



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTILÁN

ESTABLECIMIENTO DE LAS CONDICIONES DE CENTRIFUGACIÓN PARA LA OBTENCIÓN DE MUCÍLAGO DE NOPAL DESHIDRATADO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERA EN ALIMENTOS

P R E S E N T A:

ERICKA PAREDES MARTÍNEZ

ASESORES: DRA. ELSA GUTIÉRREZ CORTEZ
C. DRA. MARGARITA CONTRERAS PADILLA



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.



**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN
UNIDAD DE ADMINISTRACION ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES**

U. N. A. M.
ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS
SUPERIORES CUAUTITLAN

**DRA. SUEMI RODRIGUEZ ROMO
DIRECTORA DE LA FES CUAUTITLAN
PRESENTE**



**ATN:L.A. ARACELI HERRERA HERNANDEZ
Jefa del Departamento de Exámenes
Profesionales de la FES Cuautitlán.**

Con base en el Art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la Tesis:

Establecimiento de las condiciones de centrifugación para la obtención de
mucílago de nopal deshidratado

Que presenta la pasante Ericca Paredes Martínez

Con número de cuenta: 405065048 para obtener el título de:
Ingeniera 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 HABLARA EL ESPIRITU”
Cuautitlan Izcalli, Mex. a 11 de mayo de 2011

PRESIDENTE I.B.Ó. Norma Beatriz Casas Alencaster

VOCAL Dra. Elsa Gutiérrez Cortez

SECRETARIO Dra. María Andrea Trejo Márquez

1er SUPLENTE M.C. Ma. del Carmen Valderrama Bravo

2º SUPLENTE I.A. María Guadalupe Morales Cabral

El presente trabajo fue financiado por el proyecto PAPIIT: IT231511-3 Nanopartículas en recubrimientos comestibles para la conservación de frutas frescas cortadas, de la Dirección General de Asuntos del Personal Académico de la UNAM.

DEDICATORIAS

Dedico éste trabajo de tesis a mi papá, Erick Juan Fernando con todo mi amor y cariño. Papá sé que siempre estás conmigo apoyándome, como lo hiciste en vida, nunca te olvidare y siempre te recordaré con mucho amor. Recuerdo cuando te prometí titularme y ahora veo cumplida esa promesa. Gracias por haberme dado la vida y por los maravillosos momentos compartidos, recuerdos que vivirán conmigo por siempre. TE AMO.

A mi mamá María Rosa, te dedico con todo mi amor este trabajo de tesis ya que tú has hecho posible el que yo pueda seguir adelante a pesar de los malos momentos vividos, por la fortaleza que has demostrado, por tu valentía, sabes que te admiro y que te estaré eternamente agradecida por todo el apoyo incondicional que me has brindado. Gracias mamá por haberme dado la vida. TE AMO.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por ser mi fortaleza y mi mejor amigo, por haberme brindado la oportunidad de llegar hasta éste momento, uno de los más importantes de mi vida y por darme la dicha de llenar mi álbum dorado con cada logro cumplido. Gracias por la familia tan hermosa que me has dado y por estar siempre conmigo. Gracias por la vida. Te amo.

A mis padres, a quienes amo profundamente, gracias por haberme dado la vida, pero principalmente por el apoyo incondicional en cada momento. Les agradezco de corazón el haberme brindado una carrera para tener un mejor futuro y por creer y confiar en mí. Gracias a mi padre y a mi madre por sus enseñanzas de vida. Los quiero y admiro.

A mis hermanos por acompañarme en ésta aventura llamada vida, gracias por estar conmigo y apoyarme siempre. Los quiero y saben que en los momentos gratos y en los difíciles siempre estaremos juntos.

A mis abuelos mil gracias por su apoyo y cariño, por las enseñanzas y consejos, por compartir con mis hermanos y conmigo sus experiencias y parte de su vida.

A todos mis tíos y tías, les agradezco todo el apoyo brindado a mi familia, los consejos, los momentos alegres y tristes que hemos compartido juntos, a todos y cada uno de ustedes los quiero y admiro. Gracias.

A mis primos y primas por estar siempre conmigo, los quiero.

A Mónica, Mariana y Víctor Hugo por haber compartido conmigo los mejores años de estudio, los buenos y malos momentos durante la carrera, pero sobre todo por su amistad y apoyo.

A mis asesoras la doctora Elsa y la maestra Margarita, por haber dirigido éste gran trabajo, pero sobre todo le agradezco a la doctora Elsa por su confianza y amistad, por estar siempre al pendiente de mi tesis. Gracias por haberme compartido parte de sus conocimientos y de su vida. Le agradezco a Dios el permitirme estar en su camino. Las quiero y admiro profundamente.

A la M. en C. Alicia del Real López, por su paciencia en la toma de micrografías y por su valiosa interpretación.

Un sincero agradecimiento a las profesoras Guadalupe Morales y Frida Cornejo, así como a los compañeros que formaron directa o indirectamente parte de éste trabajo, ya que sin ellos no hubiera sido posible concluirlo satisfactoriamente.

Gracias a cada una de mis sinodales por sus opiniones, observaciones y correcciones, ya que éstas me permitieron mejorar mi proyecto.

Agradezco al Sindicato de Maestros, del cual mi padre orgullosamente formó parte.

A la UNAM, por haberme brindado la oportunidad de estudiar y ser parte de ella; especialmente a la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, por permitirme formarme dentro de sus instalaciones y por todos los conocimientos adquiridos durante mis estudios. Estaré eternamente agradecida y orgullosa de ser universitaria.

“POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU”

José Vasconcelos

RESUMEN

El nopal es una cactácea perteneciente al género *Opuntia*. En la parte interna blanda del nopal se localiza el parénquima, dentro se encuentran cientos de células buliformes que contienen agua, sales de carbonato de calcio y mucílago. El mucílago es un hidrocoloide que tiene muchos usos en la industria alimentaria. El objetivo del presente trabajo fue el de establecer una metodología para obtener mucílago de cladodios de nopal deshidratado (*Opuntia ficus indica*), con estadio de maduración de 100 días, con la más alta eficiencia de separación, mayor rendimiento y calidad. Las pencas de nopal de 400 g fueron recolectadas en un rancho experimental y caracterizadas físicamente por dimensiones; largo, ancho, espesor y peso. Los nopales fueron molidos para preparar una pulpa, a la que se le determinó la humedad con el método de la AOAC, 2000. El valor de la humedad fue del 96%, en consecuencia hay un 4% de sólidos totales. El tamaño de partícula se determinó en un microscopio electrónico de barrido, obtenido por el promedio de las mediciones hechas a la pulpa de nopal fresco y que es de 250 μm . Para obtener la suspensión de nopal deshidratado al 4%, los cladodios de 400 g fueron cortados en piezas con tamaño de 2x2 cm, las cuales se deshidrataron a 50 °C en una estufa de aire forzado, después se molieron en un PULVEX 200 con velocidad de alimentación constante a 10 g/s y criba de 0.8 mm. Las suspensiones fueron centrifugadas manejando diferentes condiciones de operación en una centrifuga de discos. Las variables independientes fueron: velocidades de giro de 3000, 4000 y 5000 rpm, velocidades de alimentación de 200, 400 y 600 mL/min y alturas de tornillo de 0, 2 y 4 mm. Las fracciones solubles obtenidas fueron congeladas, descongeladas, precipitadas con etanol, filtradas y deshidratadas. Para evaluar la influencia de las variables independientes y sus relaciones entre ellas, se planteó y aplicó un factorial 3^3 utilizando el software MINITAB 14®. Las variables de respuesta para evaluar la eficiencia de la separación en la fracción soluble fueron: sólidos totales, densidad, luminosidad, turbidez, tiempo de residencia y volumen recolectado. El rendimiento se determinó con la cantidad de mucílago en mg por gramo de polvo de nopal utilizado. La mejor eficiencia de separación se encontró con las condiciones de operación: velocidad de alimentación 200 mL/min, velocidad de giro 5000 rpm y altura de los tornillos de gravedad 0 mm. El mayor rendimiento fue de 15.05% y correspondió a dichas condiciones. La caracterización morfológica obtenida por microscopía electrónica de barrido y espectrofotometría de absorción atómica mostró la presencia de oxalato de calcio en la suspensión de nopal y en la fracción insoluble, mientras que en la fracción soluble y en mucílago hay presencia de carbonato de calcio. La concentración de calcio fue de 32.32 mg/g en suspensión, 13.08 mg/g en fracción insoluble, 19.23 mg/g en fracción soluble y de 18.76 mg/g en mucílago. Posteriormente se prepararon soluciones a diferentes concentraciones de mucílago obtenido a las mejores condiciones tanto del fresco como del deshidratado, para caracterizar el comportamiento reológico de ambos materiales, lo cual se llevó a cabo en un viscosímetro de cilindros concéntricos marca Rheomat a altas velocidades de cizallamiento. El mucílago de nopal deshidratado presentó siempre los mayores valores de K y menores valores de n, evaluando ambos mucílagos a las mismas concentraciones.

Palabras clave: Centrifugación, Cladodios, mucílago, nopal, pulpa, rendimiento.

ÍNDICE

CONTENIDO	PÁGINA
RESUMEN	iv
ÍNDICE	I
LISTA DE FIGURAS	V
LISTA DE CUADROS	XI
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: GENERALIDADES	4
1.1 Generalidades del Nopal (<i>Opuntia Ficus Indica</i>)	4
1.1.1 Descripción Botánica	6
1.2 Composición Química del nopal	11
1.3 Aplicaciones y usos del nopal	17
1.4 Mucílago de nopal	21
1.4.1 Propiedades del mucílago de nopal	23
1.4.2 Procesos de extracción de mucílago de nopal	25
CAPÍTULO II: METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	33
PROBLEMA, OBJETIVO GENERAL Y OBJETIVOS PARTICULARES	33
2.1 Descripción de las actividades preliminares	36
2.2 Caracterización física de la materia prima	37
2.2.1 Limpieza y desespinado de los cladodios de nopal	38
2.3 Determinación de concentración de humedad en nopal fresco	39
2.4 Determinación de tamaño de partícula por microscopía electrónica de barrido (SEM- AV)	42

2.5 Deshidratado de cladodios de nopal	43
2.6 Molienda de cladodios de nopal deshidratados	46
2.7 Preparación de suspensión con nopal deshidratado	47
Actividades Objetivo Particular 1	48
2.8 Centrifugación de suspensiones de nopal a diferentes condiciones	48
2.9 Rendimiento y eficiencia de separación	55
2.9.1 Eficiencia de separación	56
2.9.2 Luminosidad del clarificado o fracción soluble	57
2.9.3 Densidad del clarificado o fracción soluble	59
2.9.4 Turbidez del clarificado o fracción soluble	60
2.9.5 Sólidos totales del clarificado o fracción soluble	63
2.9.6 Precipitación del mucílago (rendimiento)	66
2.9.7 Tiempo de residencia	68
2.10 Análisis estadístico	69
Actividades Objetivo Particular 2	71
2.11 Determinación de viscosidad aparente del mucílago de nopal	71
Actividades Objetivo Particular 3	78
2.12 Caracterización de la morfología e identificación de sales de calcio de suspensión, fracción soluble, fracción insoluble y mucílago de nopal mediante Microscopía Electrónica de Barrido (SEM-AV)	78
2.13 Cuantificación de la concentración de calcio por Espectrofotometría de Absorción Atómica	81

CAPÍTULO III: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	84
3. ANÁLISIS DE RESULTADOS	84
3.1 Resultados de las actividades preliminares	84
3.2 Caracterización física de la materia prima	84
3.2.1 Limpieza y desespinado de los cladodios de nopal	85
3.3 Determinación de concentración de humedad en pulpa de nopal fresco	85
3.4 Determinación de tamaño de partícula por microscopía electrónica de barrido (SEM-AV)	86
3.5 Deshidratado de cladodios de nopal	86
3.6 Molienda de cladodios de nopal deshidratado	87
3.7 Preparación de suspensión con nopal deshidratado	87
Actividades Objetivo Particular 1	87
3.8 Centrifugación de suspensiones de nopal a diferentes condiciones.....	87
3.9 Rendimiento y eficiencia de separación	88
3.9.1 Eficiencia de separación	88
3.9.2 Luminosidad del clarificado o fracción soluble	90
3.9.3 Densidad del clarificado o fracción soluble	91
3.9.4 Turbidez del clarificado o fracción soluble	92
3.9.5 Sólidos totales del clarificado o fracción soluble	94
3.9.6 Precipitación del mucílago (rendimiento)	95
3.9.7 Tiempo de residencia	97
3.10 Análisis estadístico	98

Actividades Objetivo Particular 2	107
3.11 Determinación de viscosidad aparente del mucílago de nopal	107
Actividades Objetivo Particular 3	114
3.12 Caracterización de la morfología e identificación de sales de calcio de suspensión, fracción soluble, fracción insoluble y mucílago de nopal mediante Microscopía Electrónica de Barrido (SEM-AV)	114
3.13 Cuantificación de la concentración de calcio por Espectrofotometría de Absorción Atómica	120
CONCLUSIONES	122
RECOMENDACIONES	124
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	125
ANEXO I	131
ANEXO II	137

LISTA DE FIGURAS

FIGURA		PÁGINA
1.1	Flores típicas de los cladodios	7
1.2	Cladodios y sus espinas características	8
1.3	Cladodios de diferentes tamaños y su fruta	10
2.1	Cuadro metodológico del desarrollo experimental	34
2.2	Diagrama de bloques de la extracción de mucílago de nopal.....	35
2.3	Rancho los Lores	36
2.4 a)	Corte de cladodios	37
2.4 b)	Recolección de cladodios de 400 g	37
2.5	Desespinado de cladodios de nopal	38
2.6	Troceado de cladodios de nopal limpios y desespinados	39
2.7 a)	Molienda de nopal en licuadora	40
2.7 b)	Molienda con procesador	40
2.8	Charola con muestra de nopal molido	41
2.9	Montaje de la muestra de nopal molido para observar en microscopio	42
2.9 a)	Pegado de la muestra en cinta de carbón electroconductiva	42
2.9 b)	Baño de oro	42
2.9 c)	Portamuestras del microscopio electrónico	42
2.9 d)	Microscopio electrónico de barrido	42
2.10	Troceado de cladodios de nopal	43
2.11	Deshidratado de nopal en estufa de aire forzado	44
2.12	Trozos de cladodios deshidratados	45
2.13 a)	Llenado de la tolva de alimentación en el molino	46
2.13 b)	Molienda de cladodios de nopal deshidratados	46
2.13 c)	Trozos y polvo de nopal	46
2.14 a)	Polvo de nopal	47
2.14 b)	Homogenización del polvo de nopal con agua destilada	47
2.14 c)	Suspensión de nopal	47
2.15 a)	Tanque de alimentación	48
2.15 b)	Tablero de control	48

2.16	Ensamble de las partes de la centrifuga de discos	49
2.17	Cierre del Anillo de seguridad	50
2.18	Válvula de alimentación y tolvas de las fracciones soluble e insoluble	51
2.19	Alimentación a la centrifuga	53
2.20	Salida de la fracción soluble (sólidos solubles)	54
2.21 a)	Fase pesada en tazón	55
2.21 b)	Sólidos recolectados de la fase pesada	55
2.22 a)	Probeta vacía	56
2.22 b)	Volumen de la fracción soluble	56
2.23 a)	Colorímetro Minolta	57
2.23 b)	Sensor	57
2.23 c)	Interfase	57
2.24 a)	Clarificado a bajas velocidades de centrifugación	58
2.24 b)	Clarificado obtenido a velocidades medias de centrifugación.....	58
2.24 c)	Clarificado a altas velocidades de centrifugación	58
2.25 a)	Probetas a peso cte.	59
2.25 b)	Llenado de probetas	59
2.25 c)	Peso de probetas	59
2.26	Turbidímetro marca Hanna Instruments, modelo LP 2000	60
2.27	Disoluciones de fracciones solubles a diferentes condiciones de trabajo	61
2.28 a)	Llenado de la celda de cuarzo con muestra	62
2.28 b)	Introducción de la celda con muestra en el turbidímetro	62
2.29 a)	Botón “read”	62
2.29 b)	Pantalla de turbidímetro con las letras SIP	62
2.30 a)	Pantalla de turbidímetro con lectura de turbidez	63
2.30 b)	Enjuague de la celda de cuarzo	63
2.31	Charolas con muestra de clarificado	64
2.32	Mucílago precipitado por congelación	65

2.33	Precipitación de mucílago con etanol	66
2.34 a)	Vaciado de suspensión	67
2.34 b)	Vaciado de suspensión con mucílago	67
2.34 c)	Mucílago de nopal deshidratado	67
2.35	Filtración del mucílago de nopal	68
2.36	Mucílago de nopal deshidratado	71
2.37	Calentamiento de agua a 35°C	72
2.38	Parrilla con agitación marca CORNING STIRRER modelo PC-353	72
2.39 a)	Preparación de disolución de mucílago de nopal	73
2.39 b)	Agitación de la disolución	73
2.40	Viscosímetro de Cilindros Concéntricos Marca Rheomat modelo METTLER RM180	74
2.41	Pantalla del instrumento de medición	75
2.42	Cilindros y sensores (DIN)	75
2.43 a)	Adaptación del sensor	76
2.43 b)	Llenado del cilindro fijo	76
2.43 c)	Adaptación del cilindro al viscosímetro	76
2.44	Resultados en la pantalla del dispositivo de medición	77
2.45 a)	Microscopio electrónico de barrido	78
2.45 b)	Pantalla de transmisión	78
2.46 a)	Portamuestras de bronce	79
2.46 b)	Baño de oro	79
2.46 c)	Cuatro muestras montadas	79
2.46 d)	Ajustando los portamuestras al soporte	79
2.47 a)	Soporte con muestras de nopal	80
2.47 b)	Muestras dentro del microscopio	80
2.47 c)	Microscopio electrónico	80
2.47 d)	Obteniendo micrografías	80
2.48	Espectrofotómetro de absorción atómica de doble haz (Analyst 300, Perkin Elmer, USA)	82

2.49 a)	Digestor de microondas	83
2.49 b)	Carrusel con vasos	83
3.1	Volumen de Clarificado obtenido a diferentes condiciones de proceso	89
3.2	Luminosidad (L) de clarificado obtenido a diferentes condiciones de proceso	90
3.3	Densidad (g/cm^3) de clarificados obtenidos a diferentes condiciones de proceso	91
3.4	Turbidez (NTU) de clarificados obtenidos a diferentes condiciones de proceso	93
3.5	Sólidos Totales (g) de clarificados obtenidos a diferentes condiciones de proceso	94
3.6	Rendimiento en mucílago (mg/g) de clarificados obtenidos a diferentes condiciones de proceso	96
3.7	Tiempo de residencia (min) de clarificados obtenidos a diferentes condiciones de proceso	97
3.8	Diagrama de efectos principales sobre la variable de respuesta volumen de clarificado	99
3.9	Diagrama de efectos principales sobre la variable de respuesta luminosidad (L)	100
3.10	Diagrama de efectos principales sobre la variable de respuesta densidad	101
3.11	Diagrama de efectos principales sobre la variable de respuesta turbidez	102
3.12	Diagrama de efectos principales sobre la variable de respuesta sólidos totales	103
3.13	Diagrama de efectos principales sobre la variable de respuesta rendimiento	104
3.14	Diagrama de efectos principales sobre la variable de respuesta tiempo de residencia	105

3.15	Velocidad de Cizalla vs Esfuerzo de Cizalla de mucílago de nopal deshidratado y fresco	108
3.16	Velocidad de Cizalla vs Viscosidad Aparente de mucílago de nopal deshidratado y fresco	109
3.17	Disoluciones de mucílago de nopal deshidratado a diferentes concentraciones a) 1%, b) 1.5%, c) 2% y d) 2.5%	112
3.18	Disoluciones de mucílago de nopal fresco a diferentes concentraciones a) 1%, b) 1.5%, c) 2% y d) 2.5%	113
3.19	Micrografías de la suspensión de nopal deshidratado	115
3.19 a)	Micrografía a 1000 aumentos evidenciando oxalatos	115
3.19 b)	Micrografía a 3500 aumentos evidenciando la presencia de carbonatos de calcio	115
3.19 c)	Micrografía de suspensión de nopal deshidratado a 500 aumentos con presencia de idioblastos	115
3.20	Micrografías correspondientes a la fracción insoluble de nopal.....	117
3.20 a)	Micrografía de fracción insoluble a 1000 aumentos	117
3.20 b)	Micrografía de fracción insoluble a 500 aumentos	117
3.21	Micrografías correspondientes a la fracción soluble de nopal.....	118
3.21 a)	Micrografía de fracción soluble a 15000 aumentos	118
3.21 b)	Micrografía de fracción soluble a 15000 aumentos con cristal de calcio	118
3.21 c)	Micrografía de fracción soluble a 3500 aumentos con presencia de acumulaciones de calcio	118
3.22	Micrografías correspondientes a mucílago de nopal deshidratado	119
3.22 a)	Micrografía de mucílago a 3000 aumentos evidenciando carbonato de calcio e idioblastos	119
3.22 b)	Micrografía de mucílago a 1000 aumentos	119

LISTA DE CUADROS

CUADRO		PÁGINA
1.1	Taxonomía de nopal	5
1.2	Composición química promedio de cladodios <i>Opuntia</i>	12
1.3	Composición química del nopal	13
1.4	L-aminoácidos libres en cladodios de <i>Opuntia ficus-indica</i>	15
1.5	Algunos productos y subproductos a base de frutas de tuna y cladodios	19
1.6	Metodologías para la extracción de mucílago de nopal	26
2.1	Variables independientes y sus niveles de variación trabajados	52
2.2	Variables dependientes para evaluar rendimiento y eficiencia	53
2.3	Variables y niveles para la centrifugación	70
3.1	Pesos de nopales recolectados de 100 días de maduración.....	84
3.2	Dimensiones de los cladodios de nopal	84
3.3	Contenido de sólidos totales de cladodios de nopal frescos.....	85
3.4	Tiempo de secado de cladodios de nopal frescos	86
3.5	Diseño factorial	99
3.6	Índice de consistencia e índice de comportamiento al flujo para mucílago de nopal deshidratado y fresco a diferentes concentraciones	111
3.7	Contenido de calcio en las diferentes fases obtenidas	120

INTRODUCCIÓN

El nopal es una cactácea perteneciente al género *Opuntia*. Los cladodios se utilizan principalmente para la producción de tuna, en algunos países se utiliza como un vegetal para el consumo humano y también como forraje para alimento de animales durante la sequía (Magloire *et al.*, 2006).

El nopal (*Opuntia ficus-indica*) es una cactácea endémica de América desarrollada en tierras áridas y semiáridas. En México, centro de origen, hay 104 especies de *Opuntia* y 10 de *Nopalea*. Veinticuatro especies tienen diversos usos: 15 son consumidos como materia prima, 6 por su fruto, y 3 como una hortaliza. Estos últimos son: *Opuntia robusta*, *Nopalea cochellinifera* y *O. ficus-indica* (Medina-Torres *et al.*, 2007).

Este vegetal, como casi todos los nopales en México, tiene una gran diversidad de usos, muchos de los cuales están ligados a las altas concentraciones de mucílago, hasta 24% presente en sus cladodios (Ginestra *et al.*, 2009).

Al aumentar el estadio de madurez de los cladodios de nopal, la concentración de mucílago disminuye y aumenta la concentración de calcio presente (Rodríguez-García *et al.*, 2007). 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 y nutracéuticas en la industria alimentaria (Saenz *et al.*, 2004).

El mucílago es un polímero compuesto por polisacáridos heterogéneos semejantes a las pectinas, formados por diferentes azúcares y por ácidos urónicos (Ginestra *et al.*, 2009). Por sus características y composición puede formar disoluciones coloidales viscosas o geles en agua, es decir, sugieren un potencial considerable como materia prima para diferentes usos funcionales en la industria de los alimentos (Saenz, 2000).

En general, los carbohidratos de los nopales son monosacáridos, disacáridos y polisacáridos, y de manera particular contienen polisacáridos como el mucílago y gomas que presentan características fisicoquímicas únicas. Se han identificado los azúcares constituyentes de mucílago de *Opuntia ficus-índica*, encontrándose que es una arabano-galacturona, con residuos de ramnosa, xilosa, arabinosa, galactosa y ác. galacturónico. Hasta el momento sólo se especula sobre el papel que este componente tiene en la fisiología de las cactáceas, pero se ha propuesto que permite a las células mayor retención de agua y consecuentemente mayor resistencia de la planta a la sequía y a las altas temperaturas (Guzmán *et al.*, 2007).

El mucílago es un complejo muy grande y se ha podido contar hasta 30,000 subunidades de monosacáridos; debido a la presencia de ác. galacturónico las moléculas de mucílago presentan fuerte carga negativa, razón por la cual intercambia iones Ca^{++} y se sabe que hasta 2% del calcio insoluble pudiera estar asociado con el mucílago del cladodio. El mucílago se produce en células especiales entre la membrana y la pared celular y ocupan cerca del 3% del volumen del cladodio. El mucílago ó “baba” de nopal es de amplio uso en productos alimenticios como en cremas, mayonesa y yogurt, porque modifica sus propiedades funcionales como la viscosidad, elasticidad, retención de agua, poder gelificante y espesante. Se emplea en productos como cosméticos, geles, cremas, shampoo, enjuagues, mascarillas y pomadas, así como en pinturas. El polisacárido es utilizado en forma de un polvo seco en la formulación de todos estos productos y se obtiene de la precipitación del jugo de nopal usando acetona u otros disolventes (Saenz *et al.*, 2004).

El nopal es un material muy barato y fácil de adquirir. Sin embargo, las metodologías para la extracción del mucílago son complejas, costosas y no amigables con el medio ambiente. La mayoría se realizan por extracción química, lo cual genera cambios en sus propiedades fisicoquímicas.

Algunas propuestas han sido por extracción con métodos mecánicos, pero esto requiere contar con equipos de alto costo (Medina-Torres *et al.*, 2000).

Se busca impulsar el consumo de nopal en forma de polvo debido a su alta concentración de calcio, así como también de mucílago, ya que ambos productos pueden ser una fuente alternativa que puede servir como coadyuvante de salud para el problema de osteopenia. En lo que respecta al ámbito económico, se tiene como objetivo promover la explotación comercial y el consumo de éste, ya que actualmente el desperdicio de nopal tipo verdura que va de los 30 a 200g corresponde a un 60%, mientras que el de penca madura que es de 400 a 600g, no se emplea para el consumo humano, pese a su alta concentración de minerales (Contreras-Padilla *et al.*, 2010).

En este trabajo se propone la obtención de mucílago de nopal deshidratado con el mayor rendimiento por medio de métodos mecánicos los cuales no perjudican al medio ambiente. El propósito es utilizar cladodios de nopal con un estadio de maduración de cien días (400 g), debido a que éstos no se utilizan para el consumo humano, además de que son considerados como residuo agrícola con poco o nulo aprovechamiento dándole un uso como forraje y por dicha razón son desperdiciados, lo que representa una pérdida económica para los agricultores.

El deshidratado de los mismos es importante ya que se reduce el espacio de almacenamiento, facilita su transportación y manejo, además de que incrementa su vida útil. Una nueva metodología de extracción se propuso utilizando diferentes condiciones de operación en una centrifuga de discos. Posteriormente, la suspensión y las fracciones obtenidas, fracción pesada, fracción ligera y mucílago fueron caracterizadas para conocer su morfología y adicionalmente se determina la concentración de calcio presente en cada parte obtenida. Finalmente, se realizaron determinaciones para conocer la viscosidad y las propiedades reológicas del mucílago obtenido de nopal deshidratado y se compararon con las del mucílago obtenido de pulpa fresca.

CAPÍTULO I

1.1 Generalidades del Nopal (*Opuntia ficus indica*)

En América, el nopal ha desempeñado desde tiempos muy remotos un papel muy importante en el desarrollo de las culturas del centro de México y de los grupos chichimecas en el centro y en el norte de México. Algunos términos prehispánicos que se utilizaron en relación con el nopal son: *Nochtli* para el fruto o *Nopalli*, para distinguir los tallos achatados (Granados, 2003).

El nopal es originario del continente americano; se le encuentra distribuido desde el Canadá hasta la Argentina y preferentemente en todas las zonas áridas y semiáridas. Dadas las características morfológicas y fisiológicas que presenta esta planta, le permite soportar condiciones ambientales desde escasa precipitación, hasta altas y bajas temperaturas (Guzmán *et al.*, 2007). México es el principal productor de nopal con un 90% de la producción mundial. Los principales estados productores son San Luis Potosí, Zacatecas, Aguascalientes, Distrito Federal, Puebla, Jalisco, Michoacán y Oaxaca. Esta producción se divide básicamente en 3 clasificaciones, dependiendo del tamaño de éstos, los cuales son el nopal tipo verdura (676,180.66 Ton.), el tipo tunero (378,697.94 Ton.) y el forrajero (130,035.04 Ton.). Los dos primeros son los que se utilizan como alimento, éstos son los que forman parte de la dieta diaria de tal manera que el consumo per cápita de éste es de 8.5 kg por año. En lo que respecta al nopal forrajero, éste comúnmente se utiliza como alimento para ganado, debido a que por su tamaño es el que se queda en las pencas, esto representa un importante desperdicio postcosecha (SAGARPA, 2008).

Debido a su notable variabilidad genética, las plantas de *Opuntia* muestran una adaptabilidad ecológica y por lo tanto se pueden encontrar en los lugares de prácticamente todas las condiciones climáticas: Norte, Centro y Sudamérica, el Mediterráneo, Norte, Centro y Sur de África, Oriente Medio, Australia, y también en la India. El cultivo comercial se lleva a cabo en Italia, España, México, Brasil, Chile, Argentina y California (Stintzing y Carle, 2005).

El género *Opuntia* pertenece a la familia *Cactaceae* y es también conocido como planta de nopal o nopal. Debido a su uso eficiente del agua, esta cosecha es abundante, distribuidos en las zonas áridas y semi-áridas de muchos países. Los principales países donde se cultiva son: México, Argentina, Perú, Bolivia, Brasil, el Reino Unido, Estados Unidos (Texas), España, Italia, África (Marruecos, Túnez, Eritrea, Etiopía), Israel y Sudáfrica (Sáenz *et al.*, 2004).

El nopal es endémico de América y existen aproximadamente 258 especies reconocidas, 100 de las cuáles se encuentran en México, quien cuenta con una superficie aproximada de 10,000 hectáreas de plantaciones especializadas en nopal para consumo humano (Rodríguez *et al.*, 2009).

En México se le llama nopal a varias especies del género "*Opuntia*" de la familia "*Cactaceae*" y se presentan 2 géneros más comunes los cuales son *Opuntia* y *Nopalea*.

En el cuadro 1.1 se presenta la taxonomía del nopal verdura más comúnmente aceptada.

Cuadro 1.1 Taxonomía del nopal

Reino	<i>Plantae</i>
Subreino	<i>Tracheobionta</i>
División	<i>Magnoliophyta</i>
Clase	<i>Magnolipsida</i>
Subclase	<i>Caryophyllidae</i>
Orden	<i>Caryophyllales</i>
Familia	<i>Cactaceae</i>
Géneros	<i>Opuntia</i>
Especie	<i>Opuntia Ficus Indica</i>

Fuente: (Loubet, 2008)

El género *Opuntia* en México presenta 5 subgéneros, 17 series y 104 especies. El género *Nopalea* presenta 10 especies de las cuáles la “*Nopalea Cochenillifera*” se utiliza como Nopal Verdura. En resumen de las 104 especies de *Opuntia* y 10 de *Nopalea* se utilizan para forraje 15 especies, 5 para fruta y 3 para verdura (2 de *Opuntia* y una de *Nopalea*) (Ríos, 2004).

La planta se utiliza principalmente para la producción de fruta, aunque en algunos países se utiliza como un vegetal para el consumo humano y también como forraje. La temporada alta de la cosecha de los frutos de *Opuntia cactus* es de abril a agosto, en África y América, y de noviembre a diciembre en las regiones mediterráneas (Magloire *et al.*, 2006).

El peso y la longitud de hortalizas cosechadas para consumo humano varían dependiendo de la especie. Sin embargo, en general, el rango es de 40-100 g y 11-20 cm de longitud. Debido a la modificación de la acidez diurna de cladodios, la cosecha de un par de horas después del sol proporciona los mejores cladodios para el uso de verduras, que son turgentes, ricos en azúcares, pro-vitamina A y vitamina C, pero pobres en nitrógeno (Magloire *et al.*, 2006).

1.1.1 Descripción Botánica

Desde un punto de vista morfológico, la planta de nopal se puede dividir en la raíz, la parte vegetativa, la fruta y la flor (Magloire *et al.*, 2006). Los cladodios o mejor conocidos como pencas, son tallos de cutícula gruesa y cerosa, en forma de paletas, compuestas por el parénquima el cual está constituido por células vivas, este es el tejido interno de los cladodios, los cuales son la forma convencional del consumo de nopal (Ginestra *et al.*, 2009). Éstos son suculentos y tienen órganos con una forma ovoide o alargada de 18-25 cm de longitud. En el cladodio exterior, el clorénquima, es fundamental para su acción fotosintética, la parte interior se compone de un parénquima medular blanco, principalmente para el almacenamiento de agua (Magloire *et al.*, 2006).

La flor se localiza en la parte superior de las pencas. Sus pétalos poseen colores vivos como amarillo, anaranjado, rojo, rosa, salmón, etc., según la especie de nopal. Por lo general, las flores son grandes (Rodríguez *et al.*, 2009).



Figura 1.1 Flores típicas de los cladodios

La figura 1.1 muestra las flores típicas de los cladodios de nopal, existen de colores muy diversos. Muchas variedades no producen flor.

Las plantas de tuna son conocidas por sus tallos aplanados, la comestibilidad de sus frutas de sabor agradable, las areolas por tener púas o espinas fácilmente separables, hojas rudimentarias, y las semillas con una cubierta pálida. Las plantas de cactus muestran un sistema radicular amplio y poco profundo dispuesta a absorber el agua de la niebla o incluso una ligera lluvia. Esto permite que las plantas tomen agua y la almacenen como esponja en el parénquima. Se ha demostrado que la capacidad de Cactaceae para retener el agua, incluso bajo condiciones climáticas desfavorables se debe a la producción alta de mucílago tanto en cladodios como en frutos (Magloire *et al.*, 2006).

El nopal, al igual que casi todas las cactáceas, es una planta que no tiene hojas, aún cuando en su etapa de juventud contiene algunas. Las pencas están llenas de agua que se encuentra retenida en un entramado de carbohidratos llamados mucílagos; si se corta a la mitad una penca no escurre agua sino una sustancia pegajosa y viscosa conocida como baba del nopal (Ríos, 2004).

En el centro de los cladodios se encuentra una red bilateral de tejido celulósico que con el transcurso del tiempo se endurece, dándole a éstos una constitución rígida; la forma y el grosor de los cladodios es variable, así como su color, el mismo que varía del verde claro hasta el gris o ceniza, según la edad de la planta, el lugar donde se produce y la época del año (Guzmán y Chávez, 2007).

Otra característica de esta planta es que tiene espinas en sus pencas como muestra la figura 1.2, el tipo y la cantidad de espinas en los nopales es muy variable y mucho va a depender de las condiciones del medio en que viva y de la edad. Los nopales, tienen unas estructuras a partir de las cuales desarrollan más pencas, raíces o flores llamadas areolas, características de las cactáceas. Los frutos de esta planta son conocidos como tunas (Ríos, 2004).

