sólidos granulares de nopal obtenidas con diferentes estadios de madurez.**

En el caso del nopal la pérdida del color vivo probablemente fue causado por que los compuestos que imparten el color verde, clorofilas, son sensibles al calor. Los resultados mostraron que las muestras de 150 días o muestras de 600 g fueron más pálidas que los otros estadios estudiados 50 y 100 días (200 y 400g), esto debido, tal vez, a que en este estado de madurez los nopales tienen cambios fisiológicos. Así el croma disminuyó al aumentar la edad de los nopales.

La Figura 3.11 expone los valores de Hue, este factor indica hacia donde se encuentra en las coordenadas de color la tonalidad de la muestra de los sólidos granulares de nopal de diferente estado de maduración. El valor de hue es relativo a la tonalidad que presenta.

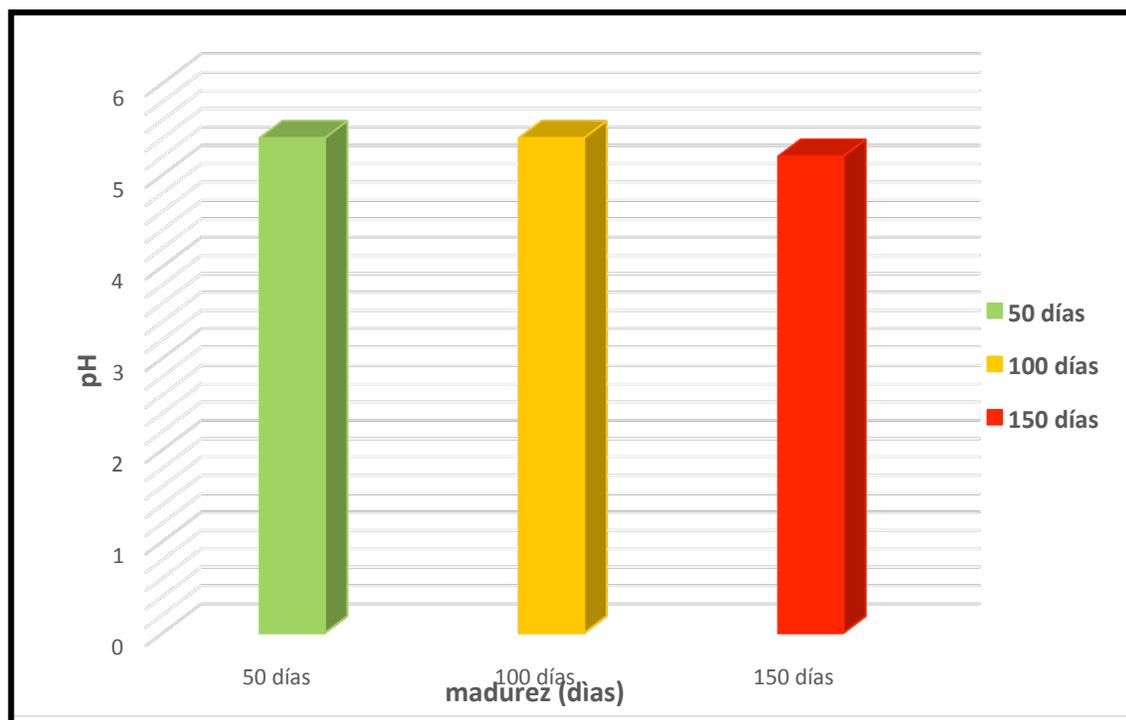


**Figura 3.11 Valores de hue de las muestras de harina de nopal obtenidas con diferentes estadios de madurez.**

La Figura 3.11 evidencia los resultados de hue, este mostró valores de aproximadamente 90-98°, lo cual indica una tonalidad amarillo-verdosa, esto es debido a que durante el secado, los nopales perdieron el color verde intenso que los caracteriza. Para las tres muestras no hay diferencia significativa entre los estadios de madurez.

- **Los valores obtenidos de pH**

Los resultados de pH son presentados en una gráfica de barras para realizar un análisis comparativo para las tres unidades experimentales caracterizadas. Estas unidades presentaron valores ácidos. Una posible explicación es que esta clase de plantas poseen metabolismo de ácido crasuláceo que produce compuestos ácidos como parte de su ciclo (Cushman, 1999).