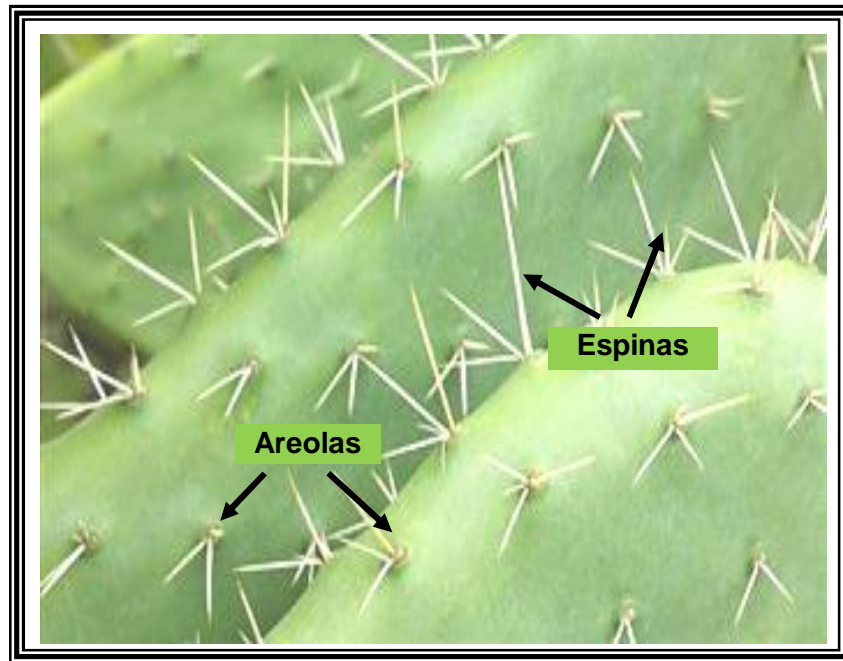


Figura 1.2 Cladodios y sus espinas características

La figura 1.2 muestra a las areolas, las cuales presentan espinas en su cavidad. Las espinas generalmente son de dos tipos: algunas pequeñas, agrupadas en gran número (gloquidios) y las grandes que son, según algunos botánicos, hojas modificadas (FAO, 2006).

Los tallos se componen de un blanco tejido llamado parénquima medular (tejido básico) y la clorofila que contiene el parénquima fotosintéticamente activo (tejido cortical). Este último está cubierto de espinas (hojas modificadas) y de pelos o tricomas pluricelulares, así como la formación de la llamada areola, que es característico de los miembros de la familia cactaceae. Las areolas son también el origen de las flores, es decir, brotes de pequeño tamaño con hojas especializadas. El gloquidio (pelos barbados y delgados, generalmente invisibles) se compone 100% de celulosa cristalina. Las espinas se constituyen por 96% de polisacáridos, que a su vez se divide en 49.7% de celulosa y 50.3% arabinanos, el resto de cenizas, grasas y ceras, así como de lignina. Las espinas son de 1-3 cm de largo y constituyen el 8.4% del peso total de los cladodios. Sus funciones incluyen la protección mecánica de los herbívoros, la reflexión de la luz, reducir la pérdida de agua, así como de condensación (Stintzing y Carle, 2005).

Los cladodios son órganos suculentos, cuya epidermis consta de una capa de células epidérmicas y de 6 a 7 capas de células hipodermales, de pared celular muy gruesa. La epidermis tiene tres funciones: 1) regular el movimiento del bióxido de carbono hacia el interior y del oxígeno hacia el exterior del cladodio, 2) retener el agua dentro del cladodio y 3) proteger al cladodio del ataque de hongos, bacterias, insectos y otras plagas, y de la insolación intensa (Corrales, 2002).

La parte más externa de la epidermis, la cutícula, esta formada por una mezcla de ácidos grasos que se polimerizan espontáneamente en presencia de oxígeno y que repele el agua. La cutícula del nopal, en comparación con la de la mayoría de las plantas, es relativamente gruesa (8-20 μm en *O. ficus-indica*) (Corrales, 2002).

Opuntia ficus indica, casi no tiene espinas. Es un vegetal arborescente de 3 a 5 metros de alto, su tronco es leñoso y mide entre 20 y 50 cm. de diámetro. Forma artículos oblongos (pencas o cladodios) de 30 a 60 cm. de largo x 20 a 40 cm. de ancho y de 2 a 3 cm. de espesor. Sus ramas están formadas por pencas de color verde opaco con areolas que contienen espinas más o menos numerosas, amarillas y produce flores de 7 a 10 cm de largo (Ríos, 2004).

En general, la naturaleza química y la estructura de las capas de cutina están diseñadas para minimizar la transpiración, además, su color blanco refleja gran parte de la radiación solar, lo que ayuda a mantener baja la temperatura del cladodio (Corrales, 2002).

En la figura 1.3 se presenta una planta de nopales con sus típicos frutos y diferentes tamaños de cladodios.



Figura 1.3 Cladodios de diferentes tamaños y su fruta

Como se aprecia en la figura 1.3, los cladodios pueden ser de diferentes edades y distintas tonalidades en verde. También se aprecian las tunas que son los frutos del nopal.

El nopal *Opuntia ficus indica* se cultiva en una altura de los 800 a 2,400 metros sobre el nivel del mar (msnm), aun cuando se encuentra hasta los 3000 msnm. El tipo de suelo en el que se desarrolla es el volcánico y calcáreo de textura franca, con un pH de 6.5 a 8.5 (Balderas, 2009). Los nopales de buena calidad son delgados, de apariencia fresca, turgentes y tienen un color verde brillante. Después de ser cuidadosamente desespinaados se pueden consumir como hortalizas, tanto en estado fresco como cocidos (Corrales, 2002).

1.2 Composición Química del nopal

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, seguido de pequeñas cantidades de hidratos de carbono (3-7%), fibra (1-2%) y proteína (0.5-1%) (Ginestra *et al.*, 2009).

La cantidad de minerales que se localizan formando parte de los órganos y tejidos del nopal son el calcio, potasio, así como magnesio, sílice, sodio. Estos también varían en función de la edad. También pueden presentar cloruros, sulfatos y pequeñas cantidades de fosfatos (Loubet, 2008). Generalmente los cladodios son ricos en pectina, mucílago y minerales, mientras que las frutas son buenas fuentes de vitaminas, aminoácidos, azúcares y betalaínas (Magloire *et al.*, 2006).

Las cactáceas, al igual que todas las plantas superiores, presentan un complicado proceso metabólico que da origen a la formación de muy diversos compuestos orgánicos. Para iniciar este proceso se requiere de agua, bióxido de carbono, oxígeno y otras sustancias minerales (Sánchez, 1978).

Se ha reportado que en 100 g de materia seca hay 19.6 g de cenizas, 7.2 g de lípidos y ceras, 3.6 g de lignina, 21.6 g de celulosa, 48 g de polisacáridos. Otros autores informan 64-71 g de carbohidratos, 18 g de fibras, 19-23.5g de cenizas, 1-4 g de lípidos y 4-10 g de proteínas, de este último compuesto 1-2 g son de proteínas digeribles. En base a peso fresco, estos valores se traducen en 3.7 g de carbohidratos, 1.2 g de minerales, de 0.5-1 g de proteínas, 0.2 g de lípidos y 1 g de fibra por 100 de material vegetal (Stintzing y Carle, 2005). Probablemente las diferencias en composición entre autores varían de acuerdo a la variedad o al estado de madurez de los cladodios de nopal, ya que éste es un dato que no se reporta en la literatura en donde se realizaron los estudios.

En el cuadro 1.2 se muestra la composición química promedio de cladodios de nopal *Opuntia sp.* La composición química del nopal, y en general de las cactáceas, varía en las distintas especies y también dentro de una misma especie; así se reporta un contenido de cenizas en base húmeda para *Opuntia ficus-indica* de 2.1%; se encontraron valores de 0.22% de calcio, hierro 0.027%, indicios de cobalto, cobre, fósforo, magnesio y sílice; proteínas de 1.07% en base húmeda. Los carbohidratos que se encuentran en este tipo de nopal son monosacáridos, disacáridos y polisacáridos (Guzmán *et al.*, 2007).

Cuadro 1.2 Composición química promedio de cladodios *Opuntia*

Componente	Base en materia seca (g/100g)	Base en materia fresca (g/100g)
Agua	4-6	88-95
Carbohidratos	64-71	3-7
Cenizas	19-23	1-2
Fibras	18	1-2
Proteínas	4-10	0.5-1
Lípidos	1-4	0.2

Fuente: (Stintzing y Carle, 2005)

En el cuadro 1.2 se reporta el promedio de los valores de la composición química de los cladodios. Dicha composición cambia con la edad. En cladodios más jóvenes muestran una mayor cantidad de hidratos de carbono, proteínas y contenido de agua. El contenido de agua de 88-95% hace a los cladodios un alimento bajo en calorías, con 27 Kcal/100g (Stintzing y Carle, 2005).

Los nopalitos también contienen cantidades considerables de vitamina C (10-15 mg por 100 g⁻¹) y del precursor de la Vitamina A, el β -caroteno (30 μ g por 100 g⁻¹ de carotenoides). La acidez de los nopales varía considerablemente (0.1-0.6% de acidez titulable) (Corrales, 2002).

Los cladodios de *ficus-indica* también representan una fuente de fitoquímicos, tales como compuestos fenólicos, flavonoides y minerales.

Ginestra *et al.* (2009) mencionan que los cladodios de *O. ficus-indica* contienen cantidades significativas de cristales de oxalato de calcio y estos están presentes en todos los tejidos. El calcio tiene un papel importante en la retención de agua de los tejidos suculentos para regular la presión osmótica en las células. Se ha demostrado que el tamaño de cristal de oxalato, aumenta en función de la maduración y que la existencia de los oxalatos de calcio puede limitar la biodisponibilidad de calcio. Sin embargo, Contreras-Padilla *et al.* (2010) en estudios realizados en nopales con diferentes estadios de maduración comprueba que la relación oxalatos y otras sales de calcio no comprometen la biodisponibilidad del mismo.

En general, se resume el contenido de distintos componentes del nopal en el cuadro 1.3

Cuadro 1.3 Composición química del nopal

Componente	Contenido %
Porción comestible	78.00
Energía (Kcal)	27.00
Proteína (g)	1.70
Grasas (g)	0.30
Carbohidratos (g)	5.30
Calcio (mg)	93.00
Potasio (mg)	166.00
Hierro (mg)	1.60
Tiamina (mg)	0.03
Riboflavina (mg)	0.06
Niacina (mg)	0.03
Ácido ascórbico (mg)	8.00
Retinol (mcg Eq.)	41.00

Fuente: (Vega, 2007)

La composición química mostrada en el cuadro 1.3 es variable en función de la variedad, estado de madurez y la tierra donde se cultivó el nopal.

Minerales


El potasio es el principal mineral que asciende a alrededor del 60% del contenido total de cenizas (166 mg/100 g de peso fresco), seguido por el calcio (93 mg/100 g de peso fresco), sodio (2 mg/100 g de peso fresco) y hierro (1.6 mg/100 g de peso fresco). En estudios más recientes, se informó que la composición mineral es de 50, 18-57 y 11-17 mg/100g de peso seco de potasio, calcio y magnesio, respectivamente, seguido de manganeso (62-103 µg /g), hierro (59-66 µg /g), zinc (22-27 µg / g), y cobre (8-9 µg/g), en función del peso seco (Stintzing y Carle, 2005).

Compuestos de alto peso molecular

Stintzing y Carle (2005) reportaron que los valores medios de la materia seca de cinco cladodios de *Opuntia sp* asciende a 11% de celulosa, 8% hemicelulosa, y 3.9% de lignina, respectivamente. El contenido de almidón también considerado glucano de cladodios de *Opuntia ficus-indica* fluctuaba con las estaciones y alcanza valores promedio de 85-171 mg/g de peso seco, aunque no se menciona la edad de nopales.

Ácidos orgánicos

El contenido de ácido malónico y el contenido de ácido cítrico son de 36 mg y 178 mg/100g de peso fresco, respectivamente. En cambio, los cladodios más viejos de *Opuntia Ficus-Indica* no contienen ácido malónico y se redujeron en ácido cítrico a un valor de (31 mg/100g de peso fresco). Ácido tartárico y ácido succínico sólo se encontraron en trazas. El ácido principal, sin embargo, es el ácido oxálico, que se produce ya sea disuelto (0.61 mg/g de peso seco) o en forma cristalina (34.5 mg / g de peso seco) (Stintzing y Carle, 2005).

 Aminoácidos y aminos

Algunos investigadores determinaron el patrón de aminoácidos de *Opuntia ficus-indica* el cual comprende 18 compuestos (Stintzing y Carle, 2005); los cuales son mostrados en la tabla 1.4, cuyos valores se reportan en base al peso fresco de los cladodios. El contenido de proteína cruda llega a un valor de 11.0 g/100g en peso fresco o 0.5 g/100g sobre una base de peso seco, respectivamente. En función del mes de la cosecha se reportan de 77-112 mg/g de peso seco (Stintzing y Carle, 2005).

Cuadro 1.4 L-aminoácidos libres en cladodios de *Opuntia ficus-indica*

Aminoácidos	Base en peso fresco (mg/100g)
Alanina	0.6
Arginina	2.4
Asparagina	1.5
Ácido asparagínico	2.1
Ácido glutámico	2.6
Glutamina	17.3
Glicina	0.5
Histidina	2.0
Isoleucina	1.9
Leucina	1.3
Lisina	2.5
Metionina	1.4
Fenilalanina	1.7
Serina	3.2
Treonina	2.0
Tirosina	0.7
Triptófano	0.5
Valina	3.7

Fuente: (Stintzing y Carle, 2005)

El cuadro 1.4 se resumen los L-aminoácidos libres presentes en cladodios de la variedad *Opuntia ficus-indica*. Nótese que la mayor concentración es de glutamina y la menor concentración de alanina.

Compuestos fenólicos

El contenido de fenoles totales en cladodios mexicanos, representan 8-9 mg /100 g de peso fresco (Stintzing y Carle, 2005).

Azúcares

El contenido de azúcar llega a 0.32 g / 100 g de peso fresco. En otro estudio de la fracción de azúcares reductores se informó de 0.64-0.88 g / 100 g de peso seco, aumentando con el desarrollo, pero también variable según las especies (Stintzing y Carle, 2005). Los principales carbohidratos son los monosacáridos, los disacáridos y los polisacáridos (Sánchez, 1978).

Vitaminas y clorofilas

El total de Vitamina C (ácido ascórbico y deshidroascórbico) en 100 g de peso fresco ascendió hasta 22 mg, β -caroteno en 11.3-53.5 μ g, tiamina en 0.14 mg, riboflavina en 0.6 mg, y niacina en 0.46 mg, respectivamente. La clorofila total en los cladodios fue reportada en 12.5 mg/100g de peso fresco de los cuales clorofila a con 9.5 mg y contenido de clorofila b en 3.0 mg (Stintzing y Carle, 2005).

Fibras insoluble y soluble

La fibra dietética está constituida por diferentes componentes resistentes a las enzimas digestivas, entre ellos la celulosa, la hemicelulosa y la lignina. Según su solubilidad en agua, la fibra se clasifica en soluble e insoluble; la primera la conforman los mucílagos, las gomas, las pectinas y las hemicelulosas; la insoluble es principalmente celulosa, lignina y una gran fracción de hemicelulosa.

Rodríguez-García *et al.* (2007) encontraron que al aumentar el estadio de maduración de los cladodios, se incrementa la cantidad de fibra insoluble y disminuye la de fibra soluble. En lo que respecta a la cantidad de calcio, este aumenta en cladodios con etapa de maduración avanzada.

1.3 Aplicaciones y usos del nopal

Tradicionalmente y en la actualidad, las plantas cactáceas son una fuente de frutos y vegetales, para obtener productos medicinales, bálsamos y cosméticos, así como forraje, material para construcción, como fuente de colorantes naturales y como aditivo en el uso de alimentos (Stintzing y Carle, 2005).

Numerosos científicos han reportado que es un material auxiliar como diurético (Galati *et al.*, 2002). Otros reportan con propiedades anti inflamatorias, analgésico, antiulceroso, hipoglucémicas e hipercolesterómico (Stintzing y Carle, 2005; Magloire, 2006). Para el control del colesterol y prevención de algunas enfermedades como diabetes y obesidad (Valdez *et al.*, 2008).

Actualmente una forma práctica de usar el nopal es mediante la preparación de licuados de las pencas tiernas (Balderas, 2009). Se han demostrado en varios estudios, principalmente realizados en México, las propiedades medicinales que tiene el nopal: reducir niveles de colesterol en la sangre, regulación de la presión arterial, control de la acidez gástrica, y tratamiento de varias patologías tales como úlcera, fatiga, disnea, glaucoma, fragilidad capilar, dolor reumático, y heridas. Algunos nuevos usos tienen mayor base científica: gastritis, hiperglucemia, arteriosclerosis y diabetes (Loubet, 2008).

Los cladodios con su alto contenido en fibra son actualmente una fuente importante de la misma, la que se obtiene por secado y molienda de los mismos. Este polvo o harina se destina tanto para la industria de alimentos como para la industria de complementos alimenticios. Recientemente Cornejo-Villegas *et al.* (2010), fortificaron harinas de maíz nixtamalizado con diferentes concentraciones de nopal para aumentar su contenido de calcio y fibra.

También existen compuestos de nopal ligados a la industria farmacéutica, las tabletas y cápsulas de nopal se encuentran en el mercado mexicano desde hace años y se ofrecen como un modo de controlar la obesidad y la diabetes.

La fibra soluble se asocia con la reducción de los niveles de glucosa y colesterol, así como con la estabilización del vaciamiento gástrico; mientras que la fibra insoluble se relaciona con la capacidad de retención de agua (aumento del peso de las heces), el intercambio iónico, la absorción de ácidos biliares, los minerales, las vitaminas e interacciona con la flora microbiana. Los cladodios son una fuente importante de fibra, de calcio y de mucílagos; los tres son componentes necesarios para integrar una dieta saludable (Valdez *et al.*, 2008).

La fibra es capaz de disminuir la absorción gastrointestinal de varios nutrientes; y en consecuencia los niveles sanguíneos de colesterol, triglicéridos y glucosa disminuyen por falta de absorción (Basurto *et al.*, 2006).

La gran cantidad de nutrientes potencialmente activos y sus propiedades multifuncionales hacen del nopal (*Opuntia spp.*) tanto las frutas como los cladodios, candidatos perfectos para la producción de complementos alimenticios para mejorar la salud (Magloire *et al.*, 2006).

El nopal (*Opuntia spp.*) es una especie vegetal de importancia en el contexto internacional. En varios países del mundo los productos obtenidos de su cultivo e industrialización, tales como fruta fresca, verdura, forraje, mermeladas, jugos y pulpa, vino, dulces, vinagre, aceites y el colorante acetocarmín son altamente apreciados, por lo que se ha aumentado significativamente la demanda de estos productos (Calderón-Paniagua, 2001).

Los cladodios, por su parte tienen interés desde el punto de vista industrial ya que cuando los brotes son tiernos (10-15 cm) se usan para la producción de nopalitas, y productos mínimamente procesados. Cuando están parcialmente lignificados (cladodios de 2-3 años), para la producción de harinas (FAO, 2006).

En el cuadro 1.5 se muestran ejemplos de algunos productos y subproductos obtenidos a partir de los frutos (tuna) y de cladodios. El jugo de cladodios se puede encontrar en shampoo, acondicionadores, lociones, jabones, y protectores de sol, y también fue reclamado para mejorar el crecimiento del cabello.

Se propuso también al polvo de cladodios como ingrediente de las bebidas a base de leche, suero de leche, y agua con hasta el 10% de nopalito.

Cuadro 1.5 Algunos productos y subproductos a base de frutas de tuna y cladodios

Productos		Subproductos
Frutos (tuna)	Cladodios	Frutos (tuna) y cladodios
Jugos y néctar	Encurtidos y salmueras	Aceite de semillas Mucílago de cladodios Pigmentos de la cáscara Fibra dietética de cladodios
Mermeladas y gelatinas	Dulces	
Hojas deshidratadas	Mermeladas y confituras	
Edulcorantes	Harina	
Alcohol y vinos	Salsa	
Conservas de frutas	Alcohol	
Frutas congeladas		












Fuente:(Saenz, 2000)

Además de los productos mencionados en el cuadro 1.5, por otra parte, es importante la utilización indirecta de la planta como hospedero de la cochinilla del carmín para producir colorantes naturales (FAO, 2006).

Además, el Nopalito farináceo puede aplicarse hasta el 20% como un agente espesante en sopas de verduras, geles de postre, un ingrediente de los cereales de desayuno y también como un sustituto parcial de la harina de trigo. Por último, los hidrocoloides de los cactus son utilizados como sustitutos de grasa y absorbentes de olores desagradables (Stintzing y Carle, 2005).

Usos adicionales de la planta de cactus han sido propuestos y revisados recientemente, como el uso de pulpa de cladodio para la producción de ungüentos para quemaduras, bebidas naturales auxiliares en el control para la gastritis, úlceras, colesterol, triglicéridos y azúcar (Magloire *et al.*, 2006).

Existe un extenso sector industrial que se beneficia con productos a partir de los nopales, tales como:

-  agroindustria de alimentos y bebidas para consumo humano (producción de diversos alimentos, bebidas alcohólicas de tuna y nopalitos);
-  agroindustria de alimentos para animales (suplementos y piensos de cladodios y de desechos de la industria procesadora de tuna, como las cáscaras y semillas);
-  industria farmacéutica (protectores gástricos de extractos de mucílagos; cápsulas y tabletas de polvo de nopal);
-  industria cosmética (cremas, shampoo, lociones de cladodios);
-  industria de suplementos alimenticios (fibra y harinas de cladodios);
-  industria productora de aditivos naturales (gomas de cladodios; colorantes de la fruta);
-  sector de la construcción (compuestos ligantes de los cladodios);
-  sector energético (producción de biogás a partir de las pencas);
-  sector productor de insumos para la agricultura (productos del nopal como mejoradores del drenaje de suelos);
-  sector turismo (artesanías en base a cladodios lignificados);
-  industria textil (uso de colorantes naturales como el carmín de cochinilla).

Las pencas provenientes de las podas del nopal tunero se utilizan como forraje para alimentar al ganado en épocas de sequía y en el invierno, aunque no cumple con una dieta completa, suple en gran medida el agua que los animales necesitan.

La transformación del nopal y la tuna, en cualquiera de sus opciones, viene a solucionar algunas de las limitaciones actuales, dando como resultado el aprovechamiento integral, la reducción del riesgo de pérdida por la estacionalidad del producto y la incorporación de valor agregado (CONAZA, 1994).

También es importante debido a la capacidad como agente emulsionante de la goma o mucílago de *Opuntia ficus-indica* (Valdez *et al.*, 2008).

1.4 Mucílago de nopal

Los mucílagos son sustancias análogas a las gomas. En contacto con el agua forman dispersiones viscosas y poseen una enorme facilidad de embeberla; propiedad de suma importancia en el mecanismo de retención de agua de las cactáceas. Los mucílagos están contenidos dentro de las grandes células vesiculares de los parénquimas (Sánchez, 1978).

Sepúlveda *et al.* (2007) define al mucílago como un hidrocoloide. Es una sustancia polimérica compleja de la naturaleza de hidratos de carbono, con una estructura muy ramificada, que contiene proporciones variables de L-arabinosa, D-galactosa, L-ramnosa y D-xilosa, así como de ácido galacturónico en diferentes proporciones. La estructura del mucílago se propone como dos distintas fracciones solubles en agua. Uno es una pectina con propiedades gelificantes con el Ca^{2+} , y el otro es un mucílago sin propiedades gelificantes.

El mucílago, difícil de fluir, se puede obtener de algunas cactáceas, de algunos frutos y semillas; tales como: nopal, sábila, mezquite, yaka, agave, maguey, tejocote, linaza, chía, entre otros (Sáenz *et al.*, 2004).

El mucílago tiene la propiedad osmótica de atrapar y de retener agua en las células buliformes. Los estudios de tejidos han demostrado que el mucílago está presente sólo en el aparato de Golgi y que la síntesis de mucílago se lleva a cabo probablemente en ella y en las vesículas derivadas de la misma. Estos polisacáridos se hinchan cuando se disuelven en agua, o en algunos casos, forma suspensiones coloidales muy viscosas, pero también ayudan a conservar el agua ya contenida en algún alimento (Sepúlveda *et al.*, 2007).

La composición química del mucílago de cladodios de *Opuntia ficus-indica*, ha sido objeto de varios estudios Cárdenas *et al.* (1997) reportaron en porcentaje: 24.6-42% de arabinosa, 21-40.1% de galactosa; 8-12.7% de ácido galacturónico; 7-13.1% de ramnosa y 22-22.2% de xilosa. Adicionalmente, mostraron que el peso molecular de este hidrocoloide es 3×10^6 . Esto fue menor que el indicado por Trachtenberg y Mayer (1981) 4.3×10^6 .

Medina-Torres *et al.* (2000) realizaron estudios sobre la composición del mucílago de nopal *Opuntia ficus indica*, ellos explicaron que es un polisacárido de alto peso molecular, el cual contiene en su estructura hasta 30,000 unidades de azúcares diferentes. El biopolímero es un polisacárido que contiene residuos de arabinosa, galactosa, ácido galacturónico, ramnosa y xilosa. Ellos obtuvieron que el peso molecular del hidrocólide fue 2.3×10^4 , mucho mayor al reportado anteriormente por otros autores. Probablemente este hecho, tenga alguna relación con el estado de madurez de los nopales, con la tierra de cultivo o con la variedad.

Matsuhiro *et al.* (2006) encontraron que el mucílago de nopal es un polisacárido neutro, donde figuran arabinosa, ramnosa, galactosa y xilosa. Es una mezcla de un glucano neutral, glicoproteínas y un polisacárido compuesto de L-arabinosa, D-galactosa, L-ramnosa, D-xilosa y ácido D-galacturónico, ácidos urónicos.

En particular, el mucílago de *Opuntia ficus-indica* contiene otros minerales, tales como Ca^{2+} y K^+ , carbohidratos y fibra dietética. El Ca^{2+} y K^+ son de gran interés con respecto a la nutrición humana (Sepúlveda *et al.*, 2007).

Por otro lado (Ruíz, 2009) reportó que el mucílago de nopal contiene un biopolímero lineal cuyo peso molecular oscila alrededor de 13×10^6 g/mol y está compuesto por polisacáridos emparentados con las pectinas. Su composición glucosídica es aproximadamente de 47% arabinosa, 23% xylosa, 18% galactosa y 5% de ácidos galacturónicos.

En especial, el mucílago ha sido motivo de estudio por sus propiedades fisicoquímicas y reológicas. Sin embargo, la vida útil del extracto es muy limitada, debido a su alta actividad de agua (> 0.8) y composición química (polisacáridos) (León, 2010).

También se ha demostrado que una solución acuosa de mucílagos provenientes de nopales tiernos tiene un comportamiento reológico No-newtoniano de tipo pseudoplástico. Tiene una gran elasticidad, similar a la que confieren polímeros sintéticos como el poli isobutileno (Medina, 2000).

1.4.1 Propiedades del mucílago de nopal

Los mucílagos o hidrocoloides son productos que están cobrando interés en la investigación médica y en el sector industrial, incluyendo el área de alimentos. Estos compuestos pueden ser extraídos de las pencas y de las cáscaras de los frutos de los nopales (Ruiz, 2009).

Estudios efectuados por Sáenz y Sepúlveda (1993) indican que el rendimiento de mucílago es bajo: 0.5 por ciento en la cáscara y 1.2 por ciento en los cladodios. Estos hidrocoloides pueden ser interesantes porque se pueden extraer de las pencas maduras dándoles mayor utilidad o de pencas provenientes de la poda de plantas que se cultivan para producción de fruta. Los mismos, podrían integrar la oferta de una gran gama de agentes espesantes de amplio uso en la industria de alimentos y farmacéutica. Su poder viscosante está siendo actualmente estudiado con resultados interesantes, por lo que si se mejoran los rendimientos de extracción podría competir con gomas de gran uso como la goma garrofín (algarrobo), el guar u otros agentes espesantes (FAO, 2006).

El mucílago de nopal (*Opuntia ficus indica*) 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).

Otra característica del mucílago de nopal es su uso en los alimentos como un sustituto de grasa y también como un aglutinante del sabor.

Este tipo de ingredientes, a menudo explotados por sus capacidades de textura, son también utilizados 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 (Saenz *et al.*, 2004).

Los mucílagos presentan interés tanto en la industria de alimentos como en la gastronómica. Pueden utilizarse como estabilizante de espumas y emulsiones en general, ya sean no alcohólicas o lácteas (FAO, 2006).

En Israel, se ha estudiado la capacidad como agente emulsionante de la goma o mucílago de *Opuntia ficus indica*. Se encontró que esta goma:

- 🌱 Reduce la tensión superficial e interfacial;
- 🌱 Estabiliza emulsiones del tipo aceite-agua;
- 🌱 Forma gotas de aceite pequeñas;
- 🌱 Absorbe hacia la interfase aceite-agua y no contribuye a la viscosidad de los sistemas;
- 🌱 Los sistemas donde se aplica no floculan.

También, el mucílago de nopal puede encontrar aplicaciones tanto en alimentos, cosméticos, industria farmacéutica, entre otras. El complejo polisacárido es parte de la fibra dietética y tiene la capacidad de absorber grandes cantidades de agua para disolverse y dispersarse en sí y dar lugar a la formación de coloides viscosos o gelatinosos (Del-Valle *et al.*, 2005).

La fibra dietética también se asocia con el control de la glucosa, y por lo tanto podría ser de ayuda para la diabetes. También puede desempeñar un papel en la reducción del riesgo de ciertos tipos de cáncer, como cáncer de colon, así como reducir los síntomas del estreñimiento crónico, enfermedad diverticular y hemorroides por su alto contenido de fibra dietética.

Otro de sus efectos es impedir la formación de radicales libres. La fermentación es otro atributo de la fibra dietética (la fibra soluble es fermentada 100% y produce un tránsito intestinal rápido) (Saenz *et al.* 2004).

Hasta hace poco tiempo, se consideraba que las gomas o hidrocoloides, no contribuían al valor nutritivo de los alimentos, por consiguiente sus calorías no aumentaban y no impartían ningún sabor ni aroma a los productos a los que se adicionaban y sólo aportaban propiedad funcional.

Actualmente, mientras se considera que la fibra insoluble de los alimentos contribuye con cero calorías, se entiende que la fibra soluble contribuye al valor calórico de los alimentos, en forma variable (FAO, 2006).

1.4.2 Procesos de extracción de mucílago de nopal

Varios autores han realizado investigaciones sobre los métodos de extracción y purificación para el mucílago. La mayoría de ellos homogeneizan los cladodios de nopal con agua para este fin, además del uso de algún solvente, como etanol o acetona para su precipitación.

Nobel *et al.* (1992) cambió el disolvente para precipitar a 2-propanol, según lo propuesto por Goldstein y Nobel (1991), a otra especie. El resultado obtenido parece indicar que al menos el 93% de la precipitación obtenida por esta técnica sería mucílago.

Medina-Torres *et al.* (2000) maceraron la pulpa obtenida de los tallos, después se centrifugó, se decantó y se precipitó en acetona. Sáenz *et al.* (2004) provocaron la precipitación con 2-propanol y finalmente secaron el mucílago obtenido.

Hasta ahora las metodologías propuestas para la extracción de fracción soluble de cladodios son complejas y costosas. Sin embargo, recientemente se han realizado investigaciones para optimizar este proceso. Sepúlveda *et al.* (2007) estudiaron las proporciones nopal/agua, las condiciones de extracción (tiempo y temperatura), sin encontrar diferencias significativas entre los resultados de las diferentes combinaciones de condiciones. Ruiz (2009) recomienda el uso de alcohol isopropílico en una proporción 1:3, ya que su valor comercial es menor que el del etanol.

En el cuadro 1.6 se presenta un análisis de las diferentes metodologías aplicadas para la extracción de mucílago de cladodios de nopal.

Cuadro 1.6 Metodologías para la extracción de mucílago de nopal

AUTORES	APLICACIÓN	MÉTODO DE EXTRACCIÓN	VENTAJAS Y DESVENTAJAS	% DE MUCÍLAGO
Medina-Torres, (2005)	Nopal obtenido en Milpa Alta (México) (<i>Opuntia Ficus Indica</i>)	Los nopales son molidos, luego centrifugados a 10,000 rpm, decantados y el sobrenadante precipitado con acetona, a una relación 1:2 pulpa de nopal:acetona. El precipitado obtenido fue recolectado, lavado con alcohol isopropílico (1:1) y finalmente se secó.	Empleo de disolventes no inocuos con el medio ambiente.	9.4 %
Matsuhiro et al., (2006)	Frutas o tunas del nopal (<i>Opuntia Ficus Indica</i> de la región de Tiltil Chile)	Las tunas se pelaron, se molieron y la mezcla se filtró. El filtrado se centrifugó a 4000 rpm y el sobrenadante se concentró con vacío. Posteriormente, se dializó contra agua destilada durante 48 h. La solución resultante se concentró con vacío y se mezcló con etanol (1:5 v/v). El precipitado se separó mediante centrifugación, se disolvió en agua destilada y se liofilizó.	Metodología compleja y sólo se aplicó en tuna no en nopal.	3.8 %



Cuadro 2.6 Metodologías para la extracción de mucilago de nopal (continuación)

<p>Arizmendi, (2004)</p>	<p>Nopal <i>Opuntia tomentosa</i> Salma-Dick</p>	<p>Primero se muelen los nopales, se les da un tratamiento térmico a 90 °C por 10 minutos y se separa la fibra por centrifugación a 2500 rpm. El sobrenadante obtenido es precipitado con etanol, separado, secado y molido.</p>	<p>Emplea un disolvente inocuo, que es compatible con alimentos, una desventaja es la cantidad de alcohol utilizado debido a la obtención de una mezcla del agua y mucilago y materiales solubles del nopal con el etanol, cuya separación posterior representa un trabajo adicional en el proceso de extracción.</p>	<p>Rendimiento 24.13 + 1.5 % sobre la materia seca.</p>
------------------------------	--	--	---	---

Cuadro 3.6 Metodologías para la extracción de mucílago de nopal (continuación)

<p>FAO, (2006)</p>	<p>Cladodios de nopal de 2-3 años</p>	<p>Los cladodios se reciben en un tanque donde se lavan con agua clorada (50 ppm) y se escobillan a fin de eliminar las espinas. Se trozan y trituran en un molino de cuchillas y se hacen llegar a un tanque donde se coloca agua potable en una relación cladodio:agua 1:7, a una temperatura de 16-18°C por al menos 16-20 h por kilo de cladodio triturado. Se hace pasar por una telagasa para separar los trozos gruesos. Posteriormente se lleva a una centrífuga de canasto o similar a fin de separar al máximo el mucílago extraído de las impurezas (paredes celulares u otras) del cladodio; el sobrenadante se concentra al vacío a 70°C, al menos hasta 1/3 de su volumen inicial a fin de disminuir la cantidad necesaria de alcohol en las próximas etapas. El extracto de mucílago concentrado se bombea a un tanque donde se agrega alcohol isopropílico (también se puede utilizar etanol) en proporción extracto:alcohol = 1:3; la mezcla se hace llegar a una centrífuga a fin de separar el mucílago precipitado. El mucílago precipitado se lava haciéndolo ebulir (95°C) con isopropanol y luego se filtra a fin de separarlo del alcohol. El mucílago se seca al vacío (70°C) en un deshidratador o estufa de aire forzado, hasta un contenido de humedad de 5-6%.</p>	<p>Muy largo y complejo</p>	<p>No reportado</p>
------------------------	---------------------------------------	---	-----------------------------	---------------------

Cuadro 4.6 Metodologías para la extracción de mucílago de nopal (continuación)

<p>Orozco <i>et al.</i>, (2005)</p>	<p>Nopal fresco (<i>Opuntia ficus indica</i>)</p>	<p>El jugo es obtenido por molienda de nopal fresco y después se clarifica en una centrífuga de camisas (10,000 rpm, 15 minutos). Las propiedades reológicas del jugo clarificado se determinaron a 25°C con un viscosímetro Haake modelo RV20 (velocidad de corte de 1 a 100 s⁻¹).</p> <p>Se probaron diferentes cartuchos (micro y ultrafiltración) para conocer el grado de retención del polisacárido, sometiendo el permeado y retenido a precipitación con acetona para conocer la concentración.</p>	<p>La metodología implica otras técnicas de extracción que podrían traer un alto costo y el solvente empleado es inocuo.</p>	<p>La concentración de polisacárido del jugo clarificado varía de 2 a 4 g/L.</p>
<p>Del-Valle <i>et al.</i>, (2005)</p>	<p>Cladodios de nopal</p>	<p>Los cladodios fueron limpiados y cortados en cubos de 1cm³. Después fueron homogenizados con agua destilada (20% p/v). Se centrifugó por 10 minutos a 4000 rpm y el sobrenadante obtenido es el mucílago.</p>	<p>La metodología es muy sencilla y no ocupa solventes.</p>	<p>No reportado</p>

Cuadro 5.6 Metodologías para la extracción de mucílago de nopal (continuación)

<p>Huerta Gutiérrez, A y Montes de la Rosa M., (2003)</p>	<p>Cladodios de nopal</p>	<p>El cladodio seco (liofilizado) se trituroó (1g) en un mortero, al polvo obtenido se le agregaron 15 mL de oxalato de amonio al 0.5% p/v, posteriormente la mezcla se calentó a 85°C durante 30 minutos, transcurrido este tiempo se volvieron a adicionar 15 mL de oxalato de amonio al 0.5% p/v y la mezcla se volvió a someter a calentamiento bajo las mismas condiciones de tiempo y temperatura.</p> <p>La mezcla obtenida fue centrifugada durante 5 minutos a 3000 rpm, y se separó el sobrenadante del precipitado. Se agregó un volumen semejante de acetona, previamente enfriada a 4°C, la mezcla obtenida se sometió a agitación ligera, se dializó, evaporó, liofilizó y se pesó, obteniendo de este procedimiento los polisacáridos estructurales del nopalito (mucílago).</p>	<p>Metodología muy larga, además de que se emplean disolventes inocuos y nocivos.</p>	<p>No reportado</p>
---	---------------------------	---	---	---------------------

Cuadro 6.6 Metodologías para la extracción de mucílago de nopal (continuación)

<p>Sepúlveda <i>et al.</i>, (2007)</p>	<p><i>Opuntia spp.</i> Cladodios de plantas de 2 a 3 años de edad</p>	<p>Se realizaron dos metodologías diferentes de extracción. Los cladodios de nopal fueron molidos en una licuadora (Moulinex) homogenizados con agua en rangos de 1:5 y 1:7, filtrados a través de una tela fina y se centrifugó (3560 g) por 10 minutos. Con el fin de reducir la cantidad de alcohol utilizado en la precipitación, la solución de mucílago se concentró hasta un tercio de su volumen en un evaporador. Se emplearon dos temperaturas para la extracción $16\pm 2^{\circ}\text{C}$ y $40\pm 2^{\circ}\text{C}$.</p> <p>Para la extracción a $16\pm 2^{\circ}\text{C}$ los tiempos de maceración fueron de 8 y 16 h respectivamente. Para la extracción a $40\pm 2^{\circ}\text{C}$ la maceración duró 4 horas. El mucílago se precipitó con etanol y alcohol isopropílico y se seca en un horno de vacío a 70°C. La relación alcohol/agua empleados fueron 1:3 y 1:4.</p>	<p>El procedimiento es largo, requiere de mucho tiempo además de la aplicación de calor, pero los disolventes empleados no son nocivos para el medio ambiente.</p>	<p>17.9%</p>
--	---	---	--	--------------

Cuadro 7.6 Metodologías para la extracción de mucílago de nopal (continuación)

Anónimo	<i>Nopal</i>	<p>Se llevó a cabo la molienda de cladodios de nopal en una licuadora, posteriormente se le dio un tratamiento térmico a 90 °C por 10 minutos. Se centrifuga a 5000 rpm durante 10 minutos para la eliminación de la fibra y material insoluble.</p> <p>Al sobrenadante obtenido se le agregó etanol en una relación 1:4 y se congeló a -10°C durante 24 h para la precipitación del mucílago. El mucílago (material insoluble en etanol) se separa por centrifugación a 5000 rpm durante 10 minutos para la eliminación de materiales solubles en agua y etanol. Se somete a secado en estufa a 35°C por 48 h y se lleva a cabo una molienda manual en mortero para así obtener mucílago seco en polvo.</p>	Metodología rápida y uso de disolvente menos inocuo.	No reportado
---------	--------------	--	--	--------------

II. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

PROBLEMA: Establecer las condiciones de extracción de mucílago de nopal (*Opuntia Ficus Indica*) mediante operaciones mecánicas.

OBJETIVO GENERAL: Establecer una metodología para obtener mucílago de cladodios de nopal deshidratado (*Opuntia Ficus Indica*), con estadio de maduración de 100 días, mediante operaciones mecánicas, con la más alta eficiencia de separación, mayor rendimiento y calidad.

OBJETIVOS PARTICULARES:

- I.- Determinar la influencia de la velocidad de alimentación, velocidad de giro y altura de los tornillos de gravedad mediante la centrifugación de una suspensión de nopal deshidratado, para obtener las mejores condiciones de separación de mucílago (rendimiento y eficiencia).
- II.- Evaluar el comportamiento reológico del mucílago de nopal obtenido a las mejores condiciones experimentales, en disoluciones a diferentes concentraciones, para establecer los parámetros reológicos.
- III.- Caracterizar mucílago de nopal obtenido a las mejores condiciones, mediante microscopía electrónica de barrido a alto vacío para ver su morfología e identificar sales de calcio y espectroscopía de absorción atómica para determinar su concentración de calcio.

Desarrollo experimental

Los procedimientos experimentales se resumen en el cuadro metodológico que se muestra en la figura 2.1, el cual contiene el problema, objetivos, variables, actividades preliminares, actividades por objetivo, condiciones de trabajo y las técnicas que se utilizaron para la evaluación de las muestras obtenidas.

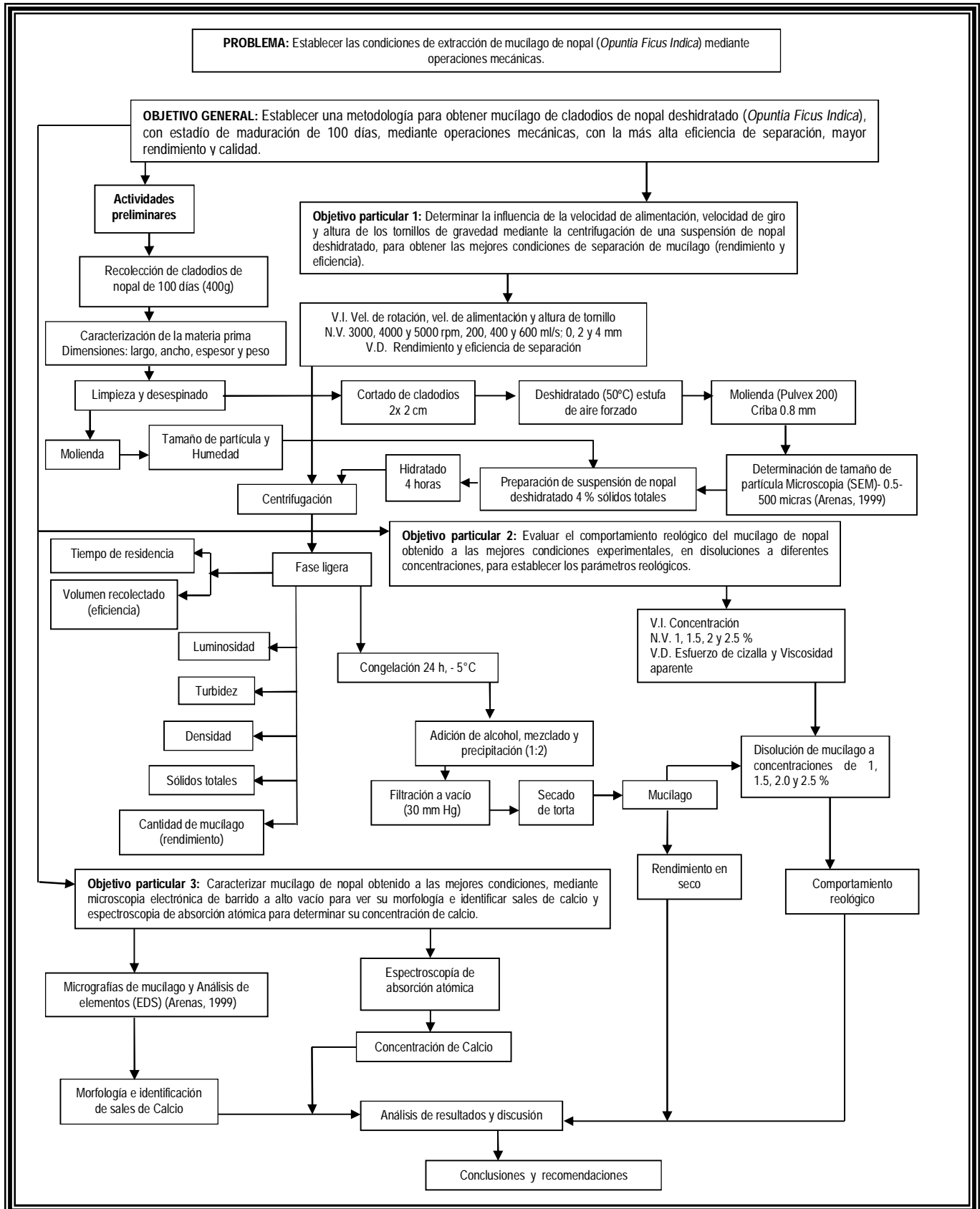


Figura 2.1 Cuadro metodológico del desarrollo experimental

La extracción de mucílago de nopal se llevó a cabo siguiendo el diagrama de bloques el cual se muestra en la figura 2.2 y se explica en este apartado.

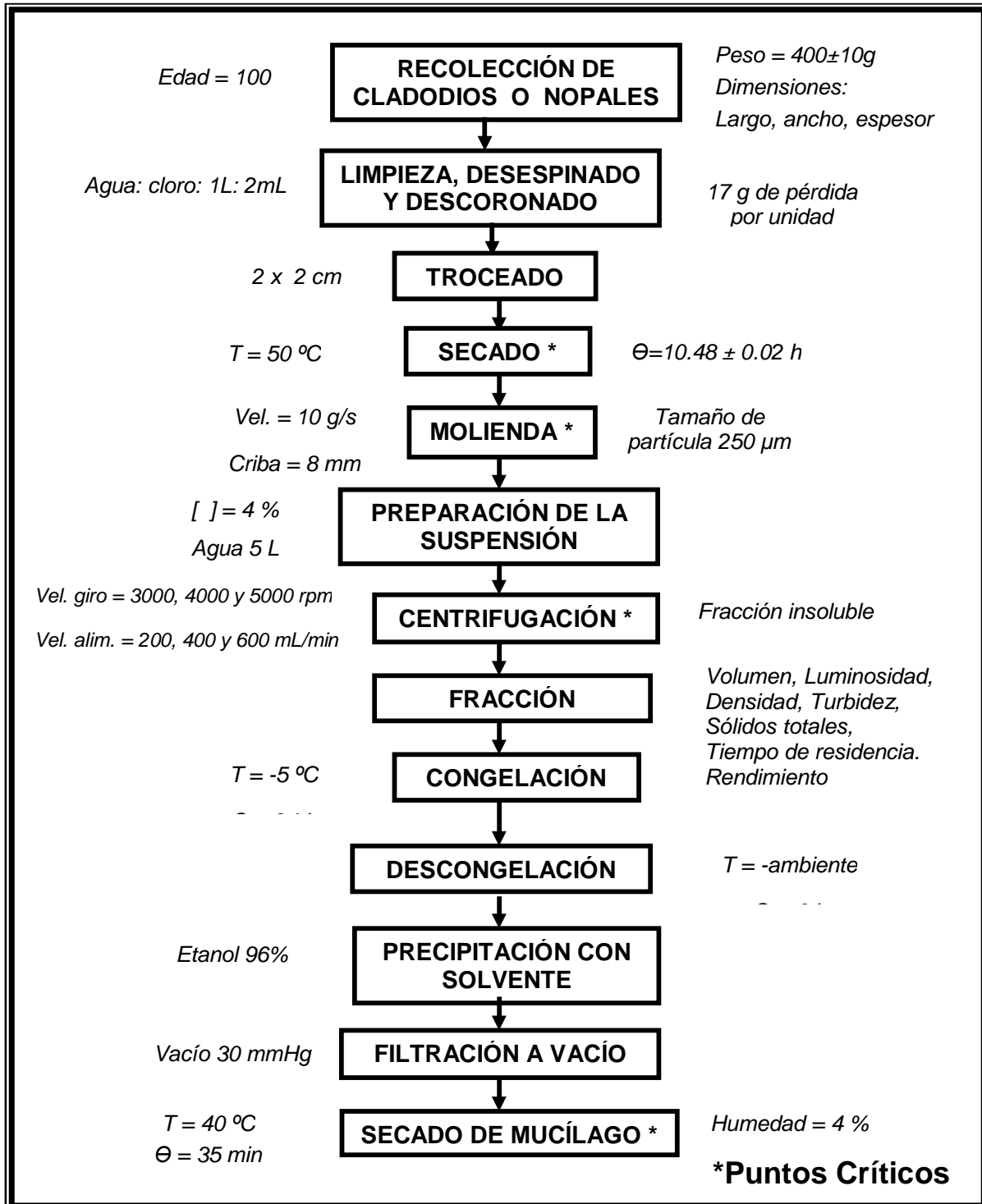


Figura 2.2 Diagrama de bloques de la extracción de mucílago de nopal

2.1 Descripción de las actividades preliminares

- **Recolección de cladodios de nopal**

Los cladodios de nopal fueron recolectados en un rancho experimental ubicado en el Estado de Guanajuato (Rancho los Lores) el cual se muestra en la figura 2.3. Los nopales fueron seleccionados de acuerdo al peso 400 ± 10 g, que corresponde con un estadio de maduración de 100 días aproximadamente. Cada uno de los nopales fue pesado en una balanza granataria digital Marca Ohaus, modelo VOB 120 para posteriormente acomodarse y trasladarse.



Figura 2.3 Rancho los Lores

La figura 2.3 muestra cladodios o nopales de diferentes edades, de manera que la selección se dificultó y la decisión se tomó después de ser cortado y pesado cada uno de los nopales. La recolección se realizó manualmente como muestran las figuras 2.4 a y 2.4 b.

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 forma adecuada de cosechar el nopal fue tomando el brote con la mano izquierda y con la derecha se realizó el corte unos milímetros por arriba de la unión de la base entre la penca y el brote.



Figuras 2.4 a) Corte de cladodios; 2.4 b) Recolección de cladodios de 400 g

Los cladodios de 400 g mostrados en las figuras 2.4 a y 2.4 b después de cortados fueron cepillados con un instrumento de cerdas naturales para eliminar las espinas más pequeñas, después se colocaron en huacales y se trasladaron a México.

2.2 Caracterización física de la materia prima

Para la caracterización física de los cladodios de nopal se llevó a cabo la medición del largo, ancho y espesor. Las mediciones se llevaron a cabo con una regla metálica de 30 cm. Para la determinación del espesor se utilizó un vernier digital, Marca Seteren Mul-100 y para pesarlos se empleó una balanza granataría digital Marca Ohaus, modelo VOB 120.

2.2.1 Limpieza y desespinado de los cladodios de nopal

Cada una de las unidades experimentales se lavaron con agua corriente, y se cepillaron para su limpieza, después se escurrieron y se les retiraron las espinas restantes, con ayuda de un instrumento punzo cortante de acero inoxidable filoso (sacabocado) para evitar cortar exceso de pulpa de acuerdo a lo que aparece en la figura 2.5, el instrumento se incrustó y giro en cada una de las espinas ya que en este estadio de maduración son muy gruesas y están muy insertadas al cuerpo del cladodio.

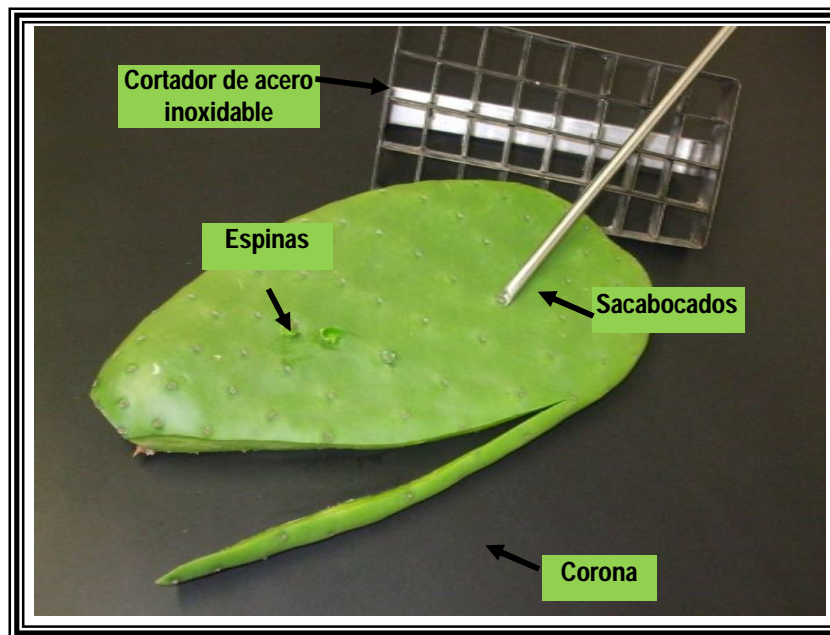


Figura 2.5 Desespinado de cladodios de nopal

Como muestra la figura 2.5, se retiró la corona del nopal con un instrumento punzo cortante debido a que es la parte más dura y reseca del mismo, la figura muestra la mayor parte de la corona retirada.

El instrumento de acero inoxidable ubicado en la parte posterior de la figura 2.5, es un molde con filo, que tiene la función de cortar en cuadros homogéneos a los cladodios de nopal para someterlos al secado. Las dimensiones de cada uno de los cuadros fueron de 2 x 2 cm.

2.3 Determinación de concentración de humedad en nopal fresco

Para determinar la concentración de sólidos totales se utilizó una prueba indirecta con el método de humedad de la AOAC, 2000.

Se limpiaron y desespitaron los cladodios de nopal, se procedió a tomar algunos de ellos y a rebanarlos finamente con un instrumento punzo cortante de acero inoxidable como se puede observar en la figura 2.6 y se almacenaron en un recipiente de plástico para su molienda.

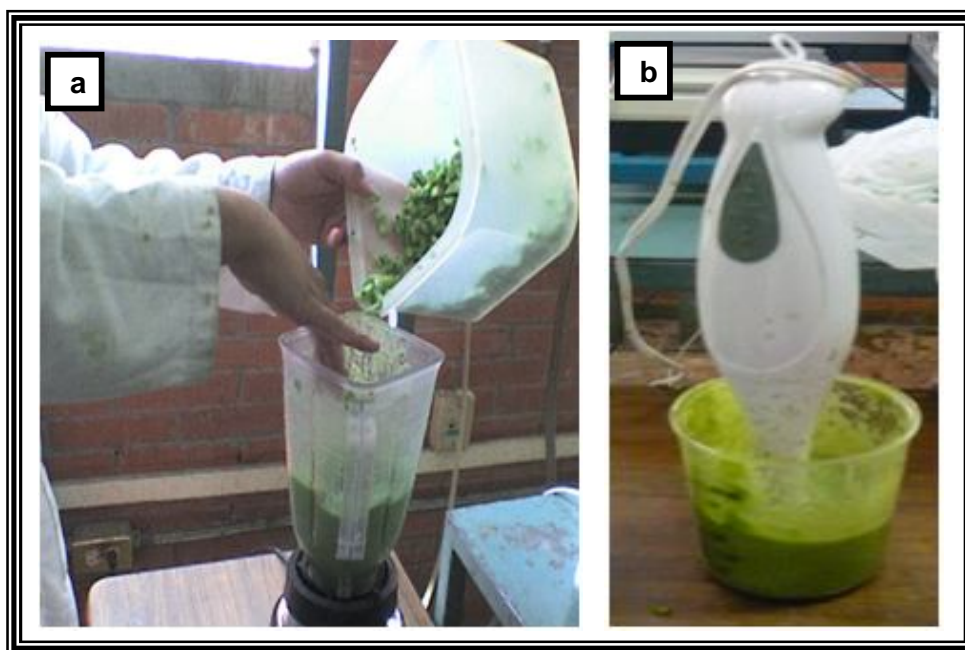


Figura 2.6 Troceado de cladodios de nopal limpios y desespitados

Como se aprecia en la figura 2.6, los cladodios deben ser finamente picados, para que su molienda sea más fácil y requiera de menor energía.

En una licuadora Marca Osterizer modelo 10 Speed, se vertieron unos gramos de nopal y se molieron a la mínima velocidad sin adicionar agua, se fueron agregando otros nopales sin interrumpir la molienda una vez que la muestra comenzó a soltar mucílago y hacerse viscosa. Así se fueron adicionando todos los nopales hasta llenar el vaso de acuerdo a la figura 2.7 a.

Posteriormente, se continuó la molienda a la máxima velocidad hasta que la pulpa quedó completamente homogénea en tamaño, después se pasó a un vaso de precipitados de 500 mL y con ayuda de un procesador marca Moulinex modelo 006 el concentrado se siguió moliendo por 2 minutos, como se aprecia en la figura 2.7 b. Una vez llena la licuadora se vertió a recipientes dejando un poco del material para que ahí se vayan agregando más nopales y estén sumergidos en la suspensión del mismo.



Figuras 2.7 a) Molienda de nopal en licuadora y 2.7 b) Molienda con procesador

En la figura 2.7 a, la molienda tiene un tamaño de partícula grande y es muy espeso, por ello se procedió a la segunda molienda. En la figura 2.7 b, el tamaño de partícula es más homogéneo además de que es menos espeso para su manejo.

Es importante que no se adicione ningún solvente debido a que se requiere hacer pruebas con este concentrado de nopal. El concentrado se vertió en frascos para utilizarse en la determinación de humedad y tamaño de partícula.

En tres charolas de aluminio puestas previamente a peso constante se pesaron en una balanza analítica marca OHAUS modelo E11140, 10 gramos de concentrado de nopal como muestra la figura 2.8 y con la ayuda de una espátula éste se esparció en toda la superficie de la charola. Las charolas se colocaron dentro de una estufa a 80 °C hasta llegar a un peso constante, para lo cual la muestra se pesó cada 20 minutos y se tomó su peso para conocer como perdía humedad.



Figura 2.8 Charola con muestra de nopal molido

En la figura 2.8 se aprecia el peso de las muestras durante su deshidratación. Esta actividad se realizó continuamente hasta encontrar que el peso de la muestra fuera constante. Se obtuvo la humedad. La relación utilizada para la obtención del porcentaje de sólidos totales en la pulpa de nopal fue la siguiente:

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

Donde:

PCM_h = Peso de la Charola con Muestra húmeda

PCM_s = Peso de la Charola con Muestra seca

PC = Peso de la Charola

gM = gramos de Muestra

Esta determinación reporta la cantidad de sólidos totales en nopales en fresco con la finalidad de preparar posteriormente suspensiones con polvo de nopal deshidratado a la misma concentración.

2.4 Determinación de tamaño de partícula por microscopía electrónica de barrido (SEM- AV)

Para determinar el tamaño de partícula se tomó una muestra de la pulpa de nopal y se colocó en un portaobjeto del microscopio electrónico como se observa en la figura 2.9 a. Primero se pegó la cinta de carbón al porta muestras donde se dejó deshidratar la muestra a temperatura ambiente. En la figura 2.9 b se presenta el equipo donde se realizó el baño de oro a la muestra. En la figura 2.9 c se colocó en el porta muestras del microscopio electrónico, por último se introdujo al microscopio como se aprecia en la figura 2.9 d, dicha técnica se llevó a cabo en un microscopio electrónico de barrido a alto vacío (JEOL, modelo JSU-5600).

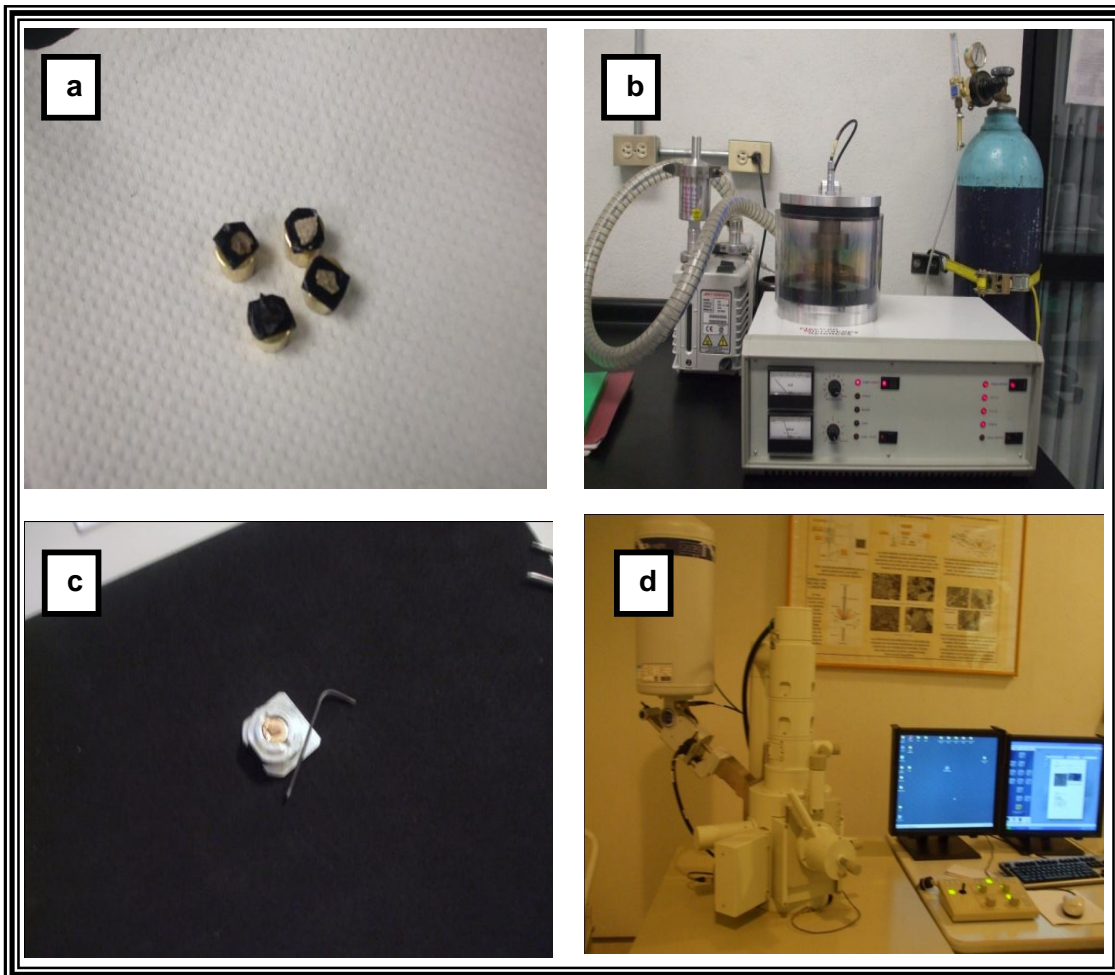


Figura 2.9 Montaje de la muestra de nopal molido para observar en microscopio; 2.9 a) Pegado de la muestra en cinta de carbón electroconductiva; 2.9 b) Baño de oro; 2.9 c) Portamuestras del microscopio electrónico; 2.9 d) Microscopio electrónico de barrido

Las actividades en microscopio electrónico de barrido a alto vacío (JEOL, modelo JSU-5600 LV), permitieron determinar el tamaño de partícula de la muestra de nopal molido fresco en licuadora. Con estos resultados se igualó el tamaño de partícula de nopal molido deshidratado. Además es un dato que requiere la centrifuga de discos ya que solo permite introducir concentrados con tamaños de partícula en un intervalo de 0.5 - 500 μm . Éste microscopio cuenta con un software especial para determinar el tamaño de partícula.

2.5 Deshidratado de cladodios de nopal

Posteriormente los nopales fueron cortados en cuadrados con tamaño de 2 x 2 cm para facilitar el secado, con un instrumento de acero inoxidable el cual se observa en la parte del fondo de la figura 2.10 y se indica con una flecha.

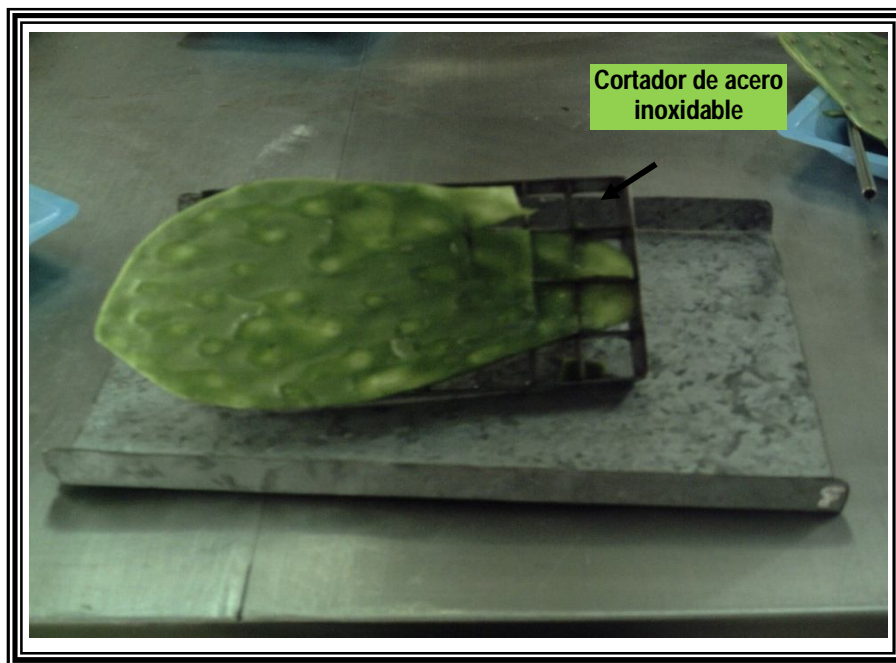


Figura 2.10 Troceado de cladodios de nopal

Como se puede apreciar en la figura 2.10, con ayuda del molde filoso, se llevó a cabo el troceado de cada uno de los cladodios de nopal, los trozos tienen un tamaño homogéneo para que se lleve a cabo más rápidamente su deshidratado.

Ya troceados los cladodios, se procedió a acomodar los trozos en las charolas de acero inoxidable. Éstas se colocaron dentro de una estufa de aire forzado Marca BG Didacta Italia modelo E102 de acuerdo a la figura 2.11 para ser deshidratados a 50 °C. Las tomas de las lecturas de temperatura se realizaron con un termómetro digital Marca Extech Instruments, modelo 42500, cada media hora. Previamente se caracterizaron las camas de la estufa para conocer su temperatura real.



Figura 2.11 Deshidratado de nopal en estufa de aire forzado

Como se aprecia en la figura 2.11, se llenaron todas las camas del equipo con 5 kg de muestra de nopales cortados de estadíos de maduración de 100 días aproximadamente. Los trozos de nopal se voltearon varias veces durante el tiempo de secado de las muestras una vez que se ha secado la superficie, para evitar que las piezas se pegaran a las charolas. Ya que los trozos comenzaron a deshidratarse se redujo su tamaño, por esa razón se colocaron en charolas de acero inoxidable con orificios más reducidos, para evitar que cayeran por los orificios de las camas del equipo como se puede apreciar en la figura 2.12.

En esas charolas también se voltearon varias veces los trozos de nopal hasta alcanzar humedades del 4% para asegurar su conservación durante su almacenamiento. Generalmente durante el deshidratado, los trozos de nopal se redujeron hasta aproximadamente 1x1cm.

También se puede apreciar que las muestras perdieron intensidad del color verde al secarse en este equipo. El verde intenso se convirtió en verde pajizo. Los trozos de nopal comenzaron a doblarse por las esquinas.



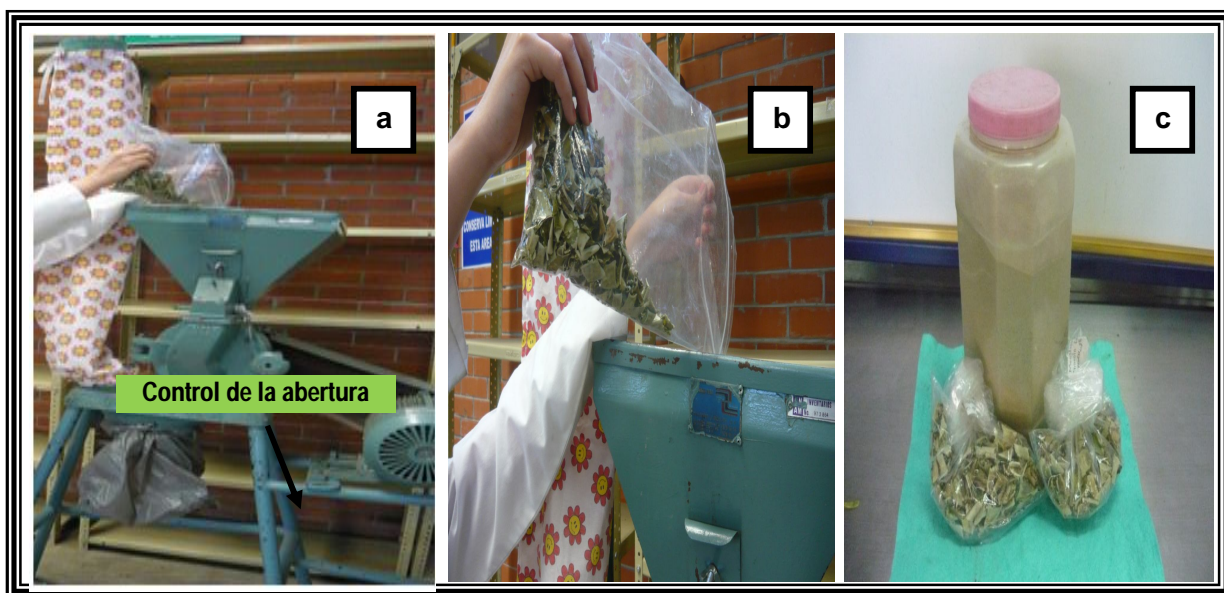
Figura 2.12 Trozos de cladodios deshidratados

La figura 2.12, muestra los trozos de nopal deshidratándose en las charolas de acero inoxidable con orificios pequeños.

Los primeros 20 minutos de secado consistieron en una rampa de calentamiento hasta que el equipo alcanzó la temperatura de 50 °C. Posteriormente el secado se llevó a cabo con la isoterma de 50 °C durante diez horas veinte minutos. En la isoterma el equipo suspende la energía en ciclos de cada 20 minutos. La temperatura se controló con un termómetro digital Marca Extech Instruments, modelo 42500 y un termómetro de mercurio instalado dentro del equipo.

2.6 Molienda de cladodios de nopal deshidratados

El nopal ya deshidratado se almacenó en bolsas de cerrado hermético para evitar que absorbieran agua. Posteriormente, se redujo de tamaño en un molino de martillos estriado PULVEX 200 como muestra la figura 2.13 a y b vertiendo los trozos de nopal a la tolva de alimentación. La restricción a la salida se llevó a cabo con una criba de 0.8 mm. Las velocidades de alimentación al molino fueron constantes a 10 g/s para todas las muestras molidas. En la Figura 2.13 c, se pueden apreciar trozos de nopal deshidratado en bolsas y polvo de nopal en frascos de cerrado hermético. El polvo se hizo pasar por un tamiz 60 USA. Este polvo sirvió para preparar suspensiones con nopal deshidratado a la misma concentración de sólidos del nopal fresco.