**Figura 3.12 Evaluación del pH de las muestras de harina de nopal obtenidas con diferentes estadios de madurez.**

La Figura 3.12. Es evidencia que las unidades experimentales tienen la misma acidez y que al ser evaluado no mostró diferencias importantes.

### **3.7 Resultados del objetivo 6: (Análisis químico Proximal (AQP) y Calcio).**

. Los resultados del análisis químico proximal de las muestras de nopal deshidratado, se muestra en la Tabla 3.3.

**Tabla 3.3 Análisis químico proximal del nopal deshidratado**

<b>Nopal Madurez</b>	<b>Minerales (cenizas) g/100g</b>	<b>Extracto etéreo g/100g</b>	<b>Proteínas g/100g</b>	<b>Humedad (%)</b>	<b>Fibra Soluble g/100g</b>	<b>Fibra Insoluble g/100g</b>
<b>50 días</b>	0.832	1.96	7.17	93.175	14.289	30.016
<b>100 días</b>	0.994	1.73	7.05	93.595	15.624	36.906
<b>150 días</b>	1.208	1.52	5.85	93.666	17.912	46.413

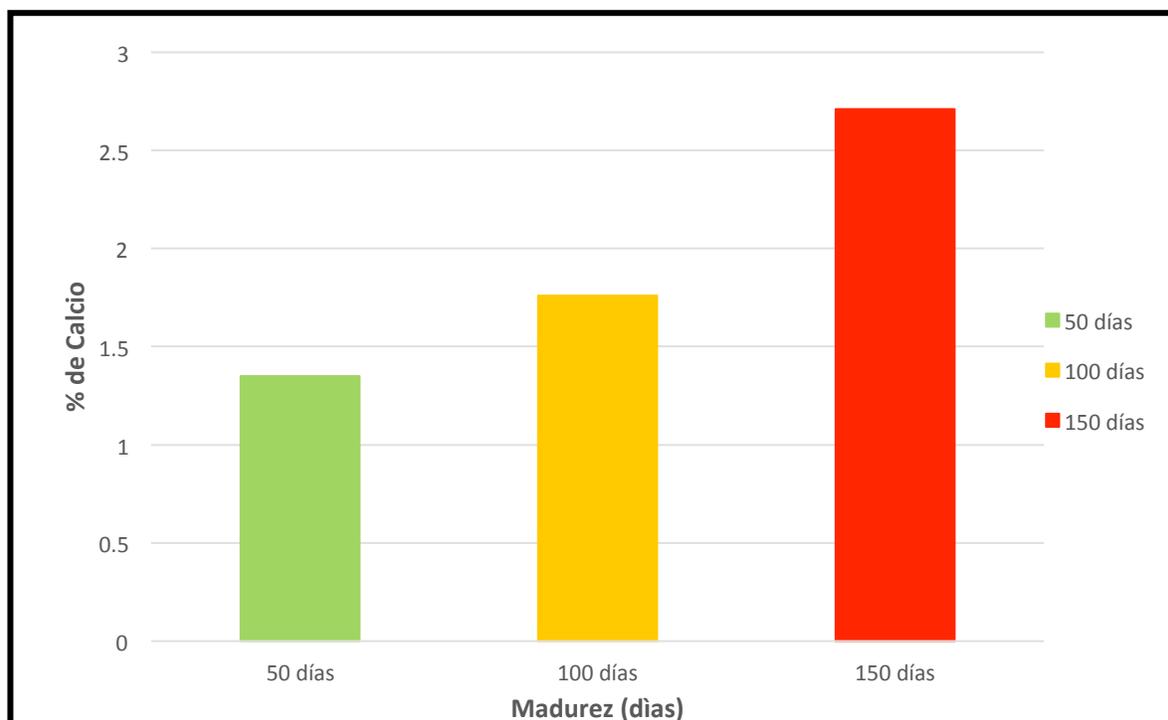


Se determinó el contenido de proteínas, minerales (cenizas), extracto etéreo, fibra soluble e insoluble y humedad de nopal fresco en diferentes estados de maduración.