Figuras 2.13 a) Llenado de la tolva de alimentación en el molino; 2.13 b) Molienda de cladodios de nopal deshidratados; 2.13 c) Trozos y polvo de nopal

En la figura 2.13 a y b se puede apreciar que al molino se le colocó una manta para que el polvo no saliera hacia el ambiente, y una bolsa a la salida del molino para recibir el polvo de nopal. El molino se encendió y con la abertura de la tolva controlada va dosificando poco a poco los trozos de nopal deshidratado. El nopal deshidratado se almacenó a temperatura ambiente para su posterior uso.

2.7 Preparación de suspensión con nopal deshidratado

Se preparó una suspensión de 5 litros al 4% de nopal deshidratado (de acuerdo a los resultados de sólidos totales del fresco) y agua embotellada. El polvo se mezcló con el agua utilizando un homogeneizador marca IKA-WERKE modelo EUROSTAR BSC.S1 como muestran la figura 2.14 a, 2.14 b y 2.14 c. El equipo fue operado a 450 rpm durante 20 minutos. El polvo se fue vaciando poco a poco para que se fuera incorporando sin formar grumos. La suspensión se dejó reposar durante cuatro horas en una cubeta para la mejor hidratación del polvo de nopal.

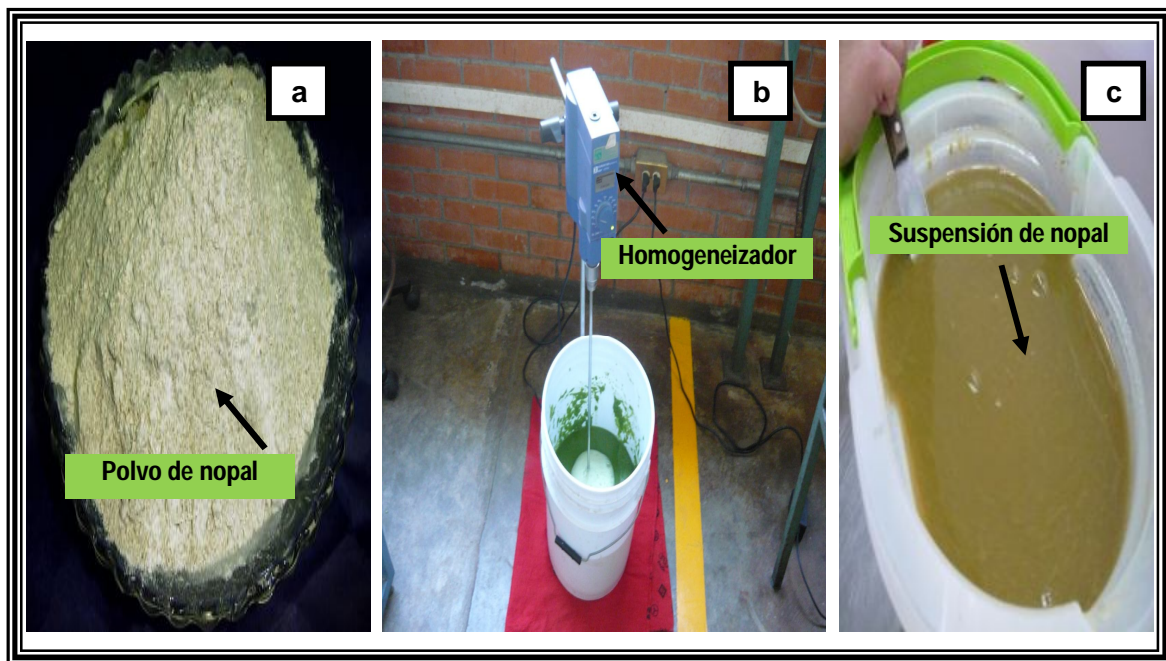


Figura 2.14 a) Polvo de nopal; Figura 2.14 b) Homogenización del polvo de nopal con agua destilada; Figura 2.14 c) Suspensión de nopal

Una vez pasado el tiempo de reposo, con ayuda de una espátula como se aprecia en la figura 2.14 c se mezcló la suspensión antes de ser vaciada al tanque de alimentación de la centrifuga para que los sólidos no se quedarán precipitados en el fondo del envase, además de que se guardó una muestra de la suspensión para llevar a cabo otras determinaciones de los objetivos planteados.

Actividades objetivo particular 1

2.8 Centrifugación de suspensiones de nopal a diferentes condiciones

Todas las suspensiones que se llevaron a centrifugación fueron preparadas como se mencionó en el punto 2.7.

La centrífuga de discos Marca Didacta Italia, Modelo TAG1/d se muestra en la figura 2.15 a y b. En la figura 2.15 a, aparece el tanque de alimentación donde se vierte la suspensión de nopal. La figura 2.15 b muestra el tablero de control para regular las velocidades de giro de la centrífuga.

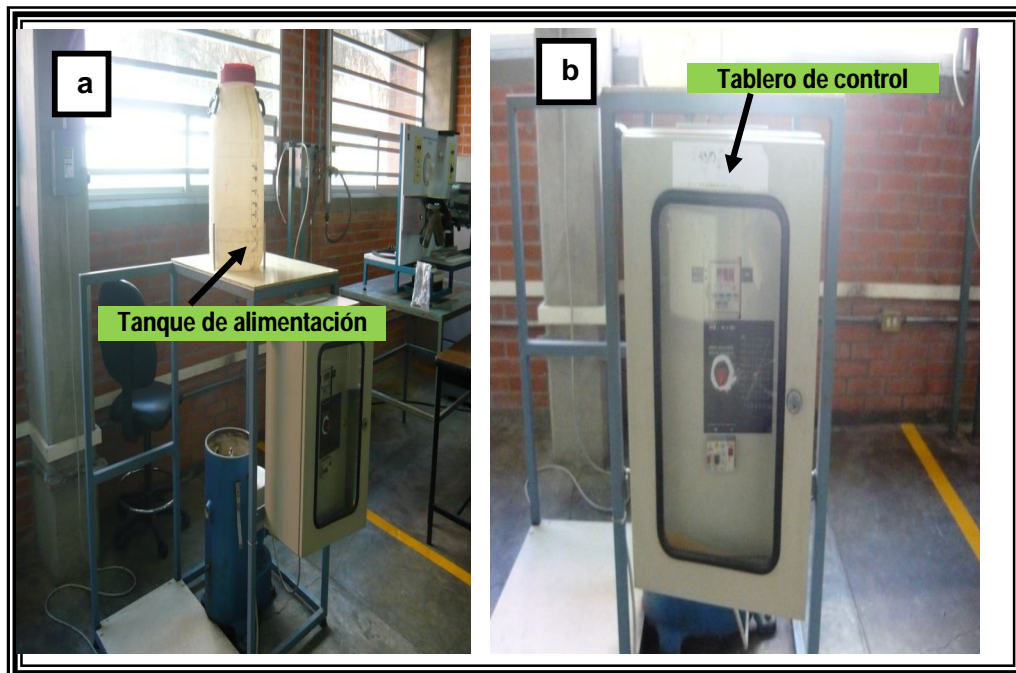


Figura 2.15 a) Tanque de alimentación; Figura 2.15 b) Tablero de control

Posteriormente, se ensamblaron el tazón y los discos de acuerdo a como se muestra en la figura 2.16. Se verificó que el switch de alimentación de energía estuviera interrumpido. Primero se colocó el cojinete, enseguida el tazón, la rondana y su tuerca de seguridad, encima el soporte de los discos y dentro se acomodaron 76 discos en forma ascendente.

Se tuvo que ser muy cuidadoso en el acomodo del tazón, procurando que checaran todas las muescas y marcas del mismo con el anillo de seguridad y la tapa. Fue necesario verificar que las series coincidieran con las partes que integran a la centrífuga y que los discos correspondían a la separación de jugos.

Los anillos sujetadores debieron estar puestos durante el ensamble del tazón, pero una vez armado se retiraron del equipo. La centrífuga cuenta con dos llaves, la llave "T" tiene cuerda y sirvió para colocar el tazón y el cuerpo de los discos al equipo. Mientras que la llave de anillo permitió ajustar el anillo de seguridad.



Figura 2.16 Ensamble de las partes de la centrífuga de discos

La figura 2.17 muestra el cierre completo con la llave de anillo hasta que coincidieran las marcas con el tazón y anillo. En la figura se puede apreciar el cierre del anillo de seguridad. Se debe ser sumamente cuidadoso con el cierre del tazón y la tapa debido a que las velocidades de giro empleadas son muy altas.

Otro aspecto que se puede observar son los tornillos de restricción de la fracción soluble, estos permiten regular el flujo de salida de la misma al modificar su altura con un desarmador.

Un punto importante después del ensamble y antes de colocar las tolvas de las fracciones soluble e insoluble fue colocar el nivel en la parte superior para corroborar que este nivelado. Posteriormente, se encendió y se subió la velocidad hasta 5000 rpm, se analizó que el sentido del giro fuera a la derecha y se escuchó el sonido que generaba. Si el sonido es extraño, se desarma y se procede de nuevo al ensamble hasta que este correcto.

Enseguida se colocaron las tolvas sobre el orificio del soporte de discos y se ajustaron los cinturones de seguridad de ambos lados.



Figura 2.17 Cierre del Anillo de seguridad

Es de suma importancia vigilar que el anillo de seguridad quede bien cerrado así como el ajuste de los cinturones de seguridad para evitar accidentes al hacer girar los discos, ya que las velocidades que serán empleadas son altas.

En la figura 2.18 se observa la válvula de alimentación, la cual esta colocada por debajo del tanque que contiene el producto, así como la tolva de la fracción soluble y el cinturón de seguridad.



Figura 2.18 Válvula de alimentación y tolvas de las fracciones soluble e insoluble

Finalmente, la centrífuga queda armada como se muestra en la figura 2.19 y así es como se debe de armar para llevar a cabo cada una de las corridas experimentales.

Inició la operación a las condiciones de trabajo seleccionadas. La velocidad de alimentación la regula la válvula de alimentación. La altura de los tornillos de gravedad regulan la salida de la fracción ligera y la velocidad de giro es controlada con el panel de control.

En el cuadro 2.1 se muestran las variables independientes y los niveles en que se trabajaron. En el caso de la velocidad de giro los niveles de variación quedaron muy cercanos, la razón se debe a que en otros valores, más bajos la fracción ligera sale contaminada y con baja calidad de clarificado. En cuanto a las velocidades de alimentación es difícil su control por las características del material a centrifugar, ya que no fluye libremente y requiere del mezclado constante.

Cuadro 2.1 Variables independientes y sus niveles de variación trabajados

Variable independiente	Niveles de variación
A) Velocidad de alimentación (mL/min)	200, 400, 600
B) Velocidad de giro (rpm)	3000, 4000, 5000
C) Altura del tornillo fracción soluble (mm)	0, 2, 4

Control de los niveles de las variables independientes:

- **La variable A** (velocidad de alimentación o flujo volumétrico de entrada) 200 mL/min abertura de la válvula $\frac{1}{2}$ vuelta, para 400 mL/min abertura de la válvula vuelta completa y para 600 mL/min $1 \frac{1}{2}$ vuelta).
- **La variable B** (velocidad de giro de la centrífuga) se varió con el tablero de control a 3000 rpm, 4000 rpm y 5000 rpm. Cuando la centrífuga alcanza 3000 rpm comienza la experimentación y así sucesivamente.
- **La variable C** (altura de tornillo de restricción de la fracción soluble), se varió modificando la altura del tornillo de gravedad; para 0mm completamente cerrado, para 2 mm y para 4mm de altura.

Las variables o factores dependientes se muestran en el cuadro 2.2, con estas variables se seleccionaron los criterios para evaluar la eficiencia de separación del mucílago obtenido a las diferentes condiciones de centrifugación.

Para el parámetro de luminosidad, entre más alto, el clarificado es más parecido al agua, debido a que ésta fue la que se tomó como patrón. El valor de turbidez entre más bajo es similar al del patrón (agua embotellada). La densidad y los sólidos totales entre valores más altos indican que el clarificado está contaminado con fracción insoluble.

El rendimiento del mucílago se determinó por la cantidad de miligramos de mucílago de nopal deshidratado obtenido por gramo de nopal utilizado. El tiempo de residencia del material dentro de la centrífuga se cuantificó, desde que entra la primera gota, hasta que sale la última del equipo.

Cuadro 2.2 Variables dependientes para evaluar rendimiento y eficiencia

Variable dependiente	Unidades
Volumen de recolectado (fracción soluble)	(mL)
Luminosidad (fracción soluble)	(L)
Densidad (fracción soluble)	(g/cm ³)
Turbidez (fracción soluble)	NTU
Sólidos totales (fracción soluble)	(g)
Tiempo de residencia (fracción soluble)	(min)
Rendimiento de mucílago*	mg _m /g _n

*Cantidad de mucílago seco en mg por gramo de nopal

Una vez ensamblada la centrífuga y después de las cuatro horas de reposo, la suspensión se colocó en el tanque de alimentación, se introdujo la propela del homogeneizador y se mezcló la suspensión a 450 rpm, ver figura 2.19.

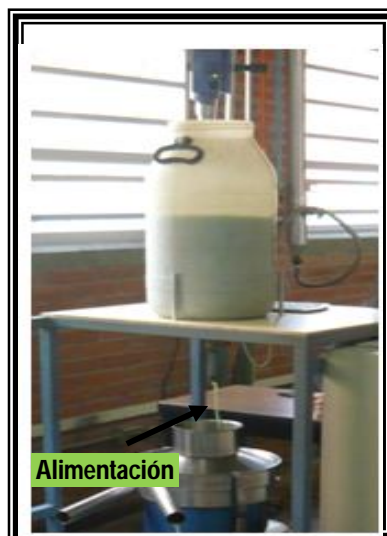


Figura 2.19 Alimentación a la centrífuga

La velocidad de giro de los discos se aumentó poco a poco en el panel de control hasta alcanzar la de 3000 rpm, en ese momento se abrió la válvula de alimentación de acuerdo a las condiciones anteriormente mencionadas, e inició la corrida experimental, primero se llenó el tazón y luego comenzó a salir la fracción soluble como se muestra en la figura 2.20.

La fracción soluble salió por los anillos de gravedad y por la tolva superior de la centrifuga. En la figura 2.20 se puede apreciar la fracción soluble.

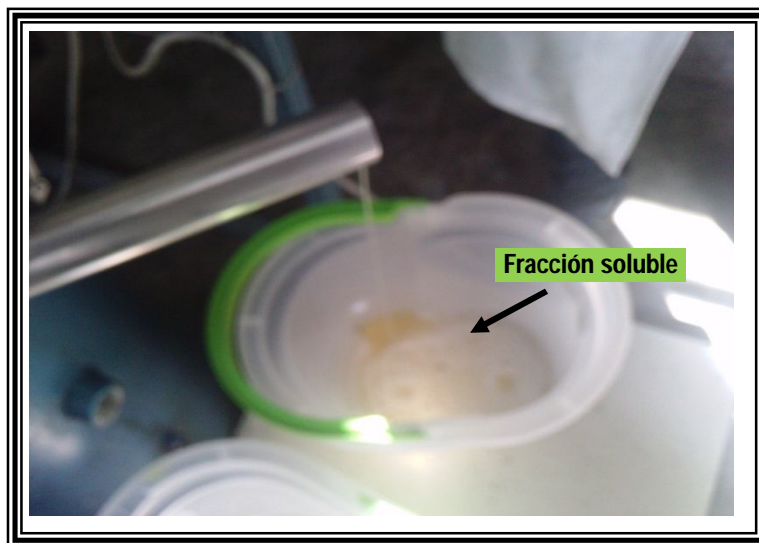


Figura 2.20 Salida de la fracción soluble (sólidos solubles)

Como se aprecia en la figura 2.20 la fracción soluble cuando no está contaminada con fracción insoluble es transparente con un color verde claro.

Una vez que dejó de salir la fracción soluble, se cerró la válvula de alimentación y se fue disminuyendo poco a poco la velocidad en el panel de control hasta llegar a cero. El equipo se apagó, se suspendió la corriente y se lavó disco por disco, así como el tazón, las tolvas y el tanque.

Para volver a ensamblar la centrifuga y realizar una nueva corrida, todas las piezas deben estar completamente limpias, no fue necesario secar todo hasta el fin del trabajo experimental del día.

En la figura 2.21 a se aprecia la fracción insoluble en el tazón y 2.21 b los sólidos de la fracción insoluble recolectados después de la centrifugación. Esta fracción insoluble corresponde a los sólidos insolubles que integran a la suspensión de nopal. También se puede apreciar que en el tazón quedan algunos mL de fracción soluble.



Figura 2.21 a) Fase pesada en tazón; Figura 2.21 b) Sólidos recolectados de la fase pesada

La centrifuga se apagó y se desarmó para obtener los sólidos insolubles que se quedaron en el tazón. Como se aprecia en las figuras 2.21 a y b, los sólidos insolubles (la fibra insoluble) presentaron un color oscuro. Todas las suspensiones siguieron la misma metodología, pero variando las condiciones de centrifugación como se mencionó anteriormente.

2.9 Rendimiento y eficiencia de separación

Para cumplir el objetivo 1, se planteó la evaluación de la fracción soluble de las extracciones de mucílago de nopal de cada una de las corridas experimentales. Considérese a la eficiencia de separación como resultado de todas las pruebas que evidencian la pureza de la fracción soluble como las de volumen recolectado, densidad, sólidos totales, turbidez, luminosidad y tiempo de residencia; y al rendimiento como la cantidad de mucílago obtenido por gramo de nopal.

2.9.1 Eficiencia de separación

- **Volumen recolectado de la fracción soluble (mL)**

En una probeta de plástico graduada como la que se muestra en la figura 2.22 a y 2.22 b, se cuantificó el volumen de salida de la fase ligera para cada uno de los niveles de variación.

Esta recolección se realizó a la salida de la centrífuga durante la operación de separación.

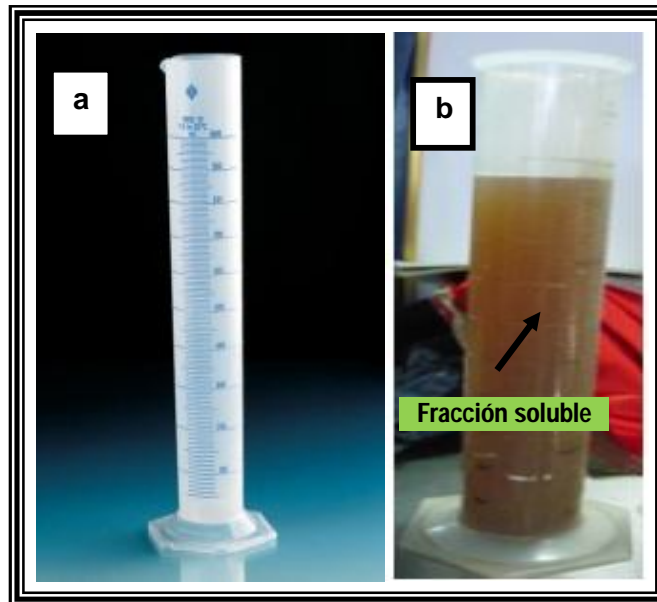


Figura 2.22 a) Probeta vacía; Figura 2.22 b) Volumen de la fracción soluble

La probeta se colocó a la salida de la tolva de la centrífuga para la fracción soluble y se dejó ahí hasta que se llenó, cuantificando su tiempo de residencia dentro de la centrífuga. No necesariamente la corrida de mayor volumen fue la mejor en cuanto a calidad, se correlacionó con las otras pruebas.

Este clarificado posteriormente fue sometido a todas las pruebas, por lo que se tomaron muestras para todas las determinaciones. El resto de la fracción soluble se reunió en un recipiente de cerrado hermético y se congeló para ser precipitado con un solvente y filtrado.

2.9.2 Luminosidad del clarificado o fracción soluble

Esta determinación se realizó utilizando un colorímetro Marca Minolta Sensor modelo CR-300, interface modelo Dp-30, el cual se muestra en las figuras 2.23 a, 2.23 b y 2.23 c.

La luminosidad de la fracción soluble influye en cómo es que se está llevando a cabo la centrifugación, ya que de acuerdo a la tonalidad de las suspensiones se puede decir si se trató de un proceso eficiente al separar la mayor cantidad de sólidos presentes contenidos en la suspensión.

Las muestras de fracción soluble con valores más altos de luminosidad se van pareciendo a los del agua embotellada (patrón).

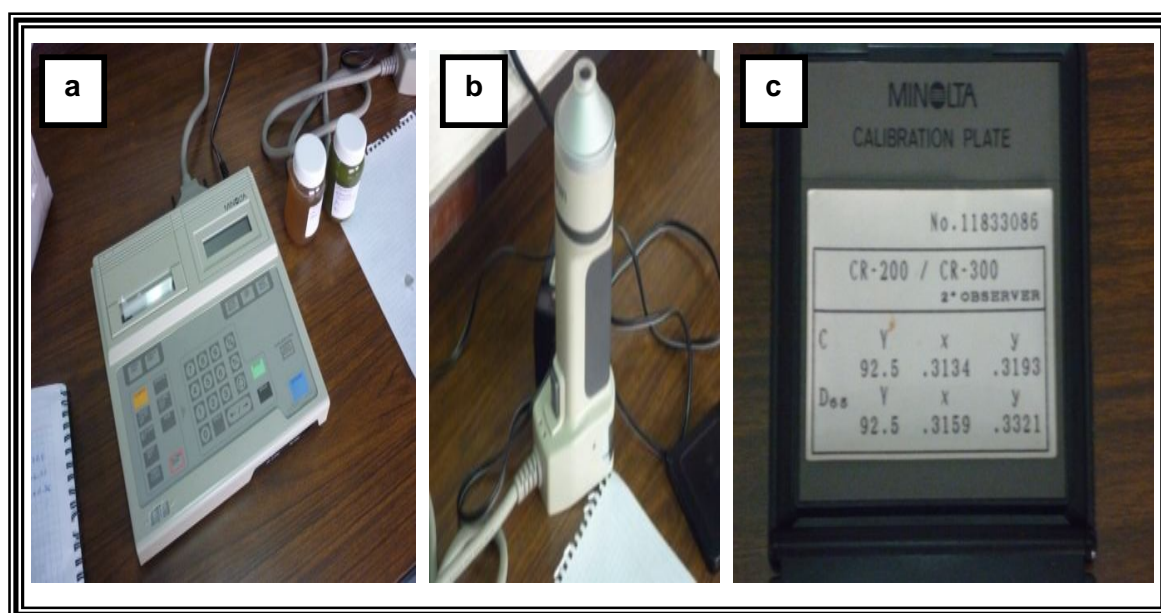


Figura 2.23 a) Colorímetro Minolta; Figura 2.23 b) Sensor; Figura 2.23 c) Interface

El analizador del colorímetro se calibró con un mosaico blanco aplicando los parámetros del integrador y posteriormente se tomó la lectura de agua embotellada que fue el patrón comparativo.

El colorímetro de reflectancia registra la intensidad de luz absorbida por el color negro a la reflejada por el blanco (escala "L"), así como la descomposición de la

luz en los colores básicos: la escala “a” va del rojo al verde y la “b” del amarillo al azul. En un recipiente que no dejará pasar la luz se colocaron 30 mL de clarificado y sobre ese líquido se colocó el brazo del colorímetro, se tomó la lectura de color del clarificado. Por último se evaluó la luminosidad. Cada una de las determinaciones se realizó por triplicado en corridas independientes, pero que corresponden a las mismas condiciones en que se operó la centrífuga.

En las figuras 2.24 a, 2.24 b y 2.24 c se muestran ejemplos de clarificados obtenidos a diferentes condiciones de operación de la centrífuga.

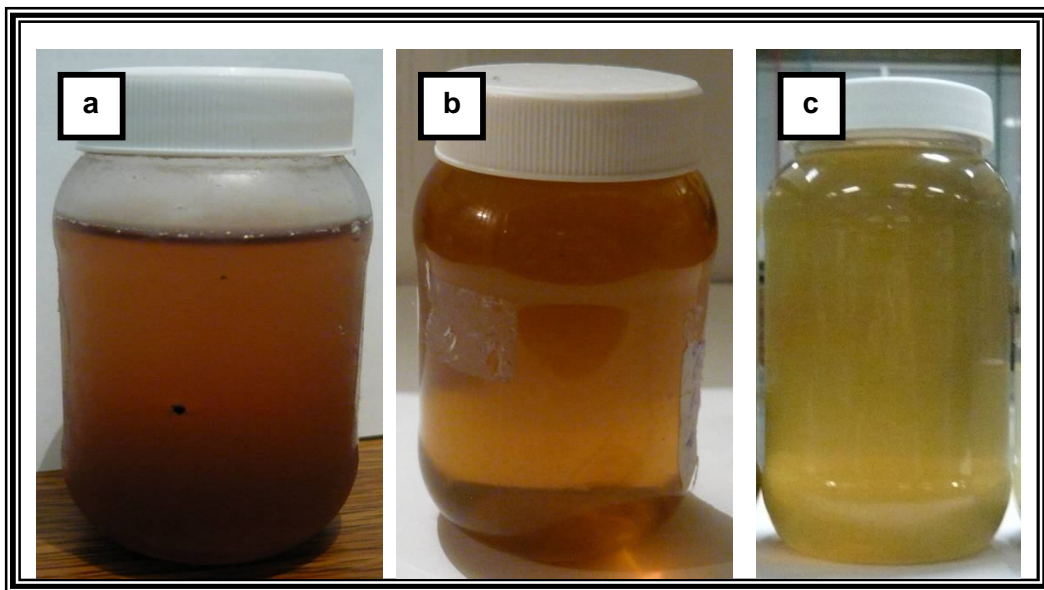


Figura 2.24 a) Clarificado a bajas velocidades de centrifugación; Figura 2.24 b) Clarificado obtenido a velocidades medias de centrifugación; Figura 2.24 c) Clarificado a altas velocidades de centrifugación

Esta prueba se realizó a todos los clarificados obtenidos a las diferentes condiciones tomando como patrón el del agua embotellada con valores de 88 en luminosidad. De manera que los valores cercanos fueron los que presentaron mejores características de calidad, es decir dichos clarificados presentaron menor contaminación con fracción insoluble.

2.9.3 Densidad del clarificado o fracción soluble

La determinación de la densidad de los clarificados, se llevó a cabo por la metodología de diferencia de peso en (g/cm^3).

El procedimiento fue el mismo para todas las muestras y se llevó a cabo por triplicado: probetas de 10 mililitros limpias y secas como se puede ver en la figura 2.25 a, se pusieron a peso constante en una estufa de aire forzado a una temperatura de $50\text{ }^\circ\text{C}$. Se pesaron hasta que su peso no cambio y se conservaron en un desecador hasta su uso.

Las probetas se llenaron hasta donde marcaban 10 mL con la fracción soluble de cada una de las corridas realizadas de acuerdo a lo que muestra la figura 2.25 b. Posteriormente, se pesaron cada una de ellas (ver figura 2.25 c).

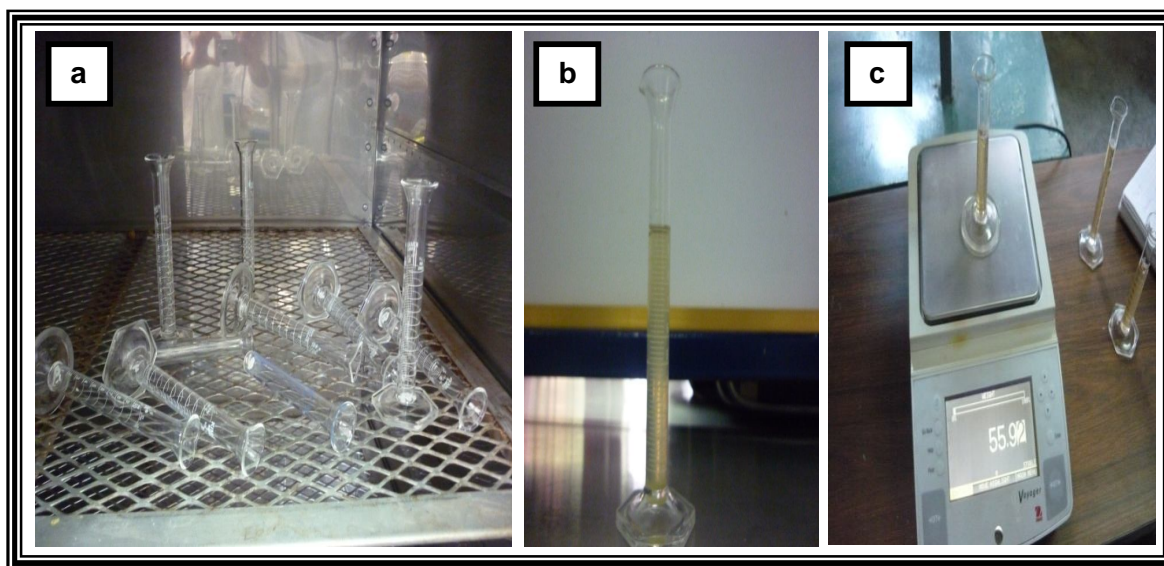


Figura 2.25 a) Probetas a peso cte.; Figura 2.25 b) Llenado de probetas; Figura 2.25 c) Peso de probetas

Al peso obtenido anteriormente, se le resta el peso de la probeta vacía para así poder realizar el cálculo de la densidad respecto a la masa sobre el volumen.

Las fórmulas empleadas para realizar los cálculos necesarios y así obtener la densidad de la fase ligera (clarificado) se muestran a continuación:

Para obtener la masa del clarificado se emplea la siguiente relación:

$$\text{Masa de clarificado} = \text{Masa de probeta con clarificado} - \text{Masa de probeta vacía}$$

Una vez que se tiene la masa del clarificado se procede a calcular la densidad mediante la siguiente ecuación:

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

Donde:

m = masa de clarificado (g)

v = volumen de clarificado (10 mL)

2.9.4 Turbidez del clarificado o fracción soluble

La medición de la turbidez se llevó a cabo con un Turbidímetro marca Hanna Instruments, modelo LP 2000, Carcat. Gral. Precision Bench Turbidity Meter como el que se observa en la figura 2.26.



Figura 2.26 Turbidímetro marca Hanna Instruments, modelo LP 2000

Este equipo sólo tiene la capacidad de medir hasta 70 NTU (Unidad Nefelométrica de Turbidez).

Se prepararon diluciones midiendo 5 mL de muestra de fracción soluble de nopal con ayuda de una pipeta volumétrica; dicha muestra se colocó dentro de un matraz aforado de 50 mL y se aforó con agua embotellada (relación 1:10). La dilución se vació en un vaso de precipitados de 100 mL; dicho procedimiento se llevó a cabo por triplicado para cada una de las fracciones solubles obtenidas a las diferentes condiciones de trabajo, como se muestra en la figura 2.27.

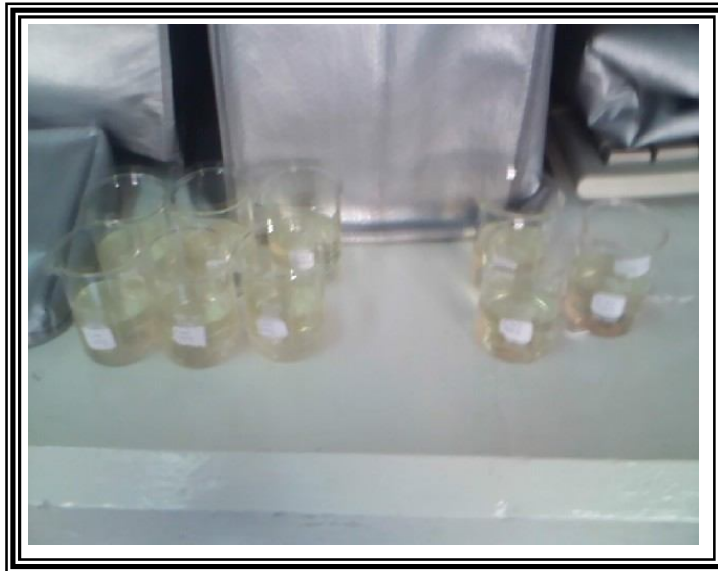


Figura 2.27 Disoluciones de fracciones solubles a diferentes condiciones de trabajo

Posteriormente se procedió a encender el turbidímetro el cual se calibró con agua embotellada una vez antes de comenzar las pruebas con las muestras a evaluar, la celda de cuarzo se tomó con tela de seda y con la ayuda de una piseta se llenó de agua, se cerró el tubo y se introdujo en el turbidímetro haciendo coincidir la marca del tubo con la marca de éste, se oprimió el botón “read” esperando que en la pantalla aparecieran las letras SIP y se tomó la lectura.

Una vez calibrado el equipo, la muestra se agitó previamente con un agitador de vidrio y se vació a la celda hasta llegar a la marca, procurando siempre sostenerla con tela de seda para evitar ensuciarla y alterar los resultados. Dicho procedimiento se puede ver en la figura 2.28 a.

Después de llenar la celda con la muestra, se cerró y se procedió a introducir la misma en el turbidímetro haciendo coincidir la marca de la celda con la del equipo como se ve en la figura 2.28 b.

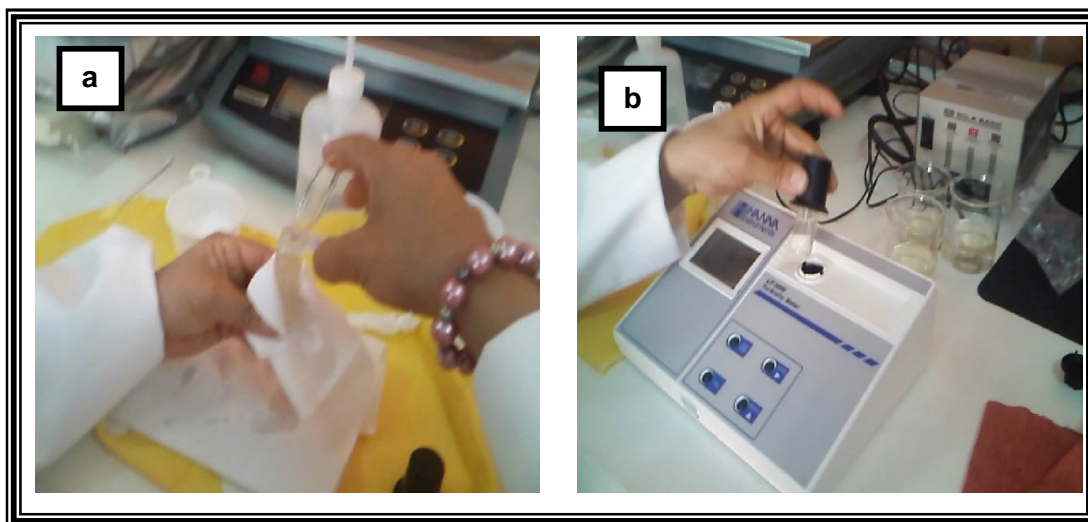


Figura 2.28 a) Llenado de la celda de cuarzo con muestra; Figura 2.28 b) Introducción de la celda con muestra en el turbidímetro

Inmediatamente se oprimió el botón “read” y se esperó a que aparecieran en la pantalla las letras SIP como se muestra en las figuras 2.29 a y b.