El contenido de minerales es alto debido a que en el nopal deshidratado se concentra la composición química. Por otro lado el extracto etéreo disminuyó al aumentar su estado de madurez del nopal y en general presenta valores muy bajos. Sin embargo, el contenido protéico disminuye al aumentar el estado de maduración del nopal. La fibra soluble aumentó al aumentar la maduración del nopal. Pero además por efecto de concentración presentó mayor cantidad el nopal de mayor edad que el más tierno. Pero la fibra insoluble aumentó al aumentar la edad del nopal. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Rodríguez-García *et al.* (2007).

- **La concentración de calcio**

El contenido de calcio en muestras de nopal deshidratado de tres estados de maduración se muestra en la gráfica de la Figura 3.13.



**Figura 3.13 Concentración de calcio de nopal deshidratado**



---

Los sólidos granulares de nopal que presentaron mayor concentración de calcio fueron los de mayor estado de maduración, o sea las de nopales de 150 días (600 g) y su concentración de calcio fue de 2.73 %.

Las muestras de menor edad presentaron bajas concentraciones de calcio de 1.39 %, mientras que las de nopales de 100 días de maduración (400 g) de peso presentaron una concentración de 1.79 %.



---

## CONCLUSIONES

- 🌵 Se confirma que el aumento del estado de maduración de los cladodios, es proporcional a sus dimensiones, peso y espesor, siendo los cladodios de 150 días los que tienen resultados mayores en dichas características.
- 🌵 La morfología de los cladodios expone las diferencias entre las 3 diferentes edades analizadas, los oxalatos de calcio se presentan en mayor proporción en los nopales de 100 días, mientras que los carbonatos de calcio se encuentran más concentrados en los nopales de 150 días, al igual que la fibra insoluble. Por el contrario los nopales de edad de 50 días son los que cuentan con mayor número de células buliformes.
- 🌵 La temperatura idónea para el secado de los cladodios se define de 70 °C, ya que el tiempo de secado se disminuye notablemente, de 20 a 8 horas, a pesar de que las proteínas contenidas son termolábiles, la degradación derivada del secado no se considera significativa.
- 🌵 El consumo de energía para la molienda fue mayor para los cladodios de mayor edad (150 días) ya que sus fibras insolubles son más gruesas. Así mismo su granulometría presentó la distribución de tamaño heterogénea y muy cargada hacia los gruesos.
- 🌵 Mientras mayor fue la exposición de los nopales al secado más se deterioró la clorofila presente por lo que las unidades experimentales tomaron un color verde pálido. No se detecta diferencia significativa para el pH entre las tres diferentes edades.
- 🌵 Los resultados del AQP mostraron; mayor contenido de cenizas, la humedad y la fibra son mayores en proporción a la edad de los nopales, mientras que el extracto etéreo y la proteína disminuyen mientras más días tengan los nopales. La concentración de carbonato de calcio se incrementa al aumentar el estado de maduración.



---

## RECOMENDACIONES

- 🌵 Es recomendable trabajar otros estados de maduración de nopal.
- 🌵 Un Análisis de difracción de rayos x puede proporcionar evidencias de otros compuestos presentes en el nopal.
- 🌵 Es importante una determinación de viscosidad aparente con las diferentes unidades experimentales.
- 🌵 Se recomienda un estudio de vida útil por meses para los nopales deshidratados.



---

## REFERENCIAS

- 🌵 A.O.A.C. (2000). Official Methods of Analysis. 17th edition. Official Methods 920.39, 920.86 925.10, 965.17, 984.13. Ed. by the Association of Official Analytical Chemists, Maryland, U.S.A.
- 🌵 Arenas, A.J.A. (1999). Microscopía electrónica de barrido de bajo vacío. Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ). Ed. UNAM. México, D. F. p.13- 35.
- 🌵 Barbera, G. (1999). Historia e importancia económica y agroecológica. In: G. Barbera, P. Inglese, E. Pimienta-Barrios. Agroecología, cultivo y usos del nopal. Estudio FAO Producción y Protección Vegetal. Pp. 1-12. N° 132. FAO, Roma, Italia.
- 🌵 Barbosa-Cánovas, G. V., Ortega-Rivas, E., Juliano, P., Yan, H. (2005), Drying. In Food Powders-Physical Properties, Processing and Functionality, First Ed.; Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, pp. 271-304
- 🌵 Barrientos P., F. (1983), “Nopal y agaves como recursos de las zonas áridas de México”, *Recursos agrícolas de zonas áridas de México*, Colegio de Posgraduados, Chapingo, Estado de México, pp. 133-143.
- 🌵 Betancourt-Domínguez, M. A., T., Hernández-Pérez, P.,García-Saucedo, A., Cruz-Hernández, O. Paredes-López. (2006). Physico-chemical changes in cladodes (nopalitos) from cultivated and wild cacti (*Opuntia* spp.). *Plant Foods Hum. Nutr.* **61**: 115-119.
- 🌵 Bravo-Hollis, H. (1978). Las cactáceas de México. Universidad Autónoma de México, Vol 1, 2da. Edición Editorial Universitaria, México. 30-40p.
- 🌵 Chessa, I. y Nieddu, G. (1997). Descriptors for cactus pear (*Opuntia* spp.). In: P. Inglese (Ed.). Università degli Studi di Reggio Calabria. Cactusnet Newsletter. FAO International Technical Cooperation Network on Cactus pear. Special Issue. FAO, Roma, Italia.
- 🌵 Comentuna. 2009. Consejo Mexicano del Nopal y la Tuna A. C. México, <http://www.comentuna.com.mx>
- 🌵 Contreras-Padilla, M., Perez-Torrero, E., Hernández-Urbiola, M.I., Hernández-Quevedo, G. Del Real, A., Rivera-Muñoz, E. M., Rodríguez-García, M. E. (2011). Evaluation of oxalates and calcium in nopal pads (*Opuntia ficus-indica* var. *redonda*) at different maturity stages. *Journal of Food Composition and Analysis* **24**, 2011 38–43.



- 🌵 Contreras-Padilla, M., Gutiérrez-Cortez, E., Valderrama- Bravo, M. C.; Rojas-Molina, J. I; Espinoza-Arbeláez, D. G.; Suárez-Vargas, R., Rodríguez, M. E. (2012). Effects of drying process on the Physicochemical Properties of Nopal Cladodes at Different Maturity Stages. *Plant Foods Human Nutrition*. **67**, 44-49.
- 🌵 Cornejo-Villegas, M. A., Acosta-Osorio, A. A., Rojas-Molina, I., Gutiérrez-Cortez, E., Quiroga, M. A., Gaytán, M., Herrera, G., Rodríguez M. E. (2010). Study of the physicochemical and pasting properties of instant corn flour added with calcium and fibers from nopal powder. *Journal of Food Engineering* **96**: 401-409.
- 🌵 Cortázar-Figueroa, L.M., Meléndez- Pérez, R. Oliver- Hernández D.M. (2008). Energy consumption and size distribution in the grinding of cinnamon (*Cinnamomum zeylanicum*) and black pepper (*Piper nigrum* L.) *Revista Mexicana de Ingeniería Química Vol. 7*, No. **2**:123-130
- 🌵 Cushman J. C., y Bohnert H. J. (1999). Crassulacean acid metabolism: Molecular genetics. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*. **50**: 305–332.
- 🌵 FAO. (2006). Utilización agroindustrial del nopal. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia. Boletín 162.
- 🌵 Fernández-Muñoz, J. L., Rojas-Molina, I., González-Dávalos, M. L., Leal, M., Valtierra, M. E., Martín-Martínez, E., Rodríguez, M. E. (2004). Study of calcium ion diffusion in components of maize kernels during traditional nixtamalization process. *Cereal Chemistry*. **81**: 65-69.
- 🌵 Feugang-Magloire, J., Konarski, P., Zou, D., Stintzing-Conrad, F., Zou, C., (2006). Nutritional and medicinal use of Cactus pear (*Opuntia spp.*) cladodes and fruits, *Frontiers in Bioscience* **11**, pp. 2574-2589.
- 🌵 Fito, P., Andrés, A., Barát, J., Abors, A. (2001). Introducción al secado de alimentos por aire caliente. Editorial Universidad Politécnica de Valencia.
- 🌵 Flores-Valdez, C., J. M., De la Luna-Esquivel, E. Ramírez-Moreno, P.P. (1995). Mercado mundial del nopalito. ASERCA-UACH-CIESTAAM. Chapingo, México.
- 🌵 Flores-Valdez, C. (2003). Importancia del nopal. In: C. A. Flores-Valdez (Ed.) Nopalitos y tunas, producción, comercialización, postcosecha e industrialización. 1ª Ed. Pp. 1-18. Universidad Autónoma Chapingo, CIESTAAM. Chapingo, México.