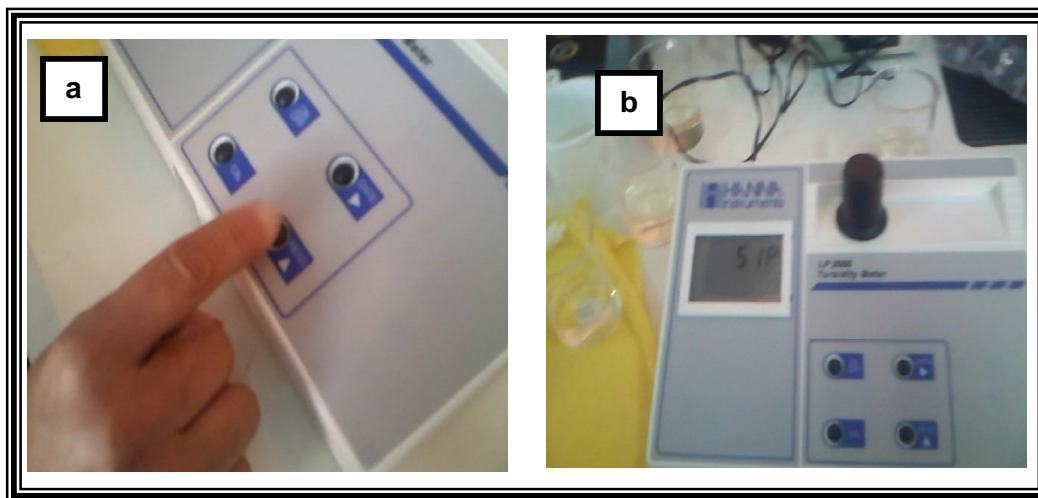


Figura 2.29 a) Botón “read”; Figura 2.29 b) Pantalla de turbidímetro con las letras SIP.

Como se ve en la figura 2.29 b se tiene que esperar a que aparezcan las letras SIP para posteriormente tomar la lectura de turbidez de la muestra.

Después de que aparecen las letras SIP, el equipo da la lectura de turbidez de la muestra como se aprecia en la figura 2.30 a. Al finalizar cada una de las pruebas, con ayuda de una piseta se enjuagó la celda con agua embotellada como se ve en la figura 2.30 b.

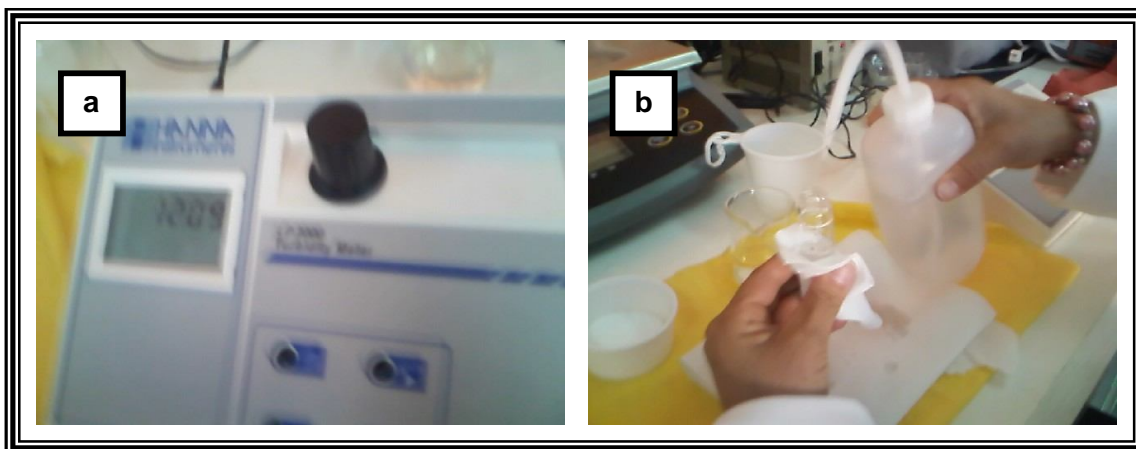


Figura 2.30 a) Pantalla de turbidímetro con lectura de turbidez; Figura 2.30 b) Enjuague de la celda de cuarzo

El procedimiento anteriormente descrito se llevó a cabo para cada una de las diferentes mediciones de turbidez en las diferentes diluciones preparadas, y se comparó con el de referencia que es la del agua embotellada que es de 0.01 NTU.

2.9.5 Sólidos totales del clarificado o fracción soluble

La prueba de sólidos totales se realizó por un método indirecto. Se utilizó la determinación de humedad de la AOAC, 2000. Al eliminar la humedad quedan los sólidos totales presentes en el clarificado después de la centrifugación, los cuales se expresan en g. Se hicieron charolas de aluminio, se pesaron, se pusieron previamente a peso constante en una estufa a 50 °C de acuerdo a la figura 2.31.

Se colocaron 10 mL de muestra de clarificado o fracción soluble y se secaron en una estufa de aire forzado Marca BG Didacta Italia modelo E102, hasta que éstas alcanzaron peso constante.

Con ayuda de unas pinzas se fueron sacando de la estufa. Se dejaron enfriar y se colocaron dentro de un desecador, las charolas se pesaron y los valores se utilizaron para los cálculos de los sólidos totales presentes en el clarificado.

La fórmula que se aplicó para las determinaciones fue la siguiente:

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

Dónde:

$PCCl_f$ = Peso de la Charola con Clarificado fresco (g)

$PCCl_s$ = Peso de la Charola con Clarificado seco (g)

PC = Peso de la Charola (g)

gM = gramos de Muestra (g)



Figura 2.31 Charolas con muestra de clarificado

Al llevarse a cabo cada una de las corridas experimentales en la centrífuga y después de realizar las pruebas mencionadas anteriormente a cada uno de los clarificados obtenidos, se procedió a guardarlos en frascos etiquetados en la cámara de congelación la cual se encontraba a $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y se dejaron dentro durante 24 horas.

Una vez pasado el tiempo de congelación se sacaron los frascos de dicha cámara y se dejaron a temperatura ambiente (25 °C aprox.) para que se descongelara el clarificado. Dicho procedimiento se llevó a cabo después de obtener cada corrida experimental o una serie de corridas experimentales.

Los clarificados se dejaron descongelar fuera de la cámara de congelación a temperatura ambiente (25 °C aprox.) y se puede ver cómo es que el mucílago se va precipitando en el fondo del frasco aparece sedimentado (ver figura 2.32). Esto ocurre porque el agua se congeló y quedó en la parte superior del recipiente, mientras que los sólidos precipitaron, al descongelarse así quedaron los sólidos en el fondo del recipiente.

Una vez que la muestra tiene una temperatura ambiente se procedió a realizar el precipitado del mucílago con etanol.



Figura 2.32 Mucílago precipitado por congelación

En la figura 2.32 el mucílago se precipita en el fondo del frasco y se observa como una arena fina de color café claro.

2.9.6 Precipitación del mucílago (rendimiento)

El rendimiento de mucílago es la cantidad de mucílago seco en miligramos por gramo de nopal utilizado. A cada litro de clarificado se adicionaron 2 litros de etanol desnaturalizado con grado de pureza de 96 % (relación 1:2) (Figura 2.33). En esta figura, todo el mucílago se separó del agua y se formó un conglomerado, el cual se muestra dentro del círculo.

El etanol se empleó para ayudar a que precipitara el mucílago que se encontraba en el clarificado aparte del ya precipitado después de la congelación. Al romperse los enlaces con el agua, el mucílago formó una red y se concentró todo junto, lo que facilitó su extracción por otro método de separación. La cantidad de agua-alcohol se eliminó del frasco que contiene la muestra y se procedió a efectuar una filtración a vacío en un embudo Büchner y un matraz quitazato a 30 mmHg para eliminar el exceso de agua. El mucílago tiene un color café como se aprecia en la figura 2.33 y la solución de agua-etanol se observa un color café más claro.



Figura 2.33 Precipitación de mucílago con etanol

El agua se eliminó y el mucílago se filtró como muestran las figuras 2.34. Se conectó el sistema de vacío que incluye el vacuómetro hacia la tubería de vacío y la otra manguera al matraz quitazato, se colocó un embudo Büchner en el matraz y dentro del embudo un papel filtro seco y a peso constante. Se registró su peso figura 2.34 a.

Ya que se conectaron los dispositivos para la filtración se procedió a abrir la válvula de la tubería de vacío y cerrar la válvula de paso de vacío que se encuentra en el vacuómetro hasta llegar a una presión de 30 mmHg, la cual se debe de mantener constante durante todo el procedimiento.

Una vez que se encontró a dicha presión, se fue vaciando el contenido del frasco hacia el embudo en pequeñas cantidades como se aprecia en la figura 2.34 b. Cuando en el frasco hubo poca cantidad de clarificado se vació todo el contenido, dejando que fuera cayendo el agua de la solución hacia el matraz hasta que solo quedó mucílago en el papel filtro como se aprecia en la figura 2.34 c.

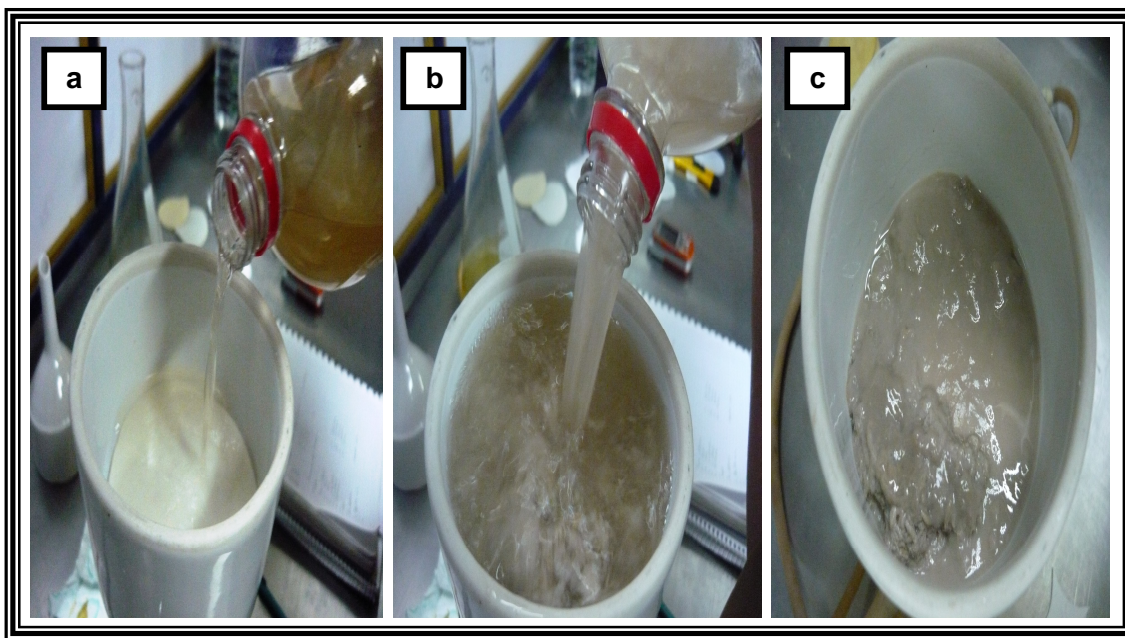


Figura 2.34 a) Vaciado de suspensión; Figura 2.34 b) Vaciado de suspensión con mucílago; Figura 2.34 c) Mucílago de nopal deshidratado

Todo el líquido se dejó drenar, dejando el mucílago en el embudo hasta que escurriera toda la solución agua-alcohol. El tiempo total de la filtración fue de aproximadamente 5 minutos para cada prueba. Cabe mencionar que la cantidad de líquido obtenido fue distinto en cada una de las diferentes condiciones de centrifugación trabajadas.

En la figura 2.35 se muestra todo el sistema de vacío para filtración de mucílago y la prueba terminada.



Figura 2.35 Filtración del mucílago de nopal

Después de la filtración el mucílago se separó del papel y se colocó en charolas para llevar a cabo el deshidratado

El mucílago obtenido se deshidrató a 80 kPa, 40 °C en una estufa de vacío, Marca Barnstead International, modelo 3618, durante 35 minutos, hasta llegar a una humedad del 4 %. Una vez seco el mucílago se pesó en una balanza analítica Marca Ohaus, modelo VOB 120, para obtener la cantidad de miligramos de mucílago deshidratado por muestra. Con los resultados de polvo de nopal deshidratado y mucílago de nopal obtenido se calculó el rendimiento (miligramos de mucílago / gramo de polvo de nopal x 100).

2.9.7 Tiempo de residencia

Adicionalmente se determinó el tiempo de residencia de la muestra dentro de la centrífuga. Este se obtuvo desde que entró la primera gota de muestra a la centrífuga, hasta que salió la última gota de clarificado.

Este tiempo se cuantificó con un cronómetro digital para cada una de las corridas experimentales y se correlacionó con el rendimiento.

2.10 Análisis estadístico

El análisis que se aplicó a los datos obtenidos fue un factorial 3^3 con tres factores y tres niveles para conocer cuál de ellos tiene mayor influencia y las interacciones entre ellos, dicho análisis se llevó a cabo en el programa estadístico MINITAB 14.

A continuación en el cuadro 2.3 se presenta el resumen del diseño factorial multinivel que da el programa estadístico MINITAB.

Factores: 3	Replicas: 3
Corridas base: 27	Total de corridas: 81
Bloques base: 1	Total de bloques: 1
Número de niveles: 3; 3; 3	

Fuente: (MINITAB 14®)

En el cuadro 2.3, se presenta el arreglo de los niveles de variación y variables. El arreglo se da como un número de serie, en donde el primer número indica la velocidad de giro, el segundo la velocidad de alimentación y el tercer dígito la altura de tornillo. La letra S al inicio indica la palabra serie.

En éste cuadro se muestra el arreglo solamente de las combinaciones entre todos los factores con sus diferentes niveles cada uno, es decir las corridas base, aunque el total de corridas fue de 81.

Cuadro 2.3 Variables y niveles para la centrifugación

Nombre de la serie	Velocidad de giro (rpm)	Velocidad de alimentación (mL/min)	Altura de tornillos de gravedad (mm)
S320	3000	200	0
S340	3000	400	0
S360	3000	600	0
S322	3000	200	2
S342	3000	400	2
S362	3000	600	2
S324	3000	200	4
S344	3000	400	4
S364	3000	600	4
S420	4000	200	0
S440	4000	400	0
S460	4000	600	0
S422	4000	200	2
S442	4000	400	2
S444	4000	600	2
S424	4000	200	4
S444	4000	400	4
S464	4000	600	4
S520	5000	200	0
S540	5000	400	0
S560	5000	600	0
S522	5000	200	2
S542	5000	400	2
S562	5000	600	2
S524	5000	200	4
S544	5000	400	4
S564	5000	600	4

Nótese que son tres variables o factores con tres niveles cada una de ellas que se trabajaron experimentalmente.

Actividades objetivo particular 2

2.11 Determinación de viscosidad aparente del mucílago de nopal

Para la determinación de la viscosidad que genera el mucílago de nopal, se prepararon disoluciones a diferentes concentraciones, eligiendo el mucílago obtenido a las mejores condiciones de proceso, calidad y rendimiento.

Se llevaron a cabo disoluciones al 1.0, 1.5, 2.0 y 2.5% peso/volumen de mucílago de nopal deshidratado, por triplicado.

En una balanza analítica marca SCIENTECH, modelo SP 250, se procedió a pesar la cantidad necesaria en gramos de mucílago en charolas de plástico especiales y con ayuda de una espátula, como se puede apreciar en la figura 2.36.

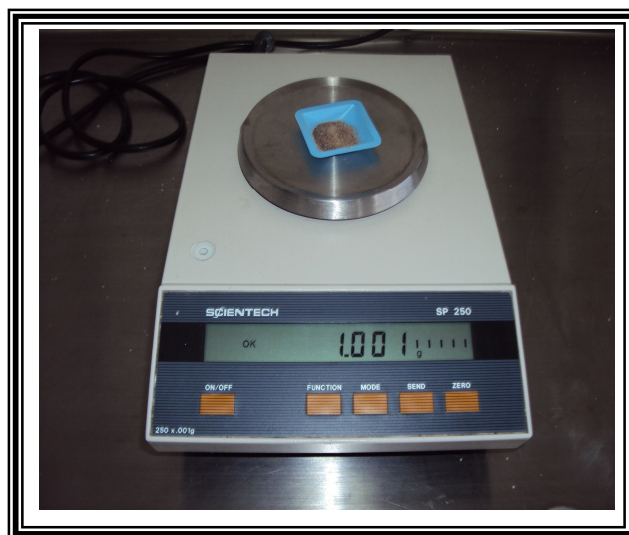


Figura 2.36 Mucílago de nopal deshidratado

En una probeta de vidrio con capacidad de 100 mL, se midió el agua embotellada necesaria para la preparación de la disolución.

El agua se vació a un vaso de precipitados de 250 mL el cual se colocó sobre una parrilla eléctrica y se calentó a 35 °C, como se puede observar en la figura 2.37.

Dentro del vaso se colocó también un agitador magnético, para llevar a cabo la agitación de la disolución.

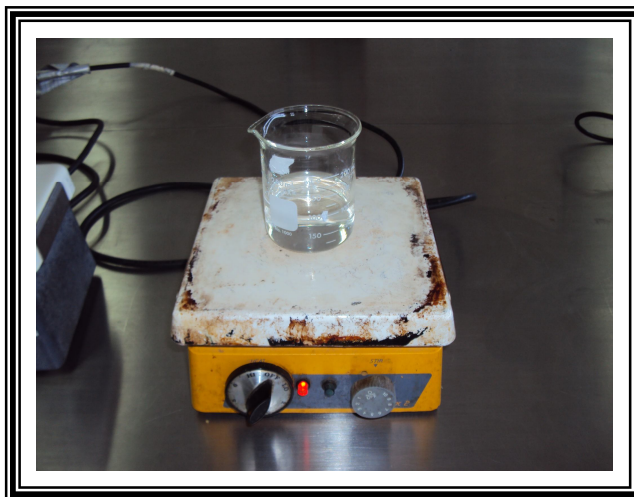


Figura 2.37 Calentamiento de agua a 35°C

Al llegar a la temperatura indicada se apagó la parrilla eléctrica y en este caso el vaso de precipitados se pasó a una parrilla con agitación marca CORNING STIRRER modelo PC-353, como se aprecia en la figura 2.38.

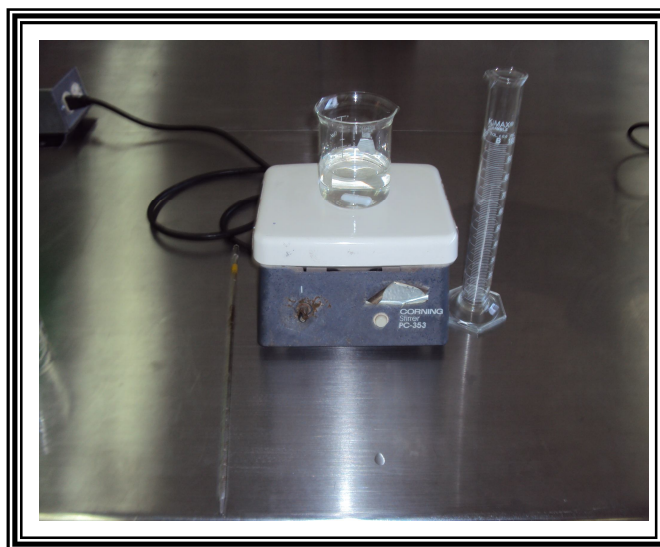


Figura 2.38 Parrilla con agitación marca CORNING STIRRER modelo PC-353

En la figura 2.38, el vaso contiene el agua así como el magneto para poder preparar la disolución, además de que se muestra la probeta y una pipeta de 1mL empleadas para medir la cantidad de agua necesaria para este fin.

Se encendió la parrilla y a una velocidad media de agitación se fue vaciando poco a poco el mucílago hacia el vaso, con la ayuda de una espátula, para que se fuera dispersando en el agua, además de evitar la formación de grumos, como se observa en las figuras 2.39 a y b.

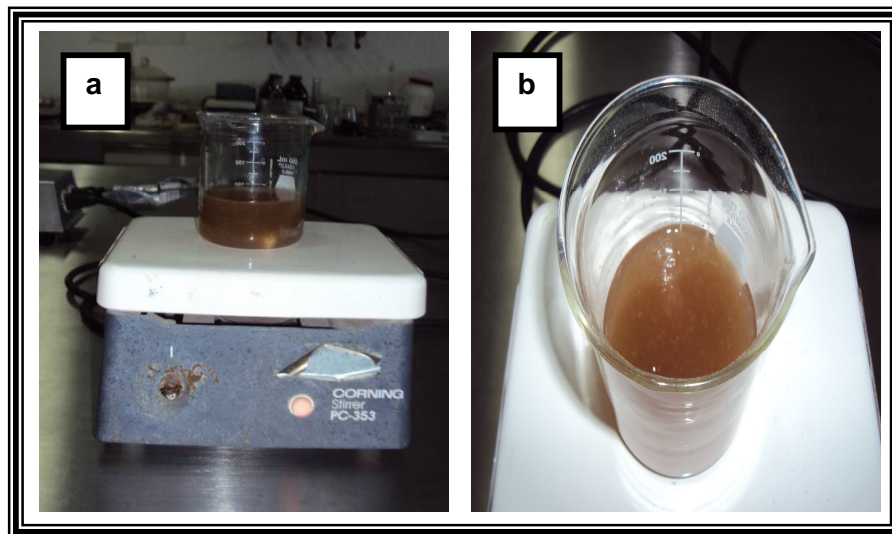


Figura 2.39 a) Preparación de disolución de mucílago de nopal; Figura 2.39 b) Agitación de la disolución

En la figura 2.39 a se puede observar que la disolución está en constante agitación y en la figura 2.39 b se aprecia el mucílago disuelto en agua.

Se mantuvo la agitación constante hasta haber vaciado todo el polvo y durante 45 minutos aproximadamente hasta que se diluyó por completo, así se prepararon cada una de las disoluciones a las diferentes concentraciones.

Posteriormente, se dejó enfriar la disolución hasta llegar a una temperatura ambiente (25 °C) para así poder determinar los parámetros reológicos (n y K) y conocer su comportamiento reológico.

La determinación del comportamiento reológico se llevó a cabo en un viscosímetro con geometría de Cilindros Concéntricos Marca Rheomat modelo METTLER RM180 como el que se muestra en la figura 2.40.



Figura 2.40 Viscosímetro de Cilindros Concéntricos Marca Rheomat modelo METTLER RM180

En la figura 2.40, se muestra el instrumento de medición, que es en donde se adaptaron las geometrías a utilizar. Cada mucílago fue preparado a diferente concentración por triplicado con la misma metodología y fueron corridas a diferente velocidad de cizalla en un intervalo de 64.6 a 600 s^{-1} .

Estos datos fueron utilizados para realizar las gráficas de esfuerzo de corte (Pa), en función de la velocidad de cizalla (s^{-1}) y viscosidad aparente (Pa.s) en función de la velocidad de cizalla (s^{-1}), también llamados reogramas.

La pantalla del instrumento de medición Viscosímetro de Cilindros Concéntricos es digital y muestra los siguientes datos: La temperatura de la muestra T en $^{\circ}C$, el par o torque M en $m \cdot mN$, la tasa de corte D en s^{-1} , el esfuerzo cortante t (tau) en Pa, la viscosidad η calculada (eta) en Pa \cdot s, el sistema de medición, en nuestro caso, 11, dicha pantalla se puede apreciar en la figura 2.41.

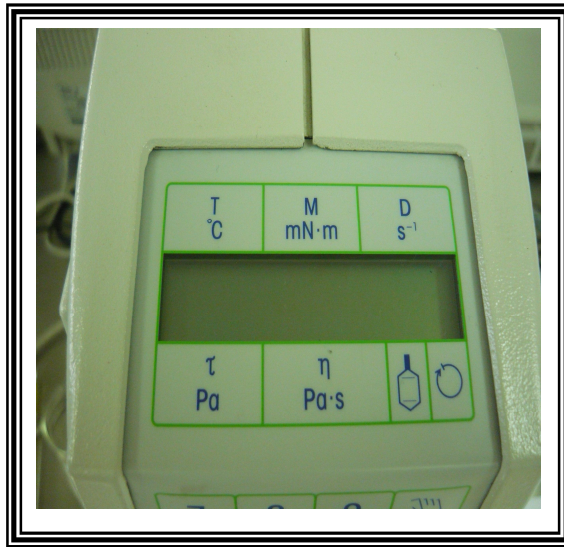


Figura 2.41 Pantalla del instrumento de medición

Como se puede ver en la figura anterior es en dicha pantalla donde se observaron los resultados que detectó el equipo para cada uno de los parámetros de acuerdo a la dispersión que se esté analizando. Igualmente, éste viscosímetro cuenta con sensores cuyo diseño se ajusta al estándar Alemán (DIN) desarrollado por el Instituto Alemán para la estandarización, los cuales se muestran en la figura 2.42.

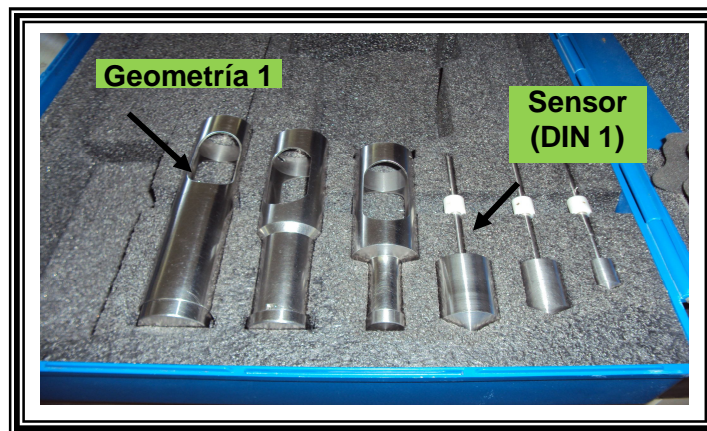


Figura 2.42 Cilindros y sensores (DIN)

Como se aprecia en la figura 2.42 son tres geometrías diferentes con las que cuenta dicho equipo, pero para éste caso se ocuparon únicamente la geometría 1 y el DIN 1, señalados en la misma.

Para comenzar con la determinación de los parámetros reológicos se procedió a adaptar el sensor (DIN 1) a la base del viscosímetro (el cual es el cilindro giratorio) como se aprecia en la figura 2.43 a.

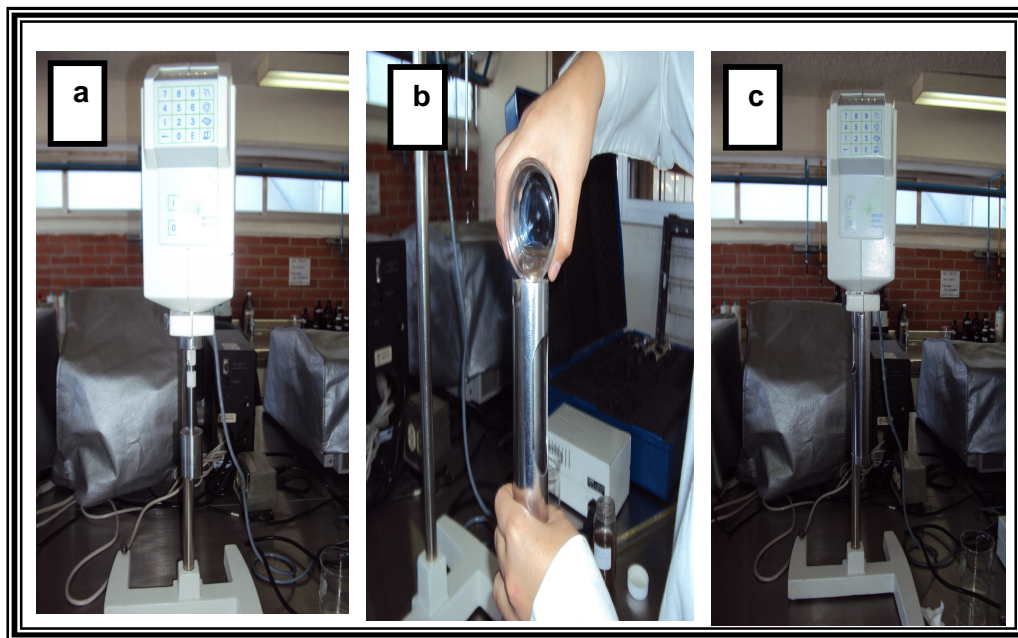


Figura 2.43 a) Adaptación del sensor; Figura 2.43 b) Llenado del cilindro fijo; Figura 2.43 c) Adaptación del cilindro al viscosímetro

Posteriormente se midieron 100 mL de la disolución en un vaso de precipitados de dicho volumen y se procedió a vaciar la muestra dentro del cilindro que va fijo (geometría 1), el cual se llenó hasta su marca procurando que la muestra resbalará por la pared de dicho cilindro como se ve en la figura 2.43 b. Una vez lleno se colocó en el viscosímetro quedando dentro el DIN 1 y se apretó para poder llevar a cabo la determinación como en la figura 2.43 c.

El equipo se encendió y se presionaron las condiciones a las que se requería que trabajara, las cuales fueron: tipo de medida (rotacional), el sistema de medida 1-1 y el número de programa 1, tomando en cuenta que este programa trabaja a velocidades que van de 64.6 a 1291 s^{-1} ; se planteó que el equipo trabajara en un rango de velocidades de 64.6 a 600 s^{-1} .

Una vez que se determinaron las condiciones requeridas, se indica que comience a trabajar, el sensor va girando y en la pantalla van apareciendo los datos como se aprecia en la figura 2.44, los cuales son anotados en una tabla. Para construir las gráficas correspondientes.



Figura 2.44 Resultados en la pantalla del dispositivo de medición

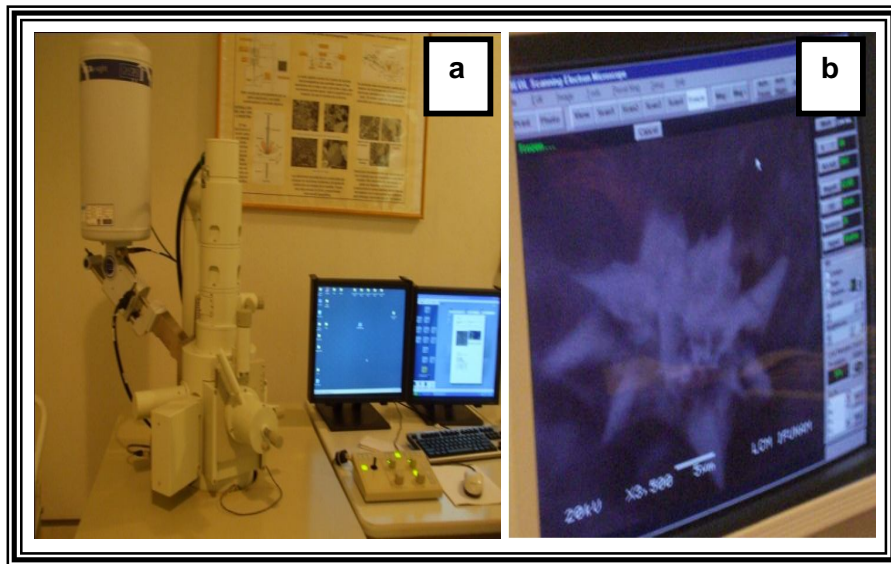
Cuando dio todas las lecturas de velocidad de cizalla y esfuerzo de corte que registró el equipo para cada una de las disoluciones, éste se apagó y se desmontó cuidando no golpear los dispositivos, se enjuagaron y se secaron para poder realizar otra determinación.

Dicho procedimiento se llevó a cabo por triplicado para cada una de las disoluciones elaboradas a diferentes concentraciones.

Actividades objetivo particular 3

2.12 Caracterización de la morfología e identificación de sales de calcio de suspensión, fracción soluble, fracción insoluble y mucílago de nopal mediante Microscopía Electrónica de Barrido (SEM-AV)

La microscopía electrónica de barrido, se llevó a cabo mediante un microscopio electrónico de barrido como se muestra en la figura 2.45 a, el cual utiliza un cañón de electrones de alta energía que sistemáticamente barre la superficie de la muestra a alto vacío; la interacción del cañón con la superficie de la muestra produce gran cantidad de señales, en que se incluyen electrones de alta energía y electrones secundarios. La alta energía de los electrones secundarios hace conveniente la colección de la señal por el barrido en el sistema detector.



**Figura 2.45 a) Microscopio electrónico de barrido;
Figura 2.45 b) Pantalla de transmisión**

La señal del electrón es convertida a señal electrónica y es proyectada a un tubo de rayos catódicos y pasada a un foto multiplicador. La imagen es transmitida a través de una cámara tipo televisión, como se muestra en la figura 2.45 b, en donde se logra observar una imagen de la superficie de la muestra con profundidad del campo (Arenas, 1999).

Se realizaron análisis de microscopía electrónica de barrido a las diferentes fases; suspensión, fracción soluble, fracción insoluble y al mucílago obtenido a las mejores condiciones, esto permitió conocer su morfología e identificar las sales de calcio presentes en cada una de ellas.

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 fuera continua dentro del microscopio (Arenas, 1999), como se aprecia en la figura 2.46 a, y se dejaron secar a temperatura ambiente. Posteriormente, se procedió a dar un baño de oro a dichas muestras, como se puede observar en la figura 2.46 b.

Las muestras ya con baño de oro, se montaron en un porta muestras de aluminio para cuatro unidades como el de la figura 2.46 c y se ajustaron los porta muestras en el soporte del microscopio como se ve en la figura 2.46 d.

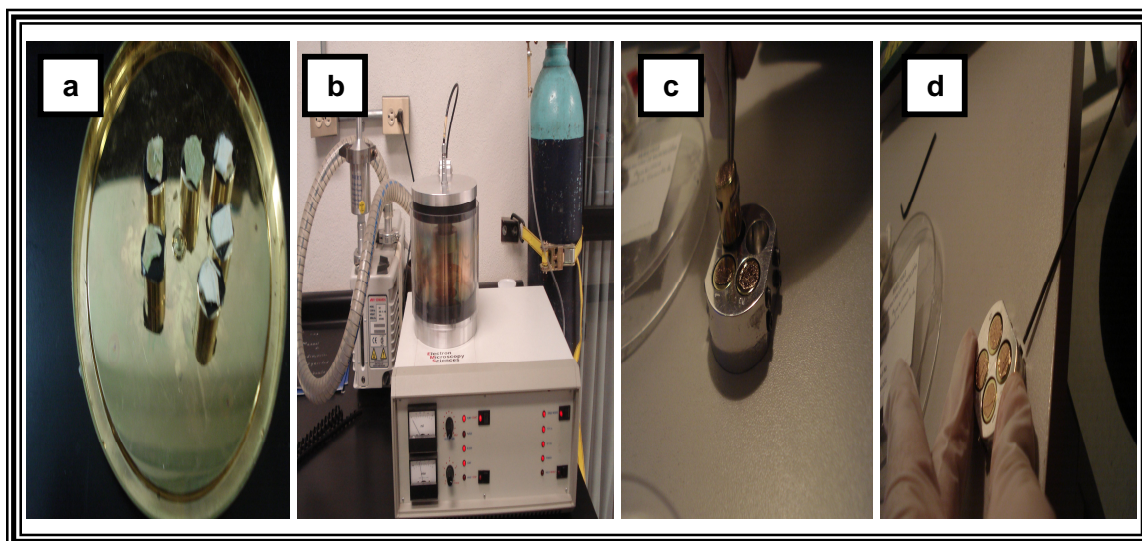


Figura 2.46 a) Portamuestras de bronce; 2.46 b) Baño de oro; 2.46 c) Cuatro muestras montadas; 2.46 d) Ajustando los portamuestras al soporte

El soporte con el porta muestra se introdujo en el microscopio electrónico de barrido a alto vacío (JEOL, modelo JSU-5600 (ver figura 2.47 a).

El microscopio electrónico de barrido se cerró como muestra la figura 2.47 b con la finalidad de obtener las micrografías de las muestras a diferentes ampliaciones de acuerdo a lo que se puede apreciar en la figura 2.47 c y 2.47 d.