- 
- 🌵 Galati, E.M., Mondello, R., Giuffrida, D., Dugo, G., Miceli, N., Pergolizzi, S., and Taviano, M.F. (2003). Chemical characterization and biological effects of Sicilian *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. Fruit juice: Antioxidant and Antiulcerogenic Activity. *Journal Agriculture Food Chemistry*. **51**: 4903-4908.
- 🌵 Geankoplis, C. J. (2006), Procesos de transporte y operaciones unitarias. (4ta. Ed.) p 435. Continental, México.
- 🌵 Ginestra, G. Parker, M.L., Bennett, R.N., Robertson, J., Mandalari, G., Narbad, A., Lo Curto, R.B., Bisignano, G., Faulds, C.B., Waldron, K.W. (2009). Anatomical, chemical, and biochemical characterization of cladodes from prickly pear [*Opuntia Ficus-indica* (L.) Mill.]. *Journal Agriculture Food Chemistry*. **57**: 10323-10330.
- 🌵 G. Nonhebel,( 2002) El secado de sólidos en la industria química. Editorial REVERTÉ, S. A. Páginas, 51-79.
- 🌵 Goycoolea, F. y A. Cárdenas, A. (2004). Pectins from *Opuntia* spp.: a short review. *Journal of the Professional Association for Cactus*. **5**: 17-29.
- 🌵 Granados, D., y A. D. Castañeda. (1996). El Nopal. 2ª Reimpresión. Editorial Trillas. México.
- 🌵 Griffith, M.P. (2004). The origins of an important cactus crop, *Opuntia ficus-indica* (Cactácea): new molecular evidence. *Am. Journal Botanic*. **91**: 1915-1921.
- 🌵 Grijspaardt-Vink, C. (1996). Ingredients for healthy foods featured at European Expo. *Food Technology*. **2:30-37**.
- 🌵 Hollingsworth, P. (1996). Food trends: diversity and choice dominate. *Food Technology*. **5:40-43**.
- 🌵 Instituto Nacional de Ecología, (2007). <https://www.gob.mx/inecc>
- 🌵 Kaur N, y Gupta A. (2002). Applications of inulin and oligofructose in health and nutrition. *Journal Bioscience*. **27**: 703-714.
- 🌵 Labra, M., F. Grassi, M. Bardini, S. Imazio, A. Guiggi, S. Citterio, E. Banfi, S. Sgorbat. (2003). Genetic relationships in *Opuntia Mill* genus (Cactácea) detected by molecular market. *Plant Science*. **165**: 1129-1136.