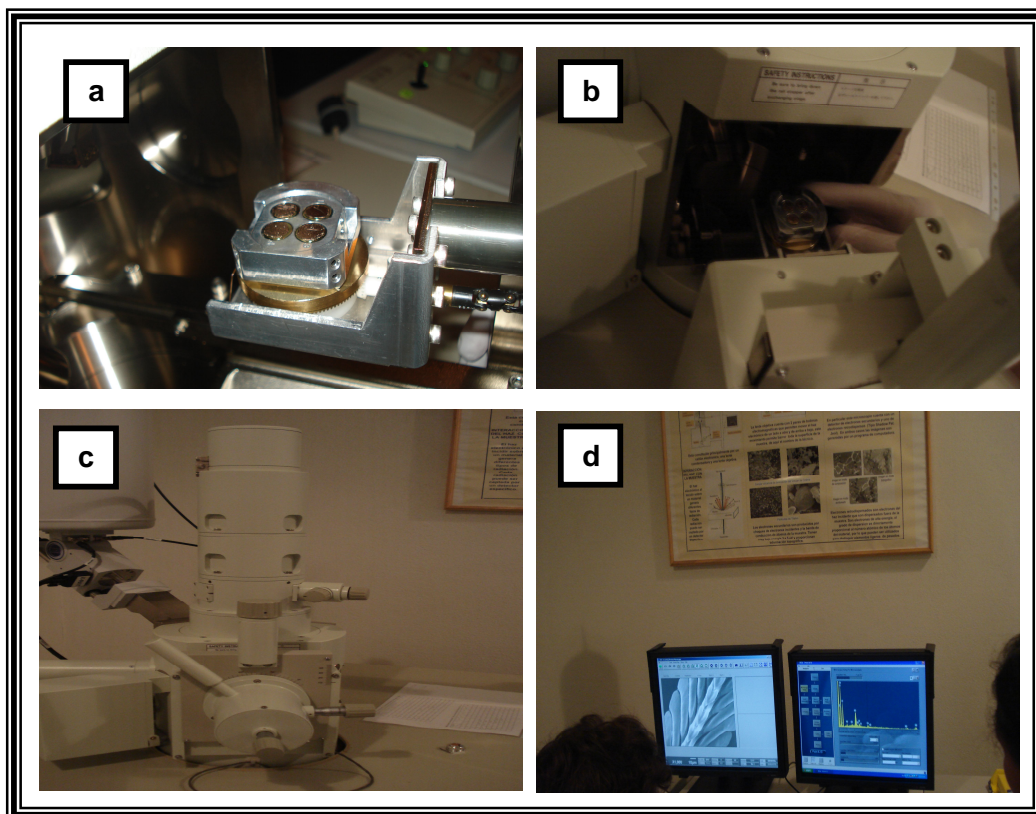


Figura 2.47 a) Soporte con muestras de nopal; 2.47 b) Muestras dentro del microscopio; 2.47 c) Microscopio electrónico; 2.47 d) Obteniendo micrografías

La muestra que se desea observar se enfoca, cambiando los aumentos a decisión del operario. No necesariamente el mayor aumento es el que proporciona la mejor imagen, ya que algunos la distorsionan. El barrido se realiza de manera muy lenta sobre la superficie de las muestras.

Dicho procedimiento se llevó a cabo para cada una de las diferentes muestras y por cada una de ellas se obtuvieron la mayor cantidad de micrografías posibles tanto para conocer su morfología como para identificar que sales de calcio son las que se encuentran presentes en las diferentes fases obtenidas.

Las condiciones de trabajo con las que se operó el microscopio fueron; voltaje de aceleración electrónica 20 kV, con una presión en el rango de 237.72–396.20 kg_f/m² en la cámara de la muestra, las imágenes se obtuvieron en la superficie a partir de la señal electrónica de barrido a alto vacío.

2.13 Cuantificación de la concentración de calcio por Espectrofotometría de Absorción Atómica

La cuantificación de la concentración de calcio se llevó a cabo por la técnica de espectrofotometría de absorción atómica para muestras de suspensión, fracción soluble, fracción insoluble y mucílago de nopal, mediante un espectrofotómetro de absorción atómica de doble haz (Analyst 300, Perkin Elmer, USA) equipado con una lámpara de deuterio de cátodo hueco con corrector de trasfondo como el que muestra la figura 2.48.

Las determinaciones se realizaron por triplicado para todas las unidades experimentales de acuerdo a la metodología de la AOAC (2000).

Para determinar el analito en la muestra fue necesario proporcionarle energía a los átomos y subir de nivel a los electrones, lo que se llevó a cabo en el equipo, utilizando una lámpara de cátodo hueco que debe ser del analito que se analizó, en este caso fue calcio.

En este nivel, los electrones están en un estado excitado con muy poca estabilidad, tratando de regresar a su nivel original. Los electrones en un átomo en estado basal absorben un cuanto de energía, es decir, tienen una transición de un nivel de baja energía, a uno de alta energía; cuando el electrón regresa al estado base hay emisión de luz.

Se genera una serie de líneas a longitudes de onda bien determinadas a la cual se le conoce como espectro, que es detectado por un espectrofotómetro y que es específica para cada uno de los elementos.

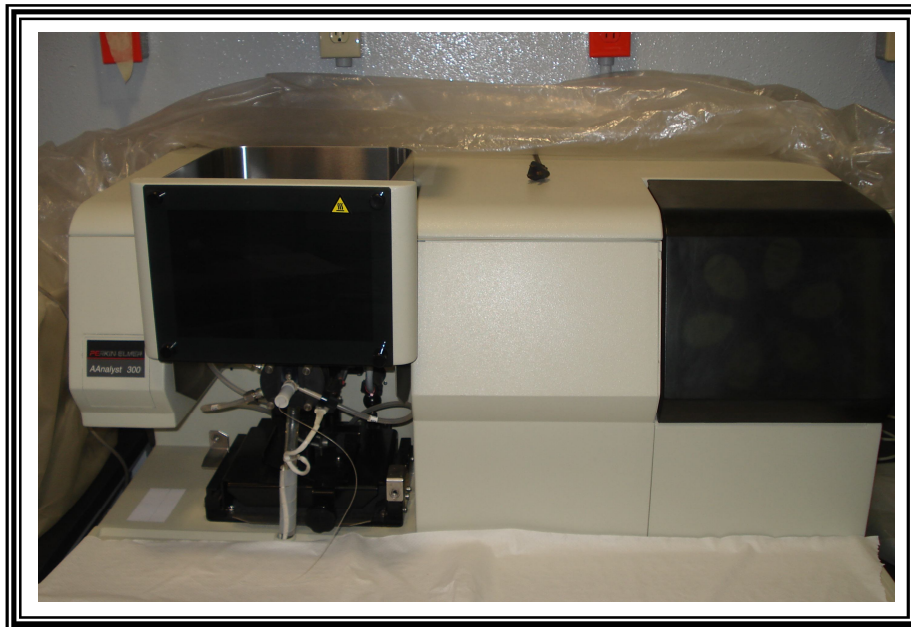


Figura 2.48 Espectrofotómetro de absorción atómica de doble haz (Analyst 300, Perkin Elmer, USA)

En una balanza analítica Marca Ohaus, se pesaron 0.25 g de la muestra en los vasos de teflón (CEM, modelo, PFA-LV), agregando 10 mL de ácido nítrico dentro de una campana de extracción, hasta que las muestras dejaron de hacer burbujas y fueron transparentes. Se taparon y se sellaron herméticamente. A fin de continuar con la digestión, se colocaron los vasos de teflón dentro del carrusel y se introdujeron al horno de microondas (CEM, modelo MDS 81D) como muestran las figuras 2.49 a) el digestor o microondas y 2.49 b) los vasos del digestor, el cual se programó a tres rampas de calentamiento: la primera, desde la temperatura ambiente hasta 130 °C que tardó 4.30 minutos, la segunda desde 130 °C, hasta 150 °C en un tiempo de 4.0 minutos y la última de 150 a 175 °C en 4.0 minutos, ésta, manteniendo la temperatura constante durante un tiempo de 15 minutos (Rodríguez-García *et al.*, 2007).

Al término de estas rampas se dejaron las muestras dentro del digestor hasta que se enfriaron y posteriormente se sacaron del digestor. Todo el carrusel se colocó dentro de una campana de extracción de gases por dos horas hasta que se destaparon todos los vasos.

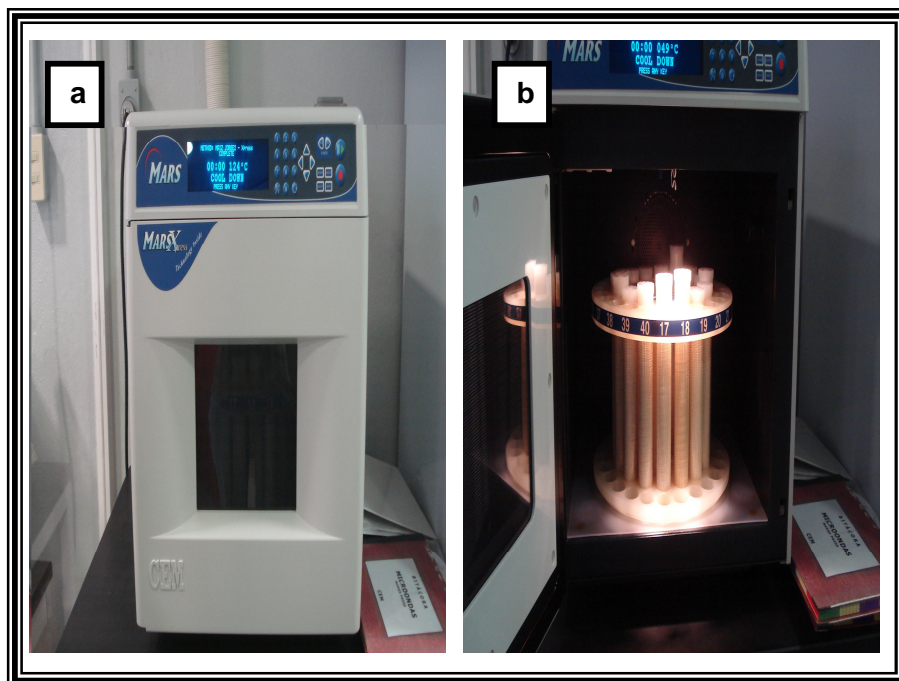


Figura 2.49 a) Digestor de microondas; Figura 2.49 b) Carrusel con vasos

Una vez frías las muestras se filtraron y se les adicionaron 1 mL de óxido de lantano, se aforó a 100 mL con agua tridestilada. También se preparó la curva patrón con el estándar de calcio para calibrar el equipo y para leer. La lámpara de cátodo hueco para leer Ca se colocó en el equipo, la lectura se realizó con las muestras previamente diluidas, y se colocaron en un vaso de precipitado para introducir 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, se eligió una longitud de onda de 422.7 nm característica del calcio, el porcentaje de absorción registrado por el detector fue una medida de la concentración del elemento de la muestra. 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, se obtuvo el porcentaje de calcio fijado para cada muestra.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 Resultados de las actividades preliminares

- **Recolección de cladodios de nopal**

Se recolectaron 100 kg de cladodios de nopal con pesos de 400g, 100 días de estadio de maduración. Aproximadamente 250 nopales fueron pesados. Los resultados se reportan en el cuadro 3.1.

Cuadro 3.1 Pesos de nopales recolectados de 100 días de maduración

Peso (g)	405.96 g \pm 1.25
-----------------	---------------------

Los valores representan el promedio \pm la desviación estándar, (n=250)

En el cuadro 3.1 se reporta el promedio y la desviación estándar de los nopales utilizados para la extracción de mucílago. Esta actividad se realizó para asegurar la homogeneidad de las unidades experimentales.

3.2 Caracterización física de la materia prima

En el cuadro 3.2 se reportan las dimensiones de los cladodios de 400g, además del promedio y la desviación estándar de las dimensiones de los nopales recolectados.

Cuadro 3.2 Dimensiones de los cladodios de nopal

Dimensiones (cm)	Promedio
Largo	21.89 cm \pm 1.45
Ancho	13.49 cm \pm 0.44
Espesor	1.21 cm \pm 1.07

Los valores representan el promedio \pm la desviación estándar, (n=250)

3.2.1 Limpieza y desespinado de los cladodios de nopal

Al retirar las espinas y la corona de los cladodios, éstos se pesaron nuevamente, se retiran alrededor de 17g por unidad.

3.3 Determinación de concentración de humedad en pulpa de nopal fresco

De la pulpa de nopal molida de nopales frescos, se estableció la concentración de sólidos totales por una prueba indirecta con el método de la humedad. En el cuadro 3.3 se muestran los valores obtenidos.

Cuadro 3.3 Contenido de sólidos totales de cladodios de nopal frescos

Sólidos Totales (g)
4.02
3.99
3.98
4.02
4.00
Promedio 4.00 ± 0.04

Los valores representan el promedio \pm la desviación estándar, (n=5)

Este valor 4.00 ± 0.04 g de sólidos totales en el nopal fresco, sirvió para preparar la suspensión de nopal deshidratado en base a la cantidad de sólidos.

3.4 Determinación de tamaño de partícula por microscopía electrónica de barrido (SEM- AV)

El tamaño de partícula del puré de nopal fresco se obtuvo por medio de un Microscopio Electrónico de Barrido, tomando imágenes de diferentes puntos de la muestra, en total se tomó un promedio de 60 puntos. Los datos obtenidos sirvieron para igualar el tamaño de partícula del cladodio deshidratado que se utilizó para la elaboración de la suspensión de polvo de nopal. Éste valor entra dentro de lo establecido para alimentar la centrífuga de discos que va de 0.5 – 500 μm . En promedio el tamaño de partícula del nopal fresco es de 250 μm .

3.5 Deshidratado de cladodios de nopal

En el cuadro 3.4 se reportan los valores del tiempo que tardan los cladodios de nopal en deshidratarse, siendo éstos cortados en trozos de 2 x 2 cm, así como su promedio y desviación estándar.

Cuadro 3.4 Tiempo de secado de cladodios de nopal frescos

Tiempo de secado (h)
10.48
10.51
10.49
10.50
10.46
Promedio 10.48 \pm 0.02

Los valores representan el promedio \pm la desviación estándar, (n=5)

El tiempo total de secado de los trozos de nopal fue de 10.48 horas, hasta alcanzar una humedad del 4%.

3.6 Molienda de cladodios de nopal deshidratado

La molienda de los cladodios ya deshidratados se llevó a cabo como se describe en el punto 2.6 del capítulo 2, utilizando una criba de 0.8 mm, esto se realizó tomando en cuenta el tamaño de partícula determinado para el nopal fresco.

El tamizado del polvo se realizó con el tamiz 60 USA que es el que ofrece tamaños de partícula menores a 250 μm , lo que atravesó el tamiz se utilizó para preparar la suspensión de polvo de nopal y así se tenga un tamaño de partícula homogéneo y lo más parecido al del fresco que es de un tamaño de partícula en promedio de 250 μm .

3.7 Preparación de suspensión con nopal deshidratado

La suspensión se preparó con el polvo de nopal que pasa la malla 60 USA, como se describe en el punto 2.7 del capítulo 2. Dicha suspensión cuenta con tamaños de partícula homogéneos y toma una coloración café, ésta tiene un aroma característico a nopal. Durante el reposo los sólidos se sedimentaron en el fondo de los contenedores por lo que se tuvo que agitar nuevamente. Las pruebas de humectación se realizaron en frascos de plástico para ver si el polvo estaba completamente humectado y listo para llevar a cabo la centrifugación.

Actividades objetivo particular 1

3.8 Centrifugación de suspensiones de nopal a diferentes condiciones

Las condiciones de trabajo seleccionadas se obtuvieron mediante pruebas previas a la experimentación, en donde se observó que a menores velocidades de centrifugación, los clarificados obtenidos estaban muy contaminados con fracción pesada y no se podían evaluar, por lo que se decidió aumentar las velocidades hasta que se viera un clarificado más limpio.

En cuanto a la velocidad de alimentación de la centrífuga se controló con la válvula que se encuentra debajo del tanque de alimentación, no se pueden obtener menores velocidades de alimentación debido al rango de abertura que da dicha válvula, además de que el proceso sería más largo. Con respecto a la altura de los tornillos se decidió variar para regular el flujo de salida de la fracción soluble o también llamada fase ligera.

3.9 Rendimiento y eficiencia de separación

El rendimiento y la eficiencia de separación se obtuvieron evaluando cada uno de los clarificados obtenidos a las diferentes condiciones de operación. Una vez que se tienen los resultados se procedió a hacer el análisis de los mismos para saber a que condiciones se consiguieron mejores resultados.

Para analizar los resultados se procedió a separar las variables por series en donde S es la serie; 3, 4 y 5 después de la S son las velocidades de giro; en tercer lugar los números 2, 4 y 6 indican las velocidades de alimentación y al final los números 0, 2 y 4 indican la altura de los tornillos. En todos los gráficos se representan los promedios y desviación estándar de 3 repeticiones por cada serie.

3.9.1 Eficiencia de separación

Para éste caso se consideró a la eficiencia como el resultado de todas las pruebas llevadas a cabo para cada una de las fracciones solubles obtenidas, las cuales indican si el proceso de centrifugación se llevó a cabo correctamente.

- **Volumen recolectado de la fracción soluble (mL)**

Los resultados de la determinación de volumen recolectado de fracción soluble, se reportan en la figura 3.1, en donde se grafican los promedios y la desviación estándar, la cual es muy pequeña, de 3 repeticiones experimentales por cada serie, es decir, se llevó a cabo por triplicado la centrifugación de suspensiones preparadas al 4% a las mismas condiciones de acuerdo con cada serie.

A continuación se muestra el gráfico de los volúmenes recolectados a las diferentes condiciones de proceso manejadas durante la experimentación, las series fueron nombradas en el punto 3.9 de la página 88.

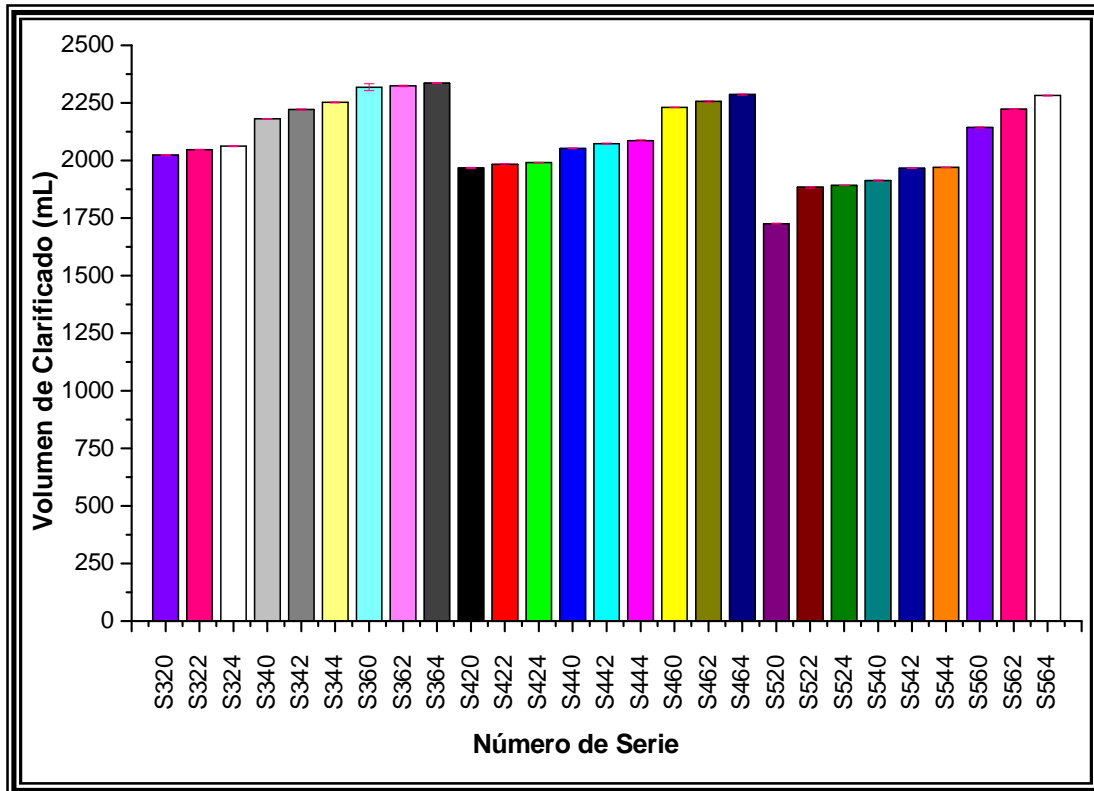


Figura 3.1 Volumen de clarificado obtenido a diferentes condiciones de proceso

Como se puede apreciar en la figura 3.1, los mayores volúmenes recolectados de clarificado se obtuvieron a una velocidad de giro de 3000 rpm, velocidad de alimentación de 600 mL/min y a las 3 alturas de tornillos (S360, S362 y S364), siendo mayor a una altura de tornillo de 4 mm (S364), con un valor de 2336 mL. Sin embargo, a pesar de ser los mayores volúmenes obtenidos, se pudo observar que son los más turbios, esto significa que contienen parte de la fracción insoluble.

Por el contrario, a mayores velocidades de giro (5000 rpm), velocidad de alimentación de 200 mL/min y con tornillo de restricción cerrado (0 mm), siendo la serie S520 (1725.66 mL), se obtuvieron menores volúmenes de clarificado, sin embargo son mas claros, por lo que tienen una menor cantidad de sólidos presentes, es decir, se tiene una menor contaminación del clarificado.

3.9.2 Luminosidad del clarificado o fracción soluble

En la figura 3.2 se reportan los resultados obtenidos de la determinación de color de la fase ligera, tomando en cuenta el parámetro “L” que indica la luminosidad de la muestra.

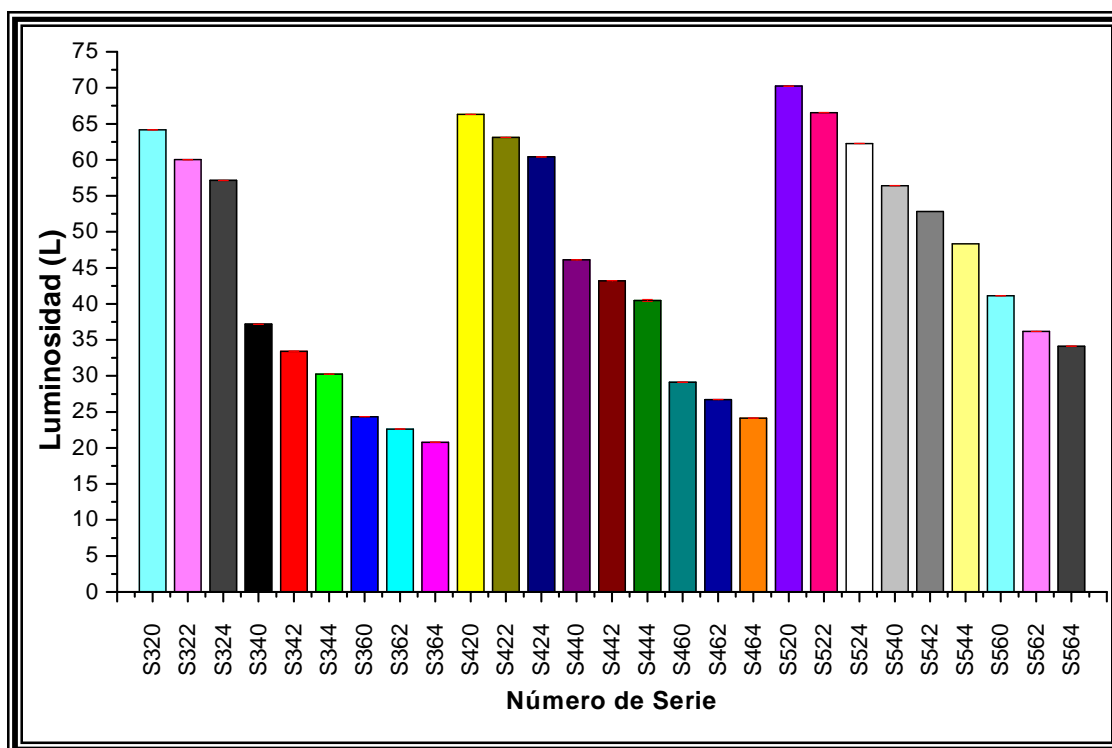


Figura 3.2 Luminosidad (L) de clarificado obtenido a diferentes condiciones de proceso

Como se aprecia en la figura 3.2, se reportan los valores de la variable “L” luminosidad o brillantez de los clarificados obtenidos a las diferentes condiciones de proceso. Los valores de L van de 0 (negro) hasta 100 para colores de máxima brillantez (blanco). La luminosidad es la capacidad de reflejar la luz.

Los mayores valores de luminosidad se pueden apreciar a una velocidad de giro de 5000 rpm, con una velocidad de alimentación de 200 mL/min y a las tres alturas de tornillos (S520, S522 y S524), siendo mayor cuando los tornillos están totalmente cerrados, es decir a 0 mm (S520) con un valor de 70.23 en L. Esto indica que se tiene una menor cantidad de sólidos solubles en el clarificado y esto permite que la luz atraviese la muestra más fácilmente.

Por el contrario a la menor velocidad de giro y mayor velocidad de alimentación a las tres alturas de tornillo (S360, S362 y S364), se obtienen los menores valores de L, lo que se aprecia como un mayor contenido de sólidos insolubles además de presentar una coloración más oscura, el menor valor observado fue de 20.78 en L.

3.9.3 Densidad del clarificado o fracción soluble

Los resultados para la determinación de densidad de las fases ligeras se reportan en la figura 3.3.

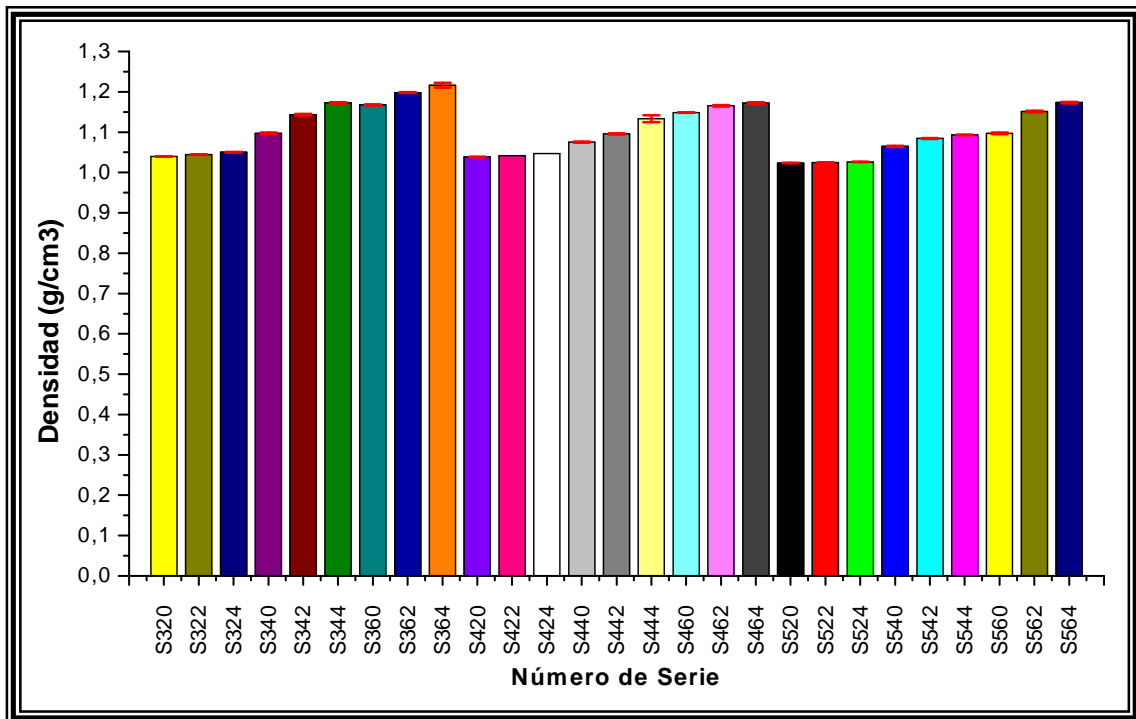


Figura 3.3 Densidad (g/cm³) de clarificados obtenidos a diferentes condiciones de proceso

En la figura 3.3, se puede ver que los mayores valores de densidad se obtuvieron a una velocidad de giro de 3000 rpm, con una velocidad de alimentación de 600 mL/min y a las alturas de tornillo de 2 y 4 mm (S362 y S364), siendo mayor a 4 mm (S364) 1.2163 g/cm³, es decir que a estas condiciones de proceso se obtiene más cantidad de sólidos por lo que la fracción soluble se encuentra contaminada.

Sin embargo, a mayores velocidades de giro (5000 rpm), velocidades de alimentación de 200 mL/min y a las tres diferentes alturas de tornillo (S520, S522 y S524), se presentan los menores valores de densidad, por lo que el clarificado se encuentra menos contaminado con fracción insoluble, siendo menor en la serie S520 con un valor de 1.0235 g/cm^3 .

Los resultados obtenidos hasta el momento indican que a mayores velocidades de giro, se obtienen clarificados con una mejor calidad, en cuanto a que no se encuentran muy contaminados con fracción insoluble que llega a salir de la centrífuga.

Hasta el momento, se puede decir que el volumen de clarificado no es muy relevante, ya que aunque se tengan mayores cantidades de éste, presenta mala calidad en cuanto a luminosidad y densidad, por lo que esta variable de respuesta quizá podría no tomarse en cuenta para un análisis estadístico. También es importante mencionar que los clarificados con un mayor valor de luminosidad son los de mejor calidad, ya que aunque no se parecen a los valores de L del agua, presentan menor contaminación. En cuanto a la densidad mientras más bajos sean los valores es mejor el clarificado.

3.9.4 Turbidez del clarificado o fracción soluble

Los resultados para la determinación de turbidez de las fracciones solubles, se reportan en la figura 3.4.

La turbidez indica la falta de transparencia de un líquido, debido en gran medida, a la presencia de partículas que se encuentren en suspensión en dicho líquido. Así, cuanto mayor sea la cantidad de sólidos en suspensión presentes en el agua, mayor será la sensación de suciedad de esta, y por lo tanto, mayor será la turbidez. Para realizar la medición de la turbidez se utilizan los NTU, siglas que significan “Unidades Nefelométricas de Turbidez” (Méndez, 2011).

En la figura 3.4, se muestra el gráfico que representa los valores obtenidos de turbidez de los clarificados obtenidos a las diferentes condiciones de proceso.

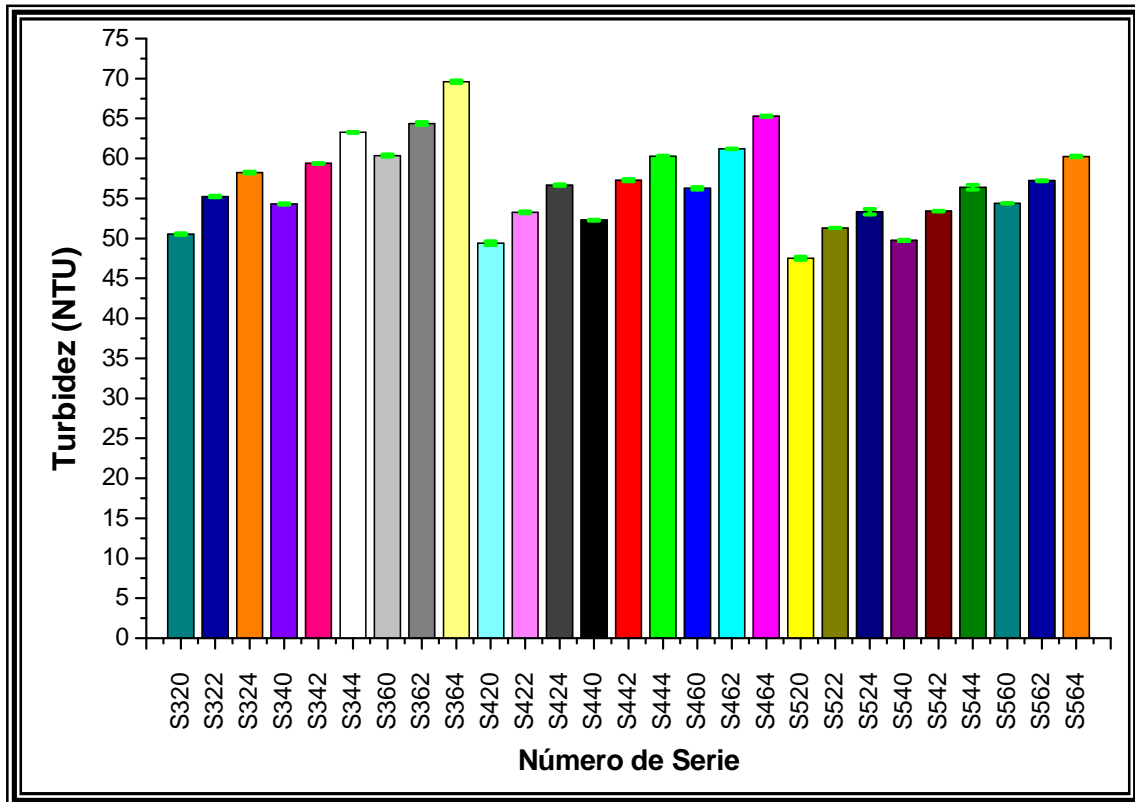


Figura 3.4 Turbidez (NTU) de clarificados obtenidos a diferentes condiciones de proceso

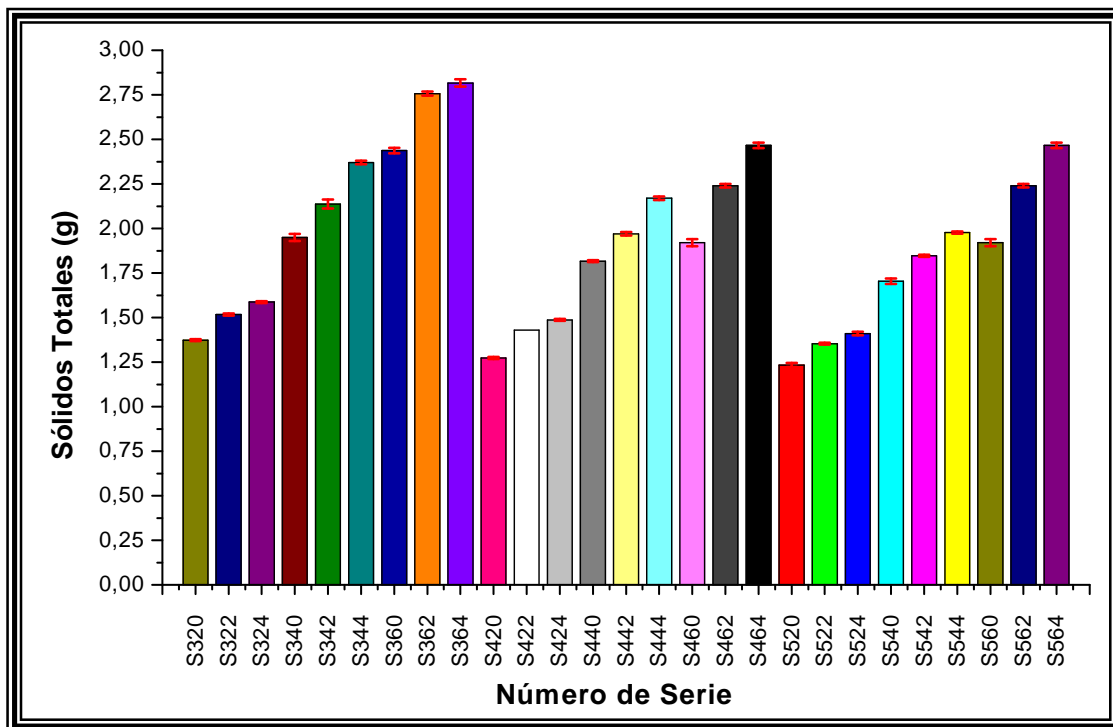
Como se puede apreciar en la figura 3.4, el mayor valor de turbidez se obtuvo a velocidades de giro de 3000 y 4000 rpm, velocidad de alimentación de 600 mL/min y a una altura de tornillo de 4 mm (S364 y S464), siendo mucho mayor a 3000 rpm (S364), con un valor de 69.61 NTU. Estos valores indican que los clarificados tienen una gran cantidad de sólidos.