- 
- 🌵 Lahsasni, S., Kouhila, M., Mahrouz, M., Idlimam, A., Jamali; A. (2004). Thin layer convective solar drying and mathematical modeling of prickly pear peel (*Opuntia ficus indica*). *Energy*. **29**:211-224.
  - 🌵 Lee SC, Prosky L. (1995). International survey on dietary fiber definition, analysis and reference materials. *J AOAC Int*. **79**:22-36.
  - 🌵 Majdoub, H., Roudesli, S., Picton, L., Le Cerf, D., Muller, G., Grisel, M. (2001). Prickly pear nopals pectin's from *Opuntia ficus indica* physico-chemical study in dilute and semi-dilute solutions. *Carbohydrate Polymers*, **46**:69–79.
  - 🌵 McGarvie, D., y Parolis, H. (1981). Methylation analysis of the mucilage of the mucilage of *Opuntia ficus indica*. *Carbohydrates Research*, **88**:305-314.
  - 🌵 Medina-Torres, L., Brito-De la Fuente E., Torrestiana-Sanchez, B. Katthain, R. (2000). Rheological properties of the mucilage gum (*Opuntia ficus-indica*). *Food Hydrocolloids*. **14**: 417-424.
  - 🌵 Minolta, C. (1994). "Precise color communication. Color control from feeling to instrumentation". Osaka, Japan. p.18.
  - 🌵 Mondragón-Jacobo, C. (2004). Mejoramiento genético del nopal: avances al 2003 y perspectivas. In: G. Esparza, R. D. Valdez, and S. Méndez (Ed.). El nopal, tópicos de actualidad. Pp. 49-71. Universidad Autónoma de Chapingo, México.
  - 🌵 Wu Z.H., y Mujumdar A.S. (2006). A parametric study of spray drying of a solution in a pulsating high temperature turbulent flow. *Drying Technology*. **24(6)**:751–761.
  - 🌵 Nobel, P. S.(1998). Los incomparables agaves y cactus. Ed. Trillas. México.
  - 🌵 Nollet, L. M. L. (1996). Handbook of Food Analysis. Ed. M. Dekker, Nueva York.
  - 🌵 Ochoa, J. (2003). Principales características de las distintas variedades de tuna (*Opuntia spp.*) de la República Argentina. In: P. Inglese, and A Nefzaoui (Ed.). Cactusnet Newsletter. FAO International Technical Cooperation Network on Cactus pear. Número especial. Roma, Italia.
  - 🌵 Peña-Valdivia, C. B., C., Trejo L, V. B. Arroyo-Peña, A. Sánchez U., R. Balois M. (2012). Diversity of unavailable polysaccharides and dietary fiber in domesticated nopalito and cactus pear fruit (*Opuntia spp.*). *Chemistry Biodiversity*. **9**: 1599-1610.



- 
- 🌵 Periago, M.J., Ros, G., López, G., Martínez, M. C., Rincón, F. (1993). The dietary fiber components and their physiological effects. *Revista Especial de Ciencia y Tecnología Alimentaria*. **33 (3)**: 229-246
- 🌵 Pimienta, E. (1990). El nopal tunero. Serie de Libros Tiempos de Ciencia. Pp 246. Universidad de Guadalajara. Guadalajara México.
- 🌵 Rodríguez-Félix, A. y Cantwell, M. (1988). Developmental changes in composition and quality of prickly pear cactus cladodes (nopalitos). *Plant Foods Human Nutrition*. **38**: 83-93.
- 🌵 Rodríguez -García, M.E., de Lira, C., Hernández-Becerra, E., Cornejo-Villegas, M.A., Palacios-Fonseca, A.J., Rojas-Molina, I., Reynoso, R., Quintero, L.C., Del-Real, A., Zepeda, T.A., Muñoz-Torres, C. (2007). Physicochemical characterization of nopal pads (*Opuntia Ficus indica*) and vacuum nopal powders as a function of the maturation. *Plant Foods Human Nutrition* **62**:107-112.
- 🌵 Rojas-Molina, J.I., Gutiérrez-Cortez, E., Moustapha Bah, E., Rojas-Molina, A., Ibarra-Alvarado, C., Rivera-Muñoz, E., Del Real, A., Aguilera-Barreiro, M de los A. Characterization of Calcium Compounds in *Opuntia ficus indica* as a Source of Calcium for Human Diet Journal of Chemistry, (2015).
- 🌵 Sáenz, C., y Sepúlveda, E. (1993). Alternativas de industrialización de la tuna (*Opuntia ficus indica*). *Alimentos* **18(3)**:29-32.
- 🌵 Sáenz, H.C. (1997). Cladodes: a Source of Dietary Fiber. *Journal of the professional Association for cactus development*. **2**:117-123.
- 🌵 Sáenz, C. (2000). Processing technologies: an alternative for cactus pear (*Opuntia spp.*) fruits and cladodes. *Journal of Arid Environment*. **46**: 209–225.
- 🌵 Sáenz, C, Sepúlveda, E, Matsuhiro, B. (2004). *Opuntia spp.* mucilage's: a functional component with industrial perspectives. *Journal of Arid Environments*. **57**: 275-290.
- 🌵 Sáenz, C. et al. (2006). *Utilización agroindustrial del nopal*. Boletín de Servicios Agrícolas de la FAO 162. Roma: FAO.
- 🌵 SAGARPA, (2011), Producción de nopal 2011, [www.sagarpa.gob.mx/cgcs](http://www.sagarpa.gob.mx/cgcs)



- 
- 🌵 Saravia Tasayco, P. Lo. (2004) “Agrupamientos productivos (clúster) del nopal”. <http://www.contactopyme.gob.mx/estudios>.
- 🌵 SEMARNAT,(1994). [www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/70/usos.html](http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/70/usos.html)
- 🌵 Sepúlveda, E., Sáenz, C., Aliaga, E., Aceituno, C. (2007). Extraction and characterization of mucilage in *Opuntia spp.* *Journal of Arid Environments*. **68**: 534–545.
- 🌵 SIAP. (2015). Cierre de la producción agrícola por cultivo. Recuperado de [http://infosiap.siap.gob.mx/aagricola\\_siap\\_gb/ientidad/index.jsp](http://infosiap.siap.gob.mx/aagricola_siap_gb/ientidad/index.jsp)
- 🌵 Sloan, E. (1994). Top ten trends to watch and work on. *Food Technology*. **7**: 89-100.
- 🌵 Sloan, E. (2000). The Top Ten Functional Food. *Food Technology*. **54** (4):33-62.
- 🌵 Stintzing, F. C. y Carle, R. (2005). Cactus stems (*Opuntia spp.*): A review on their chemistry, technology, and uses. *Molecular Nutrition and Food Research*. **49** (2): 175-94.
- 🌵 Scheinvar, L. (1999). Taxonomía de las Opuntias utilizadas. In: G. Barbera, P. Inglese, and E. Pimienta-Barrios. Agroecología, cultivo y usos del nopal. Estudio FAO Producción y Protección Vegetal. Pp. 21-28. N° 132. FAO, Roma, Italia.
- 🌵 Spiller, G. (1992). Definition of dietary fiber. pp. 15-18. In: Dietary Fiber in Human Nutrition. Ed. by Gene A. Spiller. CRC Handbook. 2nd Ed. Boca Ratón, Florida, Estados Unidos de América.
- 🌵 Suca Apaza, C. A., Suca Apaza, G. R. Deshidratación osmótica de los alimentos. En: Boletín de divulgación tecnológica agroindustrial. Vol. 1. No 1. (2010). Pag. 24
- 🌵 Sudzuki, F., C. Muñoz, y H. Berger. (1993). El cultivo de la tuna (Cactus Pear). Departamento de Reproducción Agrícola. Universidad de Chile. Ñuñoa, Santiago de Chile, Chile.
- 🌵 Sudzuki, F. (1999). Anatomía y morfología. . In: G. Barbera, P. Inglese, and E. Pimienta-Barrios. Agroecología, cultivo y usos del nopal. Estudio FAO Producción y Protección Vegetal. Pp. 29-36. N° 132. FAO, Roma, Italia.
- 🌵 Sugimura Y, Mori T, Nitta I, Kotani E, Furusawa T, Tatsumi M, Kusakari S, Wada Masao, Moritas Yohji, (2009). Calcium Deposition in Idioblasts of Mulberry Leaves, (1999).



- 
- 🌵 Trachtenberg, S. y Mayer, A. M.(1981). Composition and properties of Opuntia ficus-indica mucilage. *Phytochemistry*, **20**: 2665-2668.
  - 🌵 Treybal E. R. (1998). Operaciones de transferencia de masa. 2da. Ed. McGraw-Hill, México p 723.
  - 🌵 Velásquez, E. (1998). El nopal y su historia. Editorial Clio. México.
  - 🌵 Zeki-BerK (2009) Food Process Engineering and Techlology. Centrifugation. New York. Pp. 228-231.