El menor valor de turbidez se obtuvo a una velocidad de giro de 5000 rpm, velocidad de alimentación de 200 mL/min y a una altura de tornillo de 0 mm, es decir completamente cerrado (S520), obteniéndose 47.52 NTU. Al tener un menor valor de turbidez, el clarificado presenta una mínima cantidad de sólidos por lo que es más transparente que los obtenidos a menores velocidades de giro.

Al ser menor el valor de la turbidez, éstos son más parecidos al agua aunque no en su totalidad ya que el agua empleada como referencia tiene un valor de turbidez de 0.01 NTU, esto indica que es totalmente transparente, además de que los clarificados siempre van a contener partículas de fracción insoluble.

3.9.5 Sólidos totales del clarificado o fracción soluble

Los resultados obtenidos de la determinación de sólidos totales para todos los



clarificados se reportan en la figura 3.5.

Figura 3.5 Sólidos Totales (g) de clarificados obtenidos a diferentes condiciones de proceso

En la figura 3.5 se puede observar que los clarificados con una mayor cantidad de sólidos totales fueron los obtenidos a velocidad de giro de 3000 rpm, velocidad de alimentación de 600 mL/min y a alturas de tornillo de 2 y 4 mm (S362 y S364), siendo mayores a 4 mm (S364), con valor de 2.81 g. Esto indica que los

clarificados obtenidos a estas condiciones son los que presentan menor calidad, ya que se encuentran más contaminados con sólidos insolubles.

Al haber una menor velocidad de giro los clarificados se encuentran contaminados con parte de la fracción insoluble, lo que también se refleja en los resultados obtenidos de las pruebas anteriores en donde se puede ver que aunque a menores velocidades de giro se obtiene mayor cantidad de clarificado éste llega a salir más contaminado. De igual manera al comparar con los resultados de luminosidad, densidad y turbidez coinciden en que a menor velocidad de giro la luminosidad del clarificado es más baja, la densidad aumenta así como la turbidez y la cantidad de sólidos totales.

En este caso los clarificados que presentaron menor cantidad de sólidos totales se obtuvieron a una velocidad de 5000 rpm, velocidad de alimentación de 200 mL/min y a las tres diferentes alturas de tornillo (S520, S522 y S524), siendo menor a 0 mm (S520), con valor de 1.23 g. Estos resultados también son comparables con los obtenidos de las pruebas anteriores a altas velocidades de giro se tiene una menor cantidad de clarificado pero éste se encuentra menos contaminado por lo que aumenta su luminosidad, disminuye su densidad y turbidez, así como la cantidad de sólidos totales.

3.9.6 Precipitación del mucílago (rendimiento)

En la figura 3.6, se presentan los resultados obtenidos para el rendimiento en mucílago de cada uno de los clarificados obtenidos a las diferentes condiciones de proceso.

Los resultados obtenidos se reportan en cantidad de mucílago seco en mg por gramo de nopal utilizado.

El mucílago se extrajo con etanol, ya que este es un solvente inocuo y menos contaminante que la acetona. Para precipitar el mucílago, como se mencionó en la

sección 2.9.6 del capítulo 2 se empleó una relación 1:2, es decir, 2 litros de etanol por litro de clarificado.

Como se observa en la figura 3.6, se obtuvo un mayor rendimiento a velocidades de giro de 5000 rpm, a velocidades de alimentación de 200 mL/min y a las tres alturas de tornillos (S520, S522 y S524), siendo mayor cuando los tornillos están cerrados, es decir a 0 mm (S520).

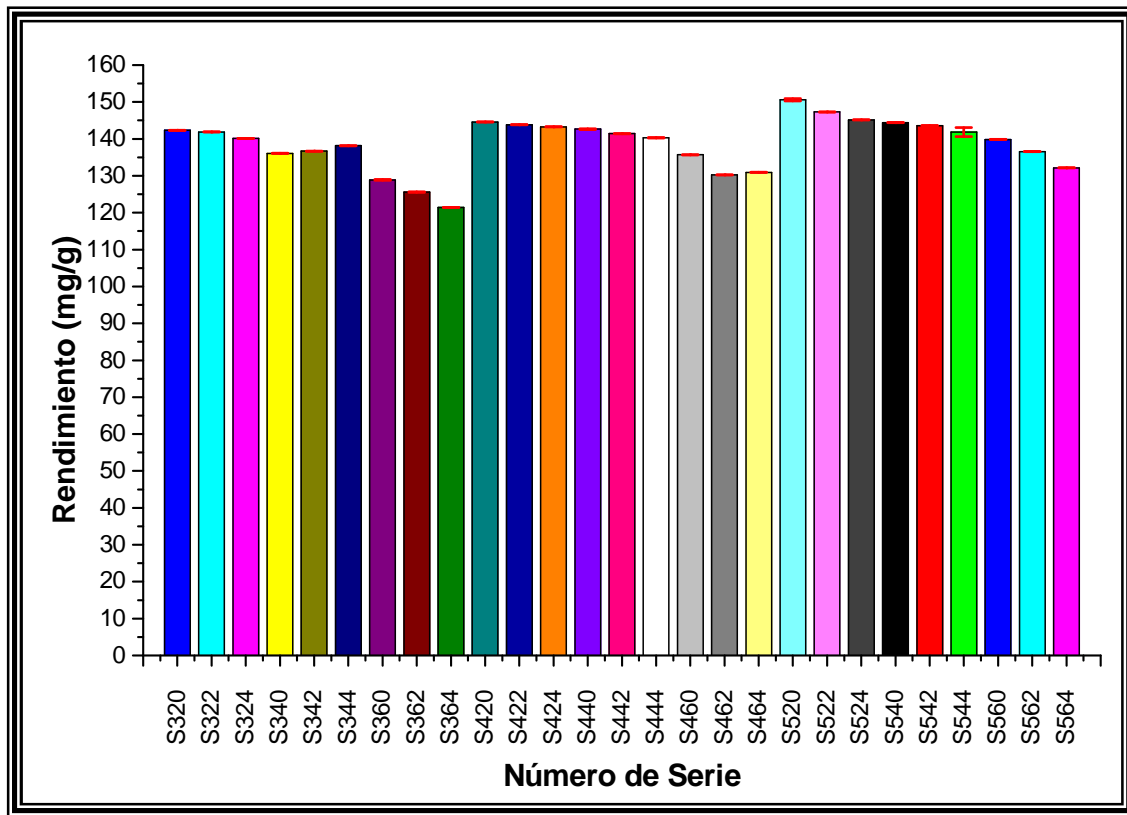


Figura 3.6 Rendimiento en mucílago (mg/g) de clarificados obtenidos a diferentes condiciones de proceso

A las condiciones de proceso antes mencionadas se obtuvo un rendimiento de 150.57 mg/g de nopal deshidratado el cual fue el más alto (15.057 %) y de 10.3% para el mucílago de nopal fresco. De acuerdo a lo obtenido en cuanto a volumen de clarificado, se puede ver que aunque a estas condiciones se obtiene menor volumen, éste tiene un mayor rendimiento en mucílago, además de presentar las mejores características. Por el contrario en la figura 3.6, también se puede

apreciar que el menor rendimiento se obtuvo a una velocidad de giro de 3000 rpm, a una velocidad de alimentación de 600 mL/min y a una altura de tornillo de 4 mm (S364), con un valor de 121.42 mg/g de mucílago.

A estas condiciones se tuvo un mayor volumen de clarificado, sin embargo es menor su rendimiento en cuanto a la cantidad de mucílago extraído.

Los rendimientos obtenidos para todas las condiciones de proceso fueron muy buenos en comparación con los reportados por otros autores Medina-Torres (2005), 9.4 %, Matsuhiro *et al.* (2006) 3.8% con nopal fresco; por lo que se puede decir que el procedimiento de extracción así como el manejar nopal deshidratado da buenos resultados en cuanto a rendimiento de mucílago.

3.9.7 Tiempo de residencia

En la figura 3.7, se presentan los resultados obtenidos de la determinación del tiempo de residencia para todos los clarificados a las diferentes condiciones de proceso.

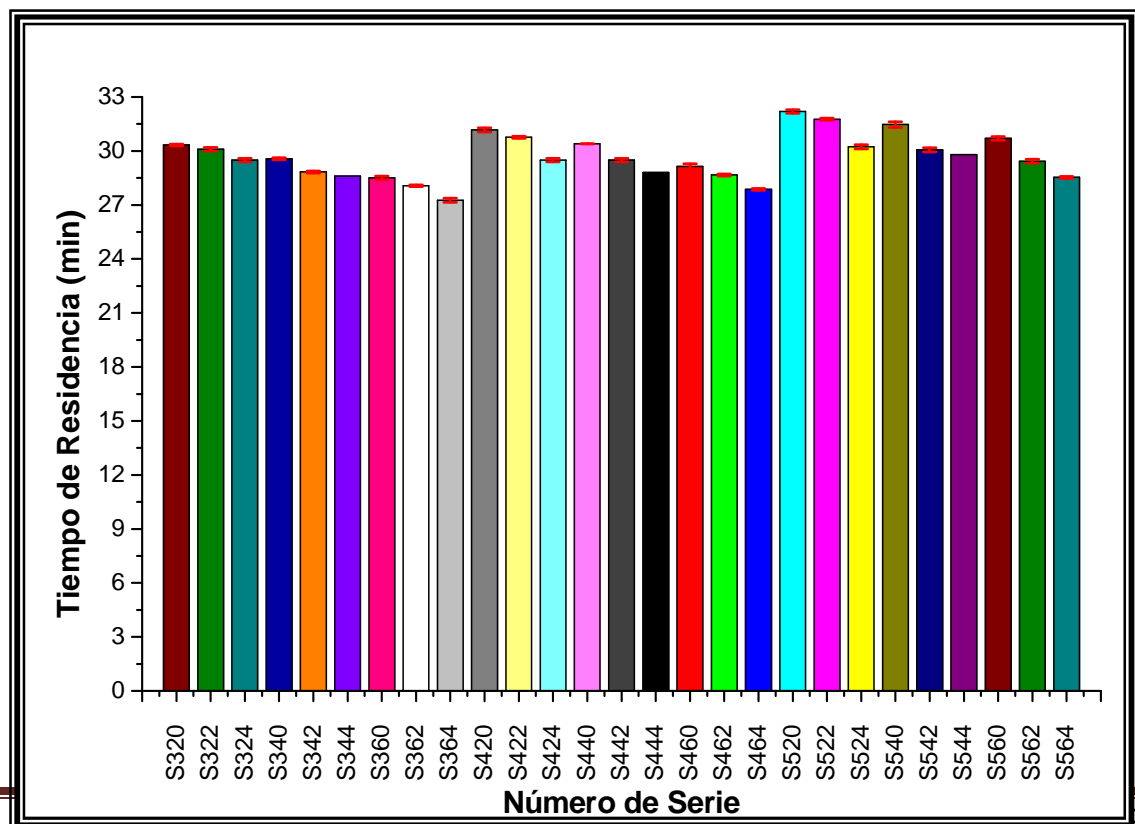


Figura 3.7 Tiempo de residencia (min) de clarificados obtenidos a diferentes condiciones de proceso

En la figura 3.7 se puede percibir que a una velocidad de giro de 5000 rpm, con una velocidad de alimentación de 200 mL/min y a alturas de tornillo de 0 y 2 mm (S520 y S522), se tiene un mayor tiempo de residencia, siendo mayor cuando los tornillos se encuentran completamente cerrados, es decir a 0 mm (S520), con valor de 32.2 min.

El menor tiempo de residencia se observó a una velocidad de giro de 3000 rpm, velocidad de alimentación de 600 mL/min y a una altura de tornillo de 4 mm (S364), con un valor de 27.26 min.

Comparando estos resultados con los obtenidos anteriormente de cada una de las diferentes pruebas realizadas a los clarificados, se puede decir que cuando se mantiene más tiempo el clarificado dentro de la centrifuga, éste tiene mejores propiedades, aún cuando hay menor volumen de clarificado, presenta una mayor brillantez, por lo que deja pasar mejor la luz, tiene una menor densidad así como turbidez y sólidos totales lo que indica que los clarificados tienen más calidad y se encuentran menos contaminados. Además, presentan un mayor rendimiento en cuanto a la cantidad de mucílago que se obtiene de éste.

3.10 Análisis estadístico

El experimento en el que se investigan dos o más factores simultáneamente se conoce como experimento factorial. Este diseño se aplica cuando se desea estudiar, simultáneamente, los efectos de dos o más variables. En un experimento factorial no sólo pueden estudiarse los efectos de los factores individuales sino, si el experimento se lleva a cabo apropiadamente, puede estudiarse también la interacción entre los factores (Wayne, 1994).

A continuación en el cuadro 3.5 se presenta el resumen del diseño factorial multinivel que da el programa estadístico Minitab 14®.

Se toma como base 27 corridas con tres replicas dando un total de 81 corridas en un bloque.

Cuadro 3.5 Diseño factorial

FACTOR	NOMBRE	NIVELES	VALOR DE LOS NIVELES		
A	VEL. DE GIRO	3	3000	4000	5000
B	VEL. DE ALIMENTACIÓN	3	200	400	600
C	ALTURA DE TORNILLO	3	0	2	4

El gráfico de efectos principales sobre la variable de respuesta volumen de clarificado se puede observar con mayor claridad en la figura 3.8, en donde se grafican el promedio de la variable de respuesta con respecto a la velocidad de giro, velocidad de alimentación y altura de tornillo.

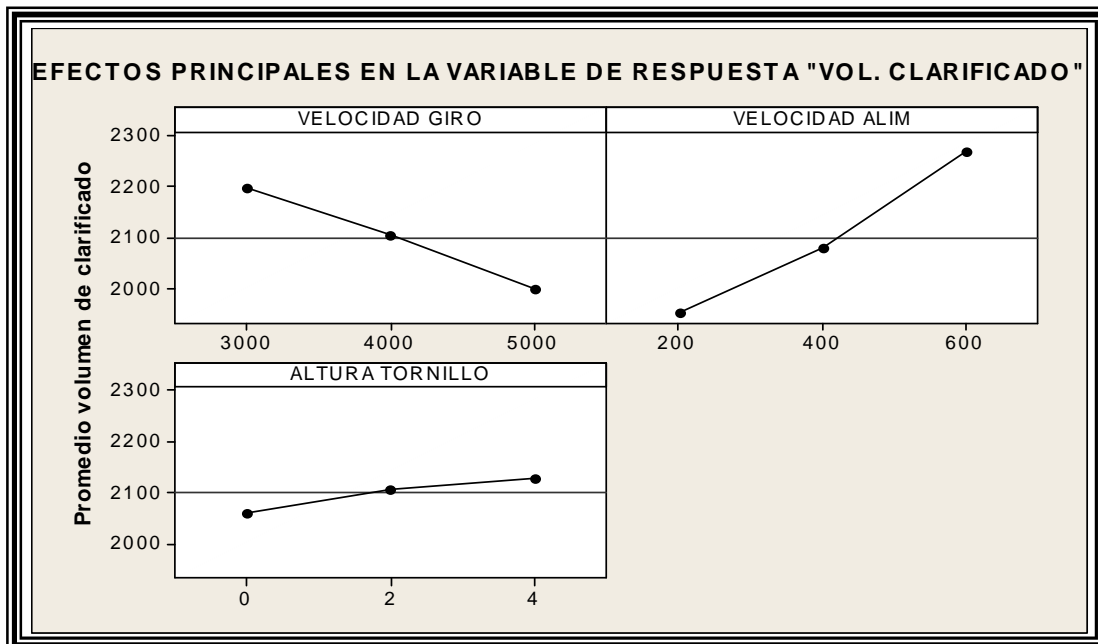


Figura 3.8 Diagrama de efectos principales sobre la variable de respuesta volumen de clarificado

Como se puede apreciar en la figura 3.8, el promedio de todos los resultados obtenidos fue de 2100 mL de volumen de clarificado.

En el caso de la velocidad de giro, se observa que al nivel más bajo 3000 rpm se obtuvo el mayor volumen de clarificado, mientras que a una velocidad de 4000 rpm se acercó a la media de los datos, y al nivel más alto de dicho factor 5000 rpm se consiguió un menor valor para la variable de respuesta (volumen recolectado).

En cuanto a la velocidad de alimentación se aprecia un mayor efecto, ya que la diferencia entre los niveles bajo y alto es más grande. Al nivel más bajo 200 mL/min se obtuvo la menor cantidad de clarificado, al nivel más alto 600 mL/min se extrajo la mayor cantidad de volumen de clarificado pero contaminado.

Para el factor altura de tornillo el efecto es menor, ya que todos los datos se acercan al promedio, sin embargo cuando está en 0 mm hay menor cantidad de clarificado, y a una altura de 4 mm se obtuvo un valor ligeramente más alto.

En el Anexo I, se presentan los gráficos de interacciones para todos los factores.

En la figura 3.9, se puede apreciar el diagrama de efectos principales sobre la variable de respuesta luminosidad (L).

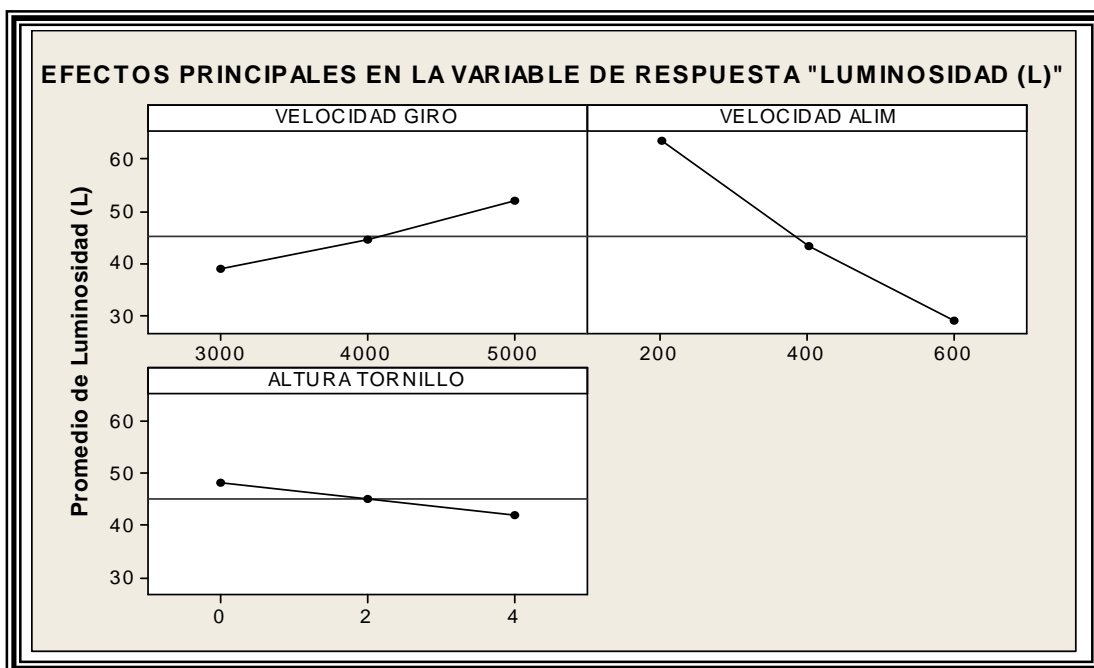


Figura 3.9 Diagrama de efectos principales sobre la variable de respuesta luminosidad (L)

Para la velocidad de giro, se observa que al nivel más bajo se obtuvo el menor valor de luminosidad, mientras que a una velocidad de 5000 rpm se consiguió una mayor lectura para ésta variable de respuesta.

En cuanto a la velocidad de alimentación se aprecia un mayor efecto, ya que la diferencia entre los niveles bajo y alto nuevamente es más grande. Al nivel más bajo de dicho factor se obtuvo un mayor valor de luminosidad, cercano al del agua, mientras que a la velocidad más alta se obtiene un menor valor de luminosidad.

Para el caso de la altura de tornillo el efecto es menor, ya que todos los puntos se acercan a la media de los datos, esto quiere decir que la altura del tornillo no tiene un gran efecto sobre la luminosidad del clarificado. La matriz de interacciones para todos los factores se representa en la figura 2 del Anexo I.

El diagrama de efectos principales para la variable de respuesta densidad se presenta en la figura 3.10.

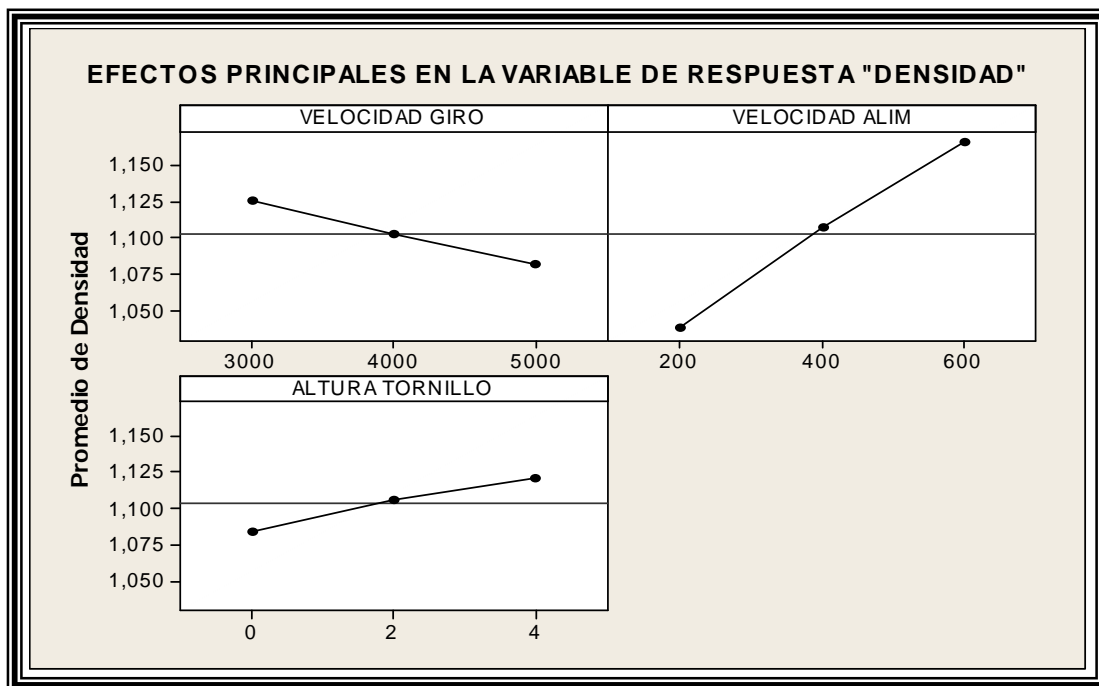


Figura 3.10 Diagrama de efectos principales sobre la variable de respuesta densidad

En este caso se puede observar que la velocidad de giro tiene un efecto parecido al de la altura de tornillo, ya que ambos casi se acercan al promedio de los datos.

A una velocidad de giro de 3000 rpm se obtiene el valor más alto de densidad en comparación con la de 5000 rpm. Para un valor medio del factor se aprecia que la densidad cae en el promedio de los datos.

En cuanto a la velocidad de alimentación se observa que tiene un efecto más significativo sobre la densidad, ya que al nivel más bajo de dicho factor se tienen los menores valores de densidad, en el nivel medio se encuentra muy poco por arriba de la media y a la velocidad más alta se obtuvo el mayor valor de densidad. En el caso de la altura de tornillo, cuando el factor se encuentra en el nivel de 0 mm hay una menor densidad, a 2 mm se encuentra casi en el promedio y a una altura de 4 mm se obtuvo un mayor valor de la variable de respuesta.

La matriz de interacciones para la densidad se ve en la figura 3 del Anexo I.

El diagrama de efectos principales para la variable de respuesta turbidez se presenta a continuación en la figura 3.11.

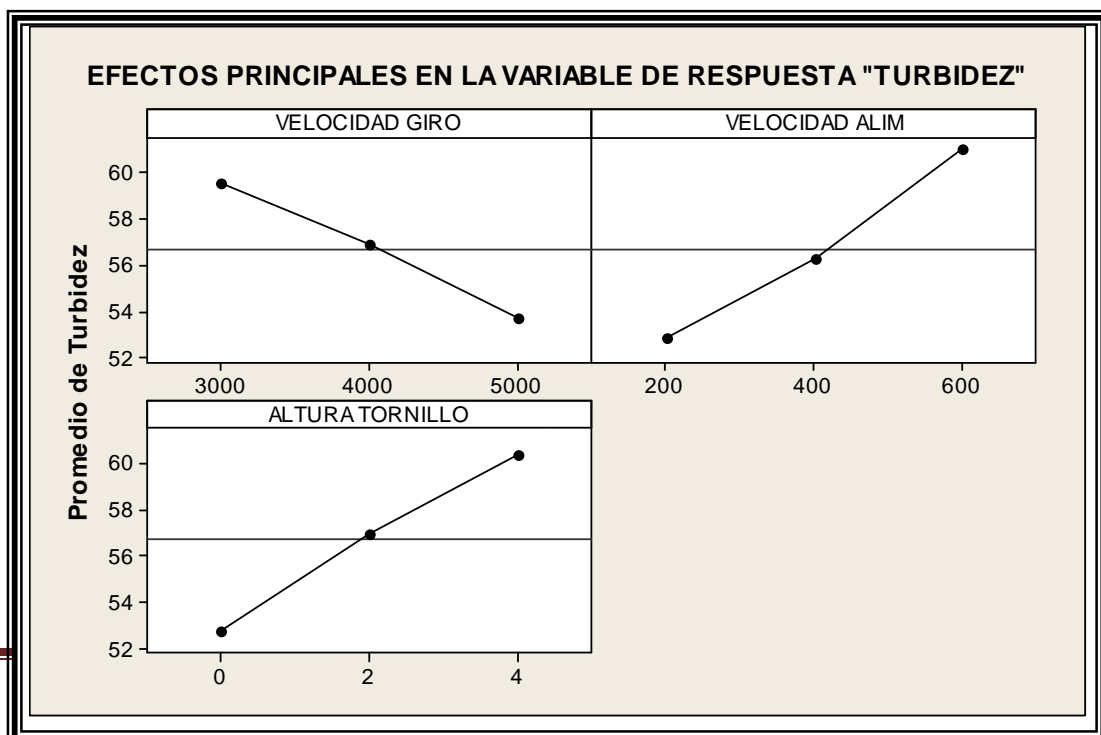


Figura 3.11 Diagrama de efectos principales sobre la variable de respuesta turbidez
 Nuevamente la velocidad de alimentación es la que tiene un mayor efecto sobre la variable de respuesta, seguida en este caso por la altura de tornillo y por último la velocidad de giro. A menor velocidad de giro se obtiene un valor alto de turbidez, en el valor medio (4000 rpm) la turbidez se encuentra por encima del promedio, mientras que a la velocidad más alta se observó menor turbidez.

En el caso de la velocidad de alimentación a la más baja se encontró el menor valor de turbidez, al aumentar a 400 mL/min el valor de la variable de respuesta queda por debajo de la media de los datos y a la más alta velocidad también se observa un incremento en la respuesta. Para la altura de tornillo se puede ver que a 0 mm hay menor turbidez, al aumentar a 2 mm éste valor queda ligeramente por encima del promedio y a 4 mm el valor de la turbidez se incrementa.

En la figura 3.12, se puede apreciar el diagrama de efectos principales sobre la variable de respuesta sólidos totales.

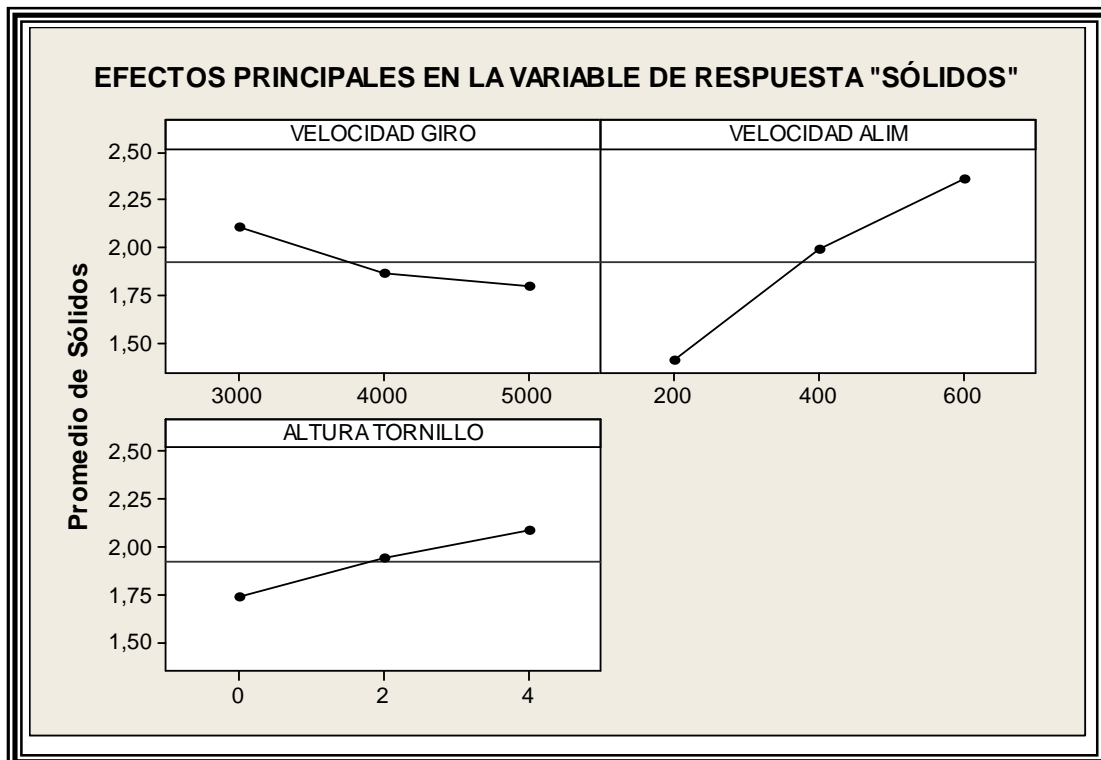


Figura 3.12 Diagrama de efectos principales sobre la variable de respuesta sólidos totales

Para esta variable de respuesta la velocidad de alimentación es la que tiene un mayor efecto, seguida por la altura de tornillo y por último la velocidad de giro. A menor velocidad de giro se obtiene un valor alto de sólidos totales, en el valor medio (4000 rpm) este valor cae por debajo del promedio, mientras que a la velocidad más alta se observó que hay menor cantidad de sólidos.

En el caso de la velocidad de alimentación a la más baja se obtuvo una cantidad baja de sólidos, al aumentar a 400 mL/min el valor de la variable de respuesta queda por arriba del promedio y a la más alta velocidad también se observa un incremento en la respuesta. Para la altura de tornillo se puede ver que a 0 mm hay menos sólidos, al aumentar a 2 mm éste valor queda por encima del promedio y a 4 mm el valor se incrementa. En la figura 5 del Anexo I se presentan las interacciones.

En la figura 3.13, se puede apreciar el diagrama de efectos principales sobre la variable de respuesta rendimiento.

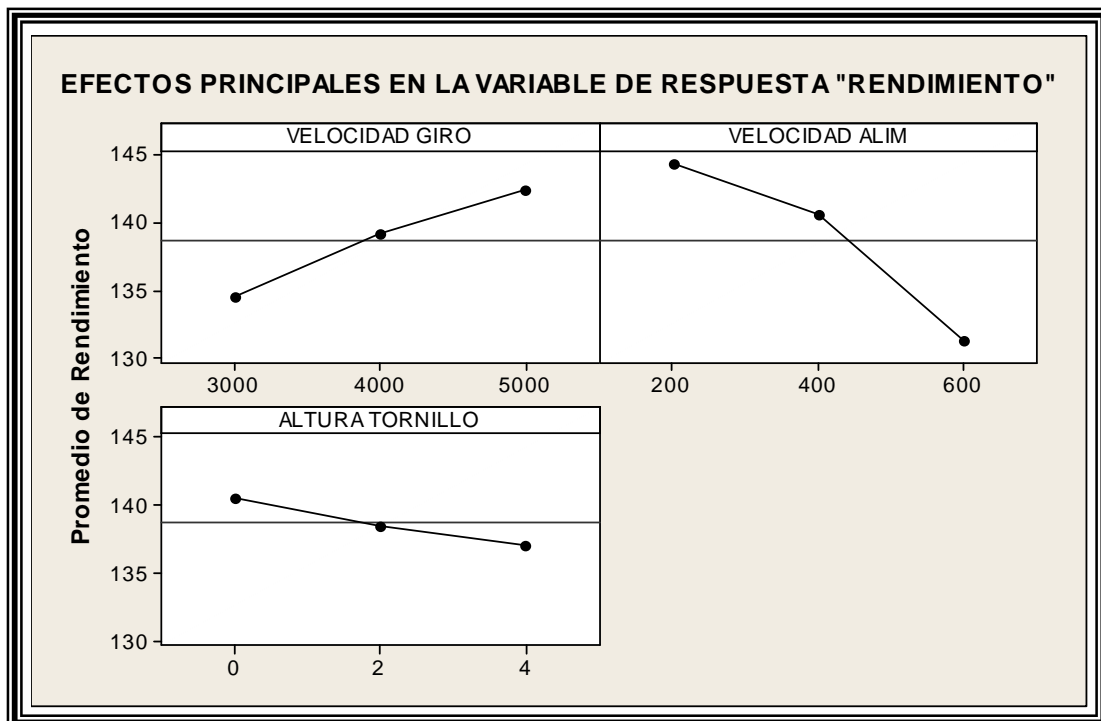


Figura 3.13 Diagrama de efectos principales sobre la variable de respuesta rendimiento

Para esta variable de respuesta la velocidad de alimentación es la que tiene un mayor efecto, seguida por la velocidad de giro y por último la altura de tornillo. A menor velocidad de giro se obtiene un valor bajo de rendimiento, en el valor medio (4000 rpm) este valor se encuentra encima del promedio, mientras que a la velocidad más alta se observó que hay mayor rendimiento.

En el caso de la velocidad de alimentación a la más baja se obtuvo un mayor rendimiento, al aumentar a 400 mL/min el valor de la variable de respuesta queda por arriba de la media de los datos y a la más alta velocidad se observó un decremento en la respuesta.

Para la altura de tornillo se puede ver que a 0 mm hay más rendimiento, al aumentar a 2 mm éste valor queda por debajo de la media de los datos y a 4 mm el valor de la variable de respuesta disminuye. La matriz de interacciones se presenta en la figura 6 del Anexo I.

En la figura 3.14, se puede observar el diagrama de efectos principales sobre la variable de respuesta tiempo de residencia.

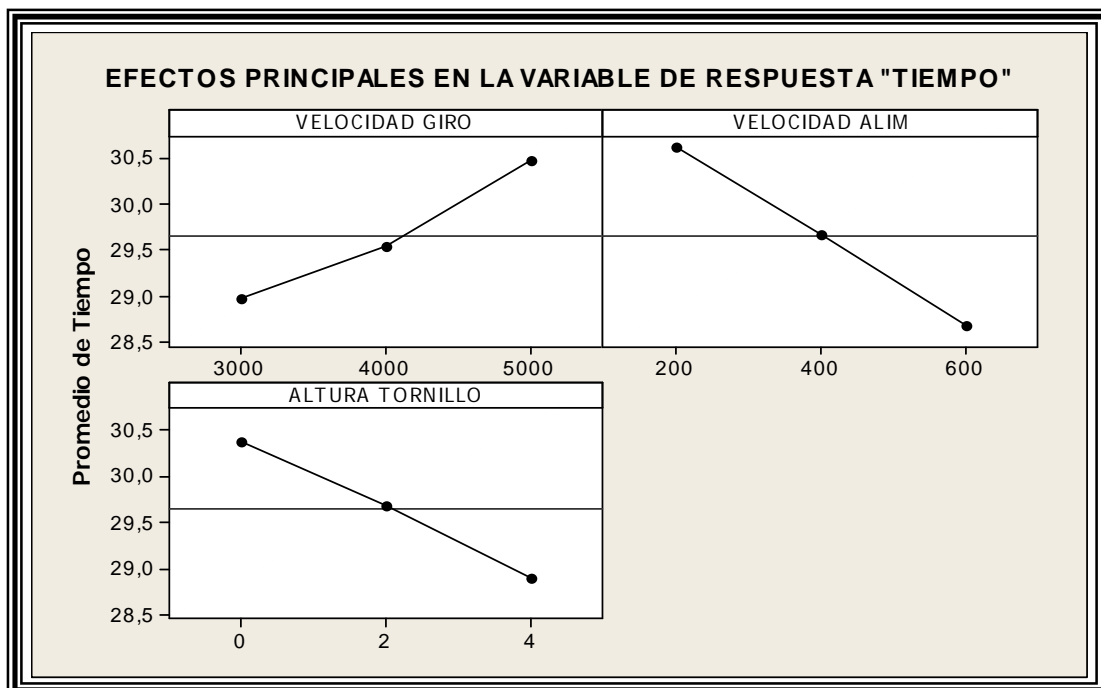


Figura 3.14 Diagrama de efectos principales sobre la variable de respuesta tiempo de residencia

Para esta variable de respuesta la velocidad de alimentación es la que tiene un mayor efecto, seguida por la velocidad de giro y por último la altura de tornillo. A menor velocidad de giro se obtiene un menor tiempo de residencia, en el valor medio (4000 rpm) este valor cae por debajo de la media de los datos, mientras que a la velocidad más alta se observó que el tiempo es mayor.

En el caso de la velocidad de alimentación a la más baja el valor de la variable se incrementa, al aumentar a 400 mL/min queda por encima del promedio de los datos y a la más alta velocidad se apreció un decremento en la respuesta.

Para la altura de tornillo se puede observar que a 0 mm el tiempo de residencia es mayor, al aumentar a 2 mm éste valor queda por encima del promedio y a 4 mm el valor de la variable de respuesta disminuye. En la figura 7 del anexo I, se presenta el diagrama de interacciones.

De acuerdo a los resultados obtenidos de las diferentes pruebas realizadas a los clarificados, y contrastando con lo obtenido del análisis estadístico, concuerdan en que las mejores condiciones para la obtención de mucílago de nopal deshidratado son manejando el equipo de centrifugación a una velocidad de giro de 5000 rpm, velocidad de alimentación de 200 mL/min y manejando los tornillos de restricción completamente cerrados, es decir, a 0 mm, ya que bajo estas condiciones se obtuvo el mayor rendimiento (mayor cantidad de mucílago extraído).

En el Anexo II, se presentan las tablas de Análisis de Varianza (ANOVA), para cada una de las variables de respuesta, con el fin de corroborar si existe influencia significativa de los factores empleados (velocidad de giro, velocidad de alimentación y altura de tornillo). En dichas tablas se puede observar que todos los efectos principales así como las combinaciones de éstos, tienen efecto significativo de acuerdo a los valores de P, sin embargo, esto no quiere decir que haya un efecto de interacción, como se puede apreciar en las figuras del Anexo I.

Actividades objetivo particular 2

3.11 Determinación de viscosidad aparente del mucílago de nopal

Algunos autores han reportado que el mucílago de nopal se comporta como fluido pseudoplástico. Cárdenas *et al.* (1997) estudiaron las propiedades reológicas de soluciones de mucílago de nopal (*Opuntia ficus-indica*) mediante pruebas oscilatorias con una geometría cono-plato. Notaron que el comportamiento pseudoplástico de las soluciones se vuelve más pronunciado conforme se incrementa la concentración. Medina-Torres *et al.* (2000) caracterizaron las propiedades reológicas del mucílago de nopal (*Opuntia ficus-indica*) en función de la concentración, temperatura y fuerza iónica.

Ambos estudios encontraron que las soluciones de mucílago se comportan como fluidos pseudoplásticos, es decir, su viscosidad disminuye conforme se incrementa la velocidad de cizalla; también observaron que la viscosidad se incrementa conforme aumenta la concentración de mucílago y el pH, y disminuye con el aumento de la temperatura y la fuerza iónica. Medina-Torres *et al.* (2000) resaltan que los valores de viscosidad de una solución de mucílago al 10% son comparables a los de una solución de goma xantana al 3%, lo cual es muy interesante considerando la importancia económica y técnica de dicha goma, de acuerdo a lo publicado por Calvo-Ayne, 2008.

La determinación de viscosidad aparente se realizó una vez que se obtuvo el mucílago de nopal deshidratado a las mejores condiciones de proceso. El mucílago de nopal fresco también se extrajo debido a que todas las publicaciones reportan resultados de nopales frescos. Los cladodios con estadio de maduración de 100 días (400 g) frescos, se trabajaron a iguales condiciones de operación en la centrífuga de discos y de filtración, precipitándose con etanol. Ambos mucílagos se secaron a la misma temperatura en una estufa de vacío.

Se llevó a cabo la preparación por triplicado de disoluciones a diferentes concentraciones de mucílago de nopal fresco y deshidratado, esto con el objetivo únicamente de comparar sus viscosidades y comportamiento reológico.

A continuación, en la figura 3.15, se muestran los resultados de los reogramas obtenidos al evaluar disoluciones a diferentes concentraciones de mucílago de nopal deshidratado y fresco en un viscosímetro de cilindros concéntricos.

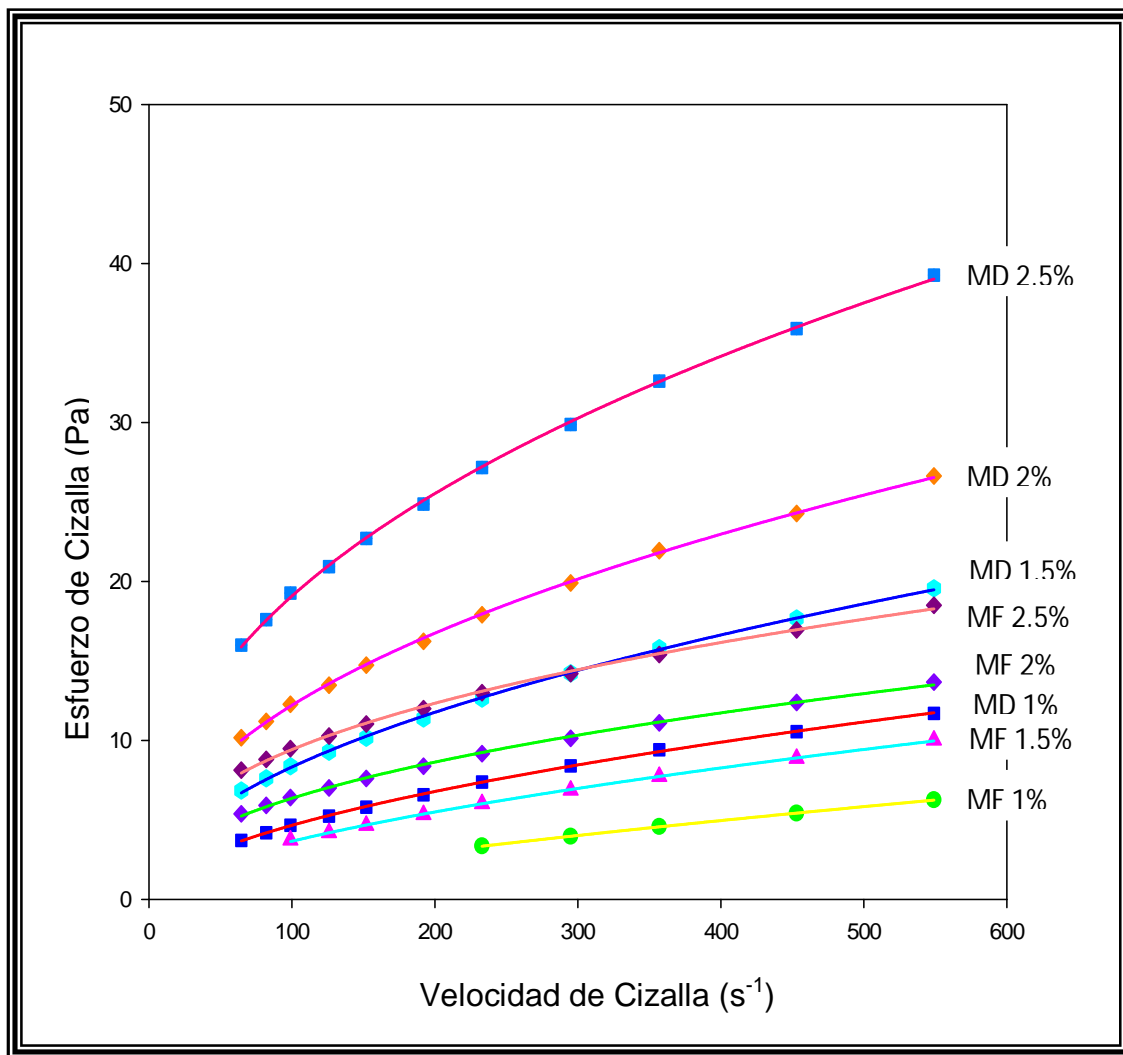


Figura 3.15 Velocidad de Cizalla vs Esfuerzo de Cizalla de mucílago de nopal deshidratado y fresco (MD mucílago de nopal deshidratado y MF mucílago de nopal fresco)

La figura 3.15 representa a cada una de las diferentes disoluciones, en donde se pueden apreciar las líneas de tendencia de una regresión potencial aplicada a los datos obtenidos.

Las iniciales MD y MF indican al mucílago de nopal deshidratado y mucílago de nopal fresco respectivamente.

En la figura 3.16, se representan los resultados de la viscosidad aparente de cada una de las disoluciones evaluadas de mucílago de nopal deshidratado y fresco a diferentes concentraciones.

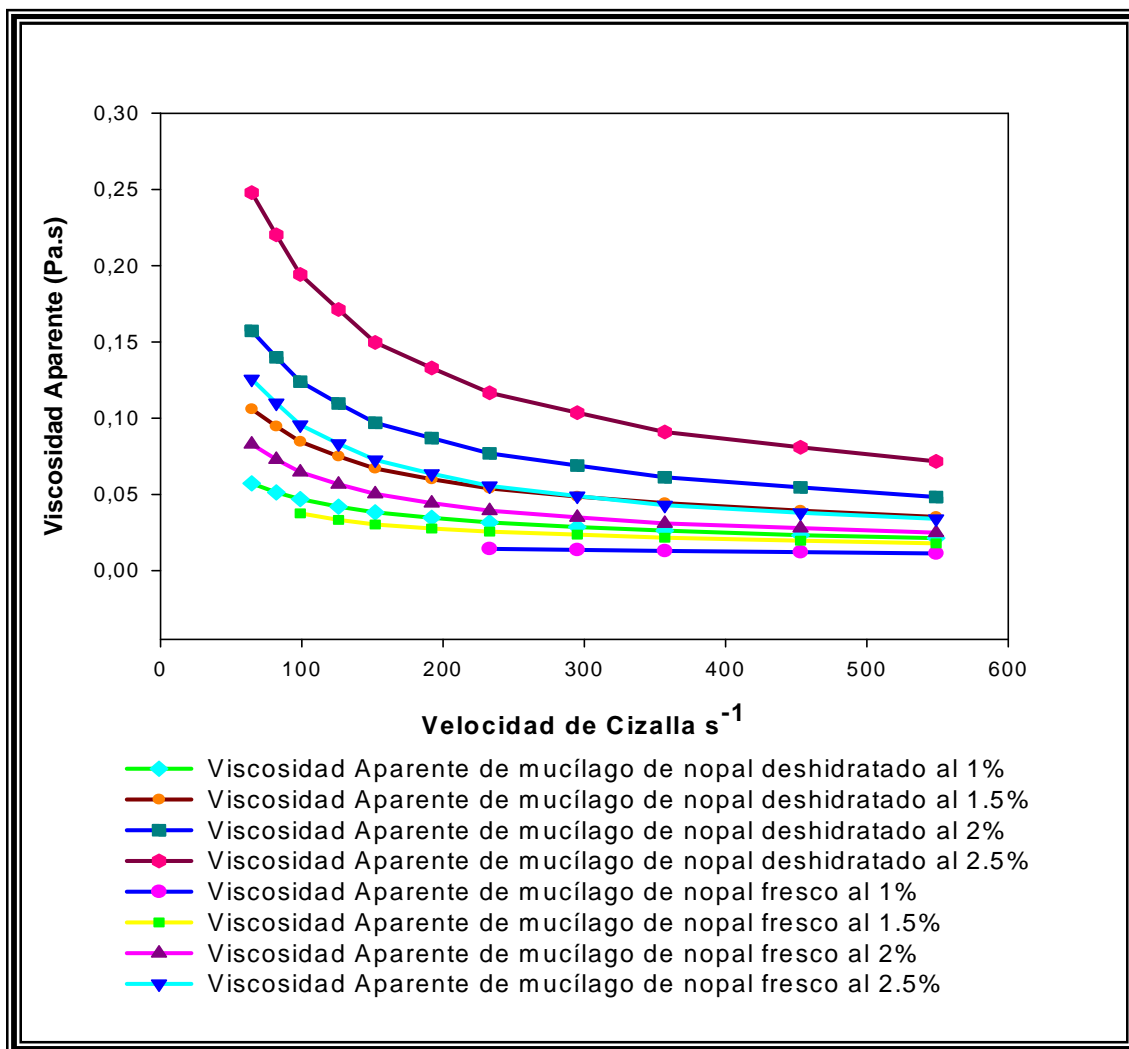


Figura 3.16 Velocidad de Cizalla vs Viscosidad Aparente de mucílago de nopal deshidratado y fresco

Como se puede apreciar en la figura 3.16, se graficaron los resultados obtenidos de la velocidad de cizalla en función de la viscosidad aparente que da el equipo después de cada corrida experimental. La viscosidad aparente desciende a medida que la velocidad de cizalla se va incrementando (Roudot, 2004).

Igualmente se presentan los resultados a concentraciones desde 1% hasta 2.5% de ambos mucílago, los cuales se identifican de acuerdo a los colores y a las leyendas presentadas debajo del gráfico.

Los gráficos mostrados anteriormente, son un comparativo del comportamiento reológico, así como de las viscosidades del mucílago de nopal obtenido de cladodios deshidratados y del obtenido de cladodios frescos.

Ambas disoluciones presentan un comportamiento fluidificante (shear-thinning), ya que, como se muestra en la figura 3.16, la viscosidad disminuyó al aumentar la velocidad de deformación (velocidad de cizalla) (Steffe, 1996). También se puede observar en la figura 3.15, que la velocidad de cizalla aumenta en proporciones más altas que el esfuerzo de cizalla (Muller, 1973).

Se aplicó el modelo de la ley de la potencia y de acuerdo a la regresión potencial, el mucílago de nopal deshidratado presenta un índice de consistencia (K) mayor que el de mucílago de nopal fresco a las diferentes concentraciones, esto indica que es más viscoso. En cuanto al valor del índice de comportamiento al flujo (n), en ambos casos son menores a uno lo que indica su comportamiento fluidificante, pero en el caso de mucílago fresco no es grande el grado de desviación del comportamiento newtoniano, además de que se puede aplicar este modelo ya que los valores de correlación r^2 son altos.

La viscosidad aparente del mucílago de nopal deshidratado presentó mayores valores que el de nopal fresco como se aprecia en la figura 3.16, lo que igualmente da una idea de que el mucílago de nopal deshidratado es más viscoso a las diferentes concentraciones.

A continuación se muestra la ecuación de la Ley de la Potencia o de Ostwald de Waele:

$$\sigma = \kappa \gamma^n$$

La viscosidad aparente η_{app} se define como el esfuerzo de corte o tensión tangencial en función de la velocidad de cizalla o velocidad de deformación:

$$\eta_{app} = \sigma / \dot{\gamma}$$

Esta viscosidad depende de la tensión tangencial o esfuerzo de corte y la velocidad de deformación o velocidad de cizalla, en donde no es constante la relación entre ambas (Muller, 1973).

Conforme aumenta la concentración de mucílago en la disolución van incrementando sus viscosidades así como el índice de consistencia (K), mientras que el índice de comportamiento al flujo (n) por el contrario va disminuyendo cada vez más, alejándose del comportamiento newtoniano.

A continuación se expone un comparativo de los datos obtenidos de índices de consistencia (K) así como índices de comportamiento al flujo (n) de cada una de las diferentes disoluciones tanto de mucílago de nopal deshidratado como fresco, tales resultados se pueden apreciar en el cuadro 3.6.

Cuadro 3.6 Índice de consistencia e índice de comportamiento al flujo para mucílago de nopal deshidratado y fresco a diferentes concentraciones.

Mucílago Concentración	K (Pa.s ⁿ) deshidratado	K (Pa.s ⁿ) fresco	n deshidratado	n fresco
1%	0.3854	0.0635	0.5414	0.7273
1.5%	0.8657	0.2517	0.4927	0.5824
2%	1.5288	0.8697	0.4519	0.4335
2.5%	2.8021	1.6245	0.4171	0.3828
3%	3.9944	2.7306	0.3561	0.3349

Como se observa en el cuadro 3.6, al aumentar la concentración de mucílago en ambos casos claramente se observa que el grado de pseudoplasticidad se incrementa.

El índice de consistencia (K) presenta valores mayores para el mucílago de nopal deshidratado. A una concentración a partir de 2% se comienza a dar un mayor incremento. Por el contrario el índice de comportamiento al flujo (n) va disminuyendo conforme se aumenta la concentración.

Para el mucílago de nopal fresco se presenta un considerable incremento a una concentración de 2.5% del índice de consistencia, e igualmente el índice de comportamiento al flujo va disminuyendo conforme se aumenta la concentración.

Durante la experimentación, se pudo observar que al aumentar la concentración de mucílago de nopal deshidratado al preparar las disoluciones, tardaba más tiempo en dispersarse en la fase acuosa y tomaba mayor consistencia así como cambios de color ya que cada vez que se aumenta dicha concentración se presenciaba un color más oscuro. Al tacto se sentía pegajoso y cada vez más viscoso. En la figura 3.17 se muestran las diferentes disoluciones preparadas de mucílago de nopal deshidratado.

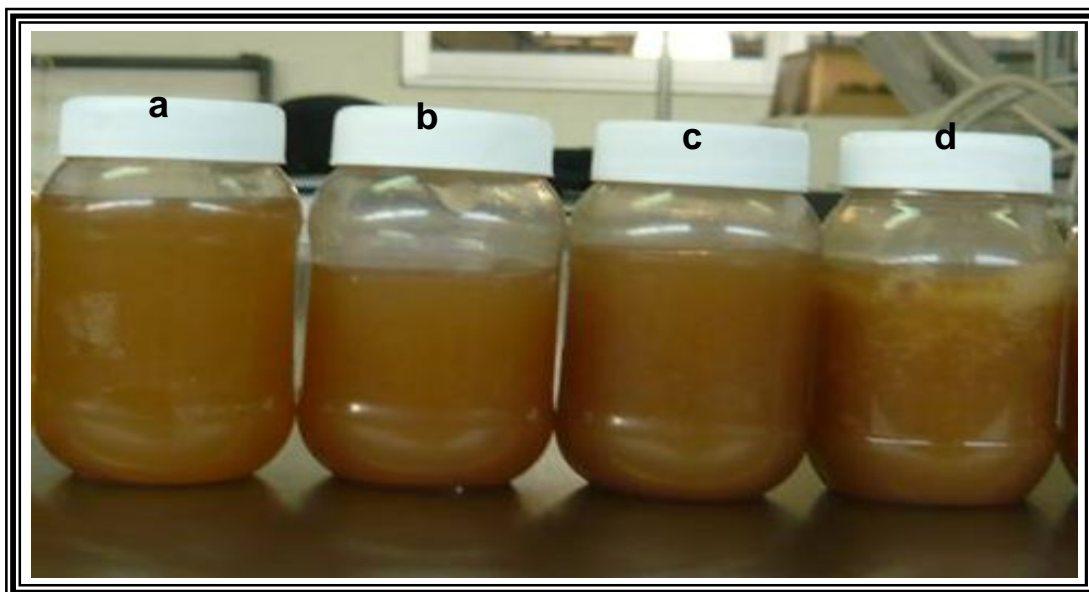


Figura 3.17 Disoluciones de mucílago de nopal deshidratado a diferentes concentraciones a) 1%, b) 1.5%, c) 2% y d) 2.5%

Como se ilustra en la figura 3.17, a una menor concentración de mucílago, el color es más claro y físicamente no era tan viscoso, pero conforme fue aumentando la concentración el color y su apariencia también fueron cambiando.

El mucílago de nopal fresco presentaba cambios de color más ligeros, pero aunque aumentara su concentración, tardaba menos tiempo en dispersarse que el de nopal deshidratado. Igualmente al tacto cada vez que aumentaba la concentración eran más pegajosas y viscosas, dichas disoluciones se presentan en la figura 3.18.

Como se aprecia en la figura 3.18, a menor concentración las disoluciones son más claras, conforme aumenta el color va cambiando así como su consistencia.

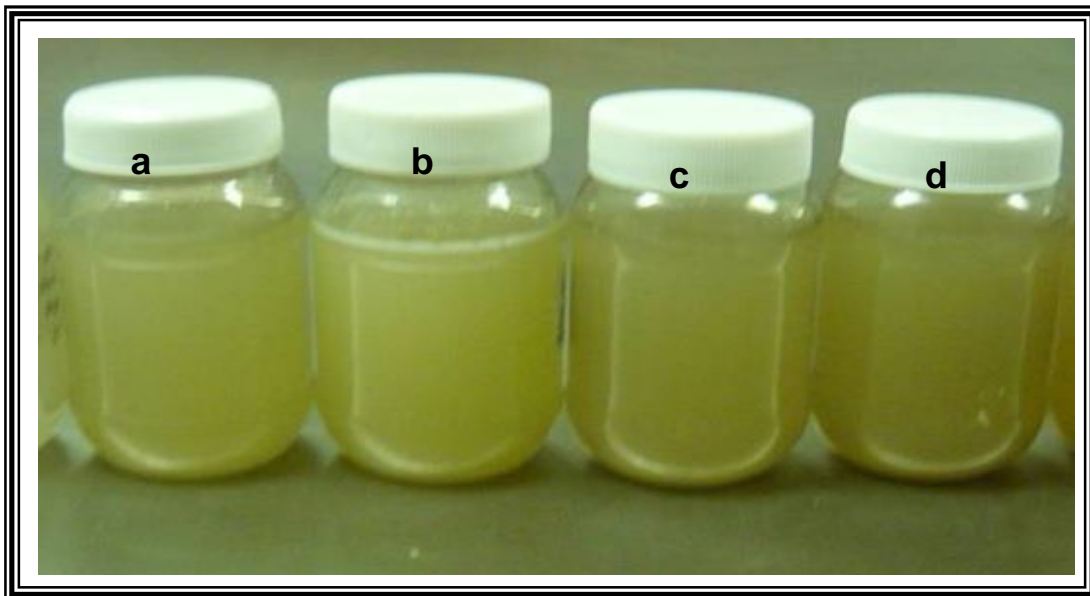


Figura 3.18 Disoluciones de mucílago de nopal fresco a diferentes concentraciones a) 1%, b) 1.5%, c) 2% y d) 2.5%

Se puede decir que el mucílago de nopal deshidratado al igual que el de nopal fresco presenta un comportamiento fluidificante, a partir de concentraciones del 1% y éste se va incrementando conforme aumenta la concentración, sin embargo

el mucílago de nopal deshidratado a 1.5% y el mucílago de nopal fresco a 2.5% a ciertas velocidades de cizalla llegan a tener un comportamiento muy semejante.

Actividades objetivo particular 3

3.12 Caracterización de la morfología e identificación de sales de calcio de suspensión, fracción soluble, fracción insoluble y mucílago de nopal mediante Microscopía Electrónica de Barrido (SEM-AV)

El Microscopio Electrónico de Barrido proporciona micrografías de la morfología de la superficie de cuerpos generalmente opacos a los electrones, por medio de un delgadísimo haz de electrones que recorre dicha superficie y de detectores que translucen las señales que de ella emanan, transformándolas en corrientes eléctricas que se emplean en formar una imagen en un monitor de televisión (Vázquez *et al.*, 2000). Éste microscopio es un instrumento diseñado para estudiar, en alta resolución, la superficie de los sólidos. Con este aparato se puede formar la imagen de los detalles más profundos de la muestra. Puede ser extraordinariamente útil para estudiar las características morfológicas y topográficas de la muestra (Yacamán *et al.*, 1995). El microscopio electrónico usa un haz de electrones como fuente de iluminación (González *et al.*, 2003).

Se realizaron análisis de microscopía electrónica de barrido a las diferentes fases; suspensión, fracción soluble, fracción insoluble y al mucílago obtenido a las mejores condiciones de proceso, esto permitió conocer su morfología e identificar las sales de calcio presentes en cada una de ellas.

En este trabajo las muestras fueron recubiertas superficialmente con una película de oro, que es un conductor de electrones. Posteriormente fueron examinadas mediante un microscopio electrónico de barrido a alto vacío (JEOL, modelo JSU-5600). Las condiciones de trabajo con las que se operó el microscopio fueron; voltaje de aceleración electrónica 20 kV, con una presión en el rango de 237.72–396.20 kg_f/m² en la cámara de la muestra, las imágenes se obtuvieron en la superficie a partir de la señal electrónica de barrido a alto vacío.

A continuación se presentan las micrografías de las diferentes fases obtenidas antes y después de llevar a cabo la centrifugación.

En la figura 3.19, se muestran las imágenes obtenidas de la suspensión de nopal deshidratado a diferentes aumentos.

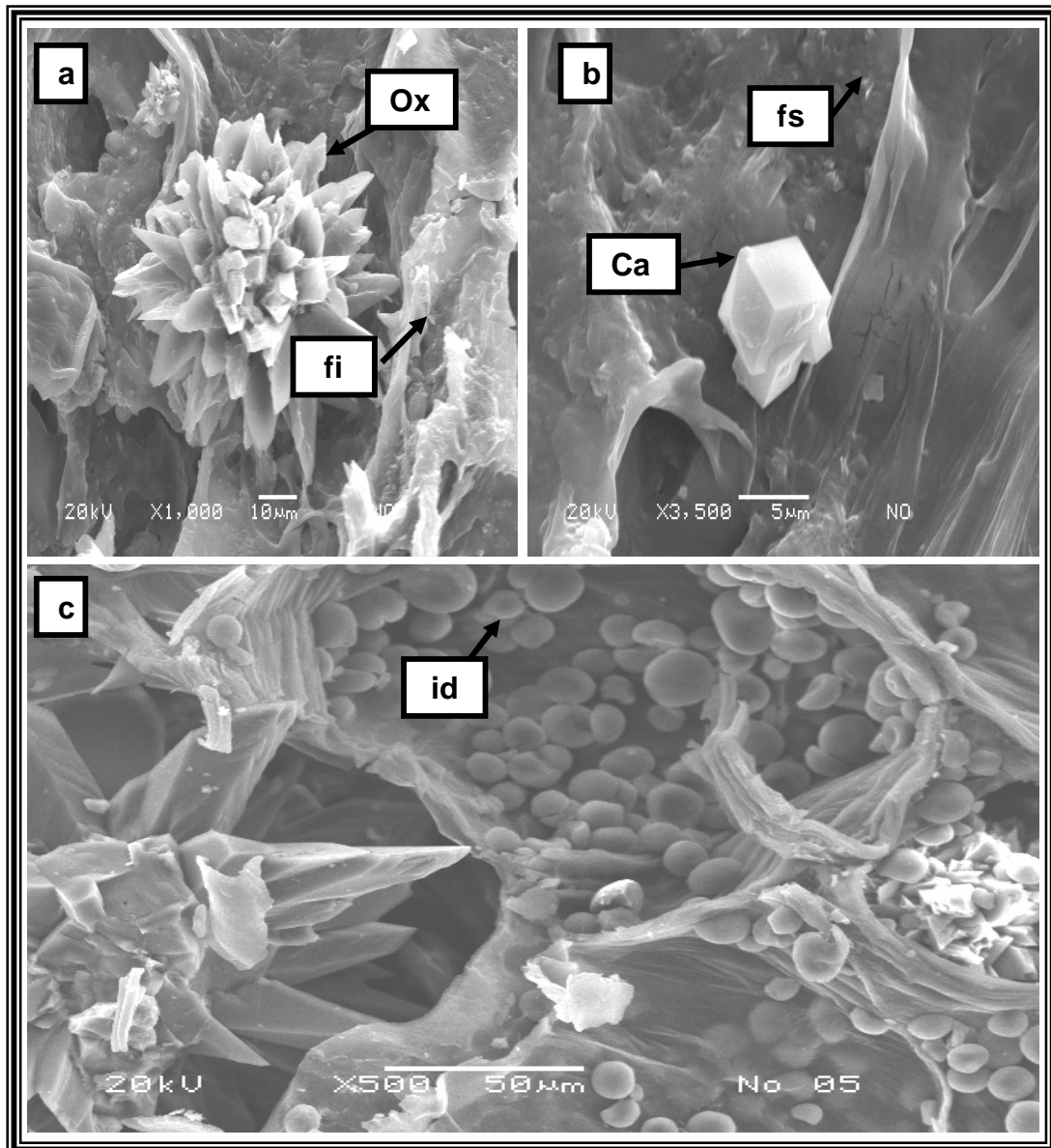


Figura 3.19 Micrografías de la suspensión de nopal deshidratado. **Figura 3.19 a)** Micrografía a 1000 aumentos evidenciando oxalatos. **Figura 3.19 b)** Micrografía a 3500 aumentos evidenciando la presencia de carbonatos de calcio. **Figura 3.19 c)** Micrografía de suspensión de nopal deshidratado a 500 aumentos con presencia de idioblastos

Como se aprecia en la figura 3.19, en la suspensión de nopal deshidratado se identificaron sales de calcio tales como oxalatos y carbonatos de calcio.

Tal como se observa en la figura 3.19 a, la morfología de los oxalatos (**Ox**) fue tomada a 1000 aumentos, éstas sales de calcio tienen forma de drusas, las cuales se empezaron a observar incluso en micrografías desde 50 aumentos, lo cual nos indica que los tamaños de estos compuestos son grandes comparados con los de los carbonatos de calcio. En todas las micrografías analizadas, se observó que los oxalatos de calcio se esconden dentro de la fibra insoluble (**fi**), que es lo que se puede apreciar en el fondo de la imagen y que tienen un tamaño mayor a 10 μm .

La figura 3.19 b muestra claramente la presencia de carbonatos de calcio (**Ca**) en la suspensión de nopal deshidratado, cabe destacar que en las micrografías evaluadas estos compuestos se observan por arriba de los 1000 aumentos, lo cual evidencia que son sales de tamaños mucho menores que los oxalatos. Éstos compuestos se encuentran asociados con las fibras solubles (**fs**) y su tamaño llega a ser hasta de 5 μm (Contreras-Padilla *et al.*, 2010).

Se pueden observar las células especializadas en donde se almacena el mucílago llamadas idioblastos (**id**) en la figura 3.19 c, las cuales se aprecian como pequeñas esferas de forma globular, además de que también hay pequeños cristales de oxalato y de carbonato de calcio en dicha figura (Hiperbotánica, 2001).

Ginestra *et al.* (2009) señalaron que los cladodios de *O. ficus-indica* contienen grandes cantidades de cristales de oxalato de calcio (CaC_2O_4) y estos están presentes en todos los tejidos. Se ha demostrado que el tamaño de los cristales de oxalato va en aumento en función de la maduración del cladodio.

Es quizá por dicha razón que en las micrografías de la suspensión hay presencia de dichos cristales, ya que los cladodios de nopal solamente fueron deshidratados y no recibieron otro tratamiento. Por otra parte los cladodios de nopal empleados tenían un estadio de madurez de 100 días (400 g) lo que indica que ya no eran

comestibles para el hombre sino más bien para uso como forraje lo que puede explicar el tamaño del oxalato encontrado.

Las micrografías obtenidas de la fracción insoluble se presentan a continuación en la figura 3.20.

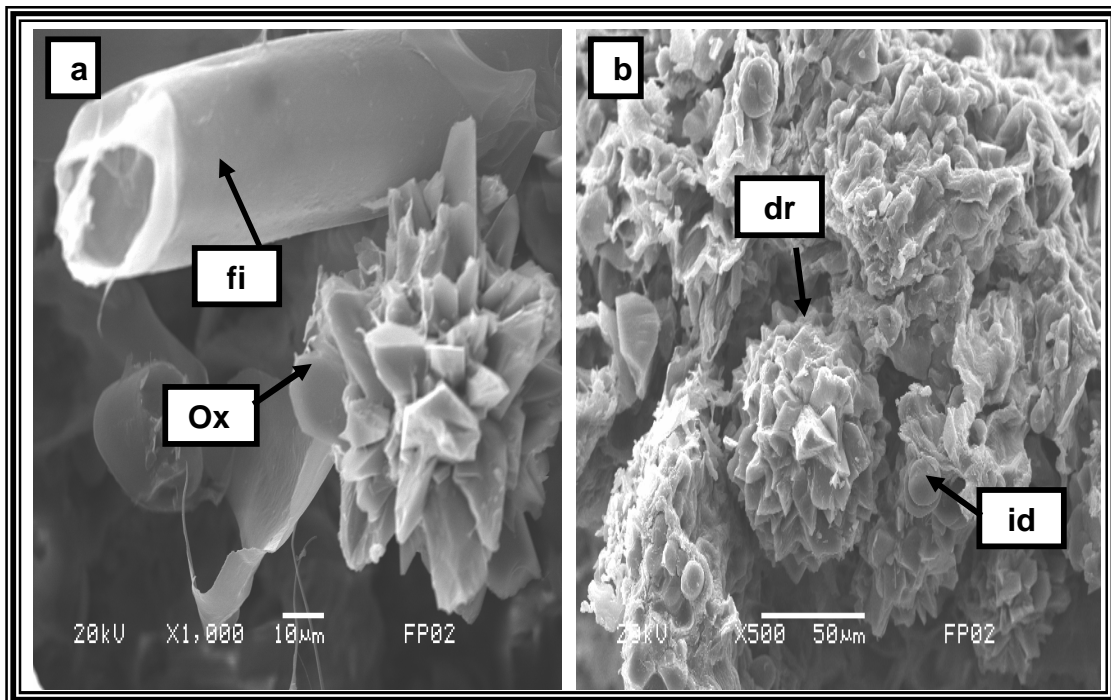


Figura 3.20 Micrografías correspondientes a la fracción insoluble de nopal. Figura 3.20 a) Micrografía de fracción insoluble a 1000 aumentos. Figura 3.20 b) Micrografía de fracción insoluble a 500 aumentos

En la figura 3.20 se presentan las micrografías obtenidas de la fracción insoluble del nopal, es decir de la fase pesada obtenida después de haber llevado a cabo la centrifugación.

La figura 3.20 a fue tomada a 1000 aumentos y muestra como los oxalatos se incrustan y se pegan a la fibra insoluble que es la que se indica con una flecha. Esta fibra tiene una forma alargada e igualmente se puede ver que el cristal de oxalato de calcio es grande.

En la figura 3.20 b se pueden apreciar varias drusas (**dr**) típicas de sales de oxalato; en esta misma figura se observan a los idioblastos (**id**), los cuales tienen una forma globular pequeña. Dicha imagen se obtuvo a 500 aumentos y los conglomerados de oxalatos llegan a medir hasta 50 μm .

De la fracción soluble se obtuvieron las micrografías que se muestran a continuación en la figura 3.21.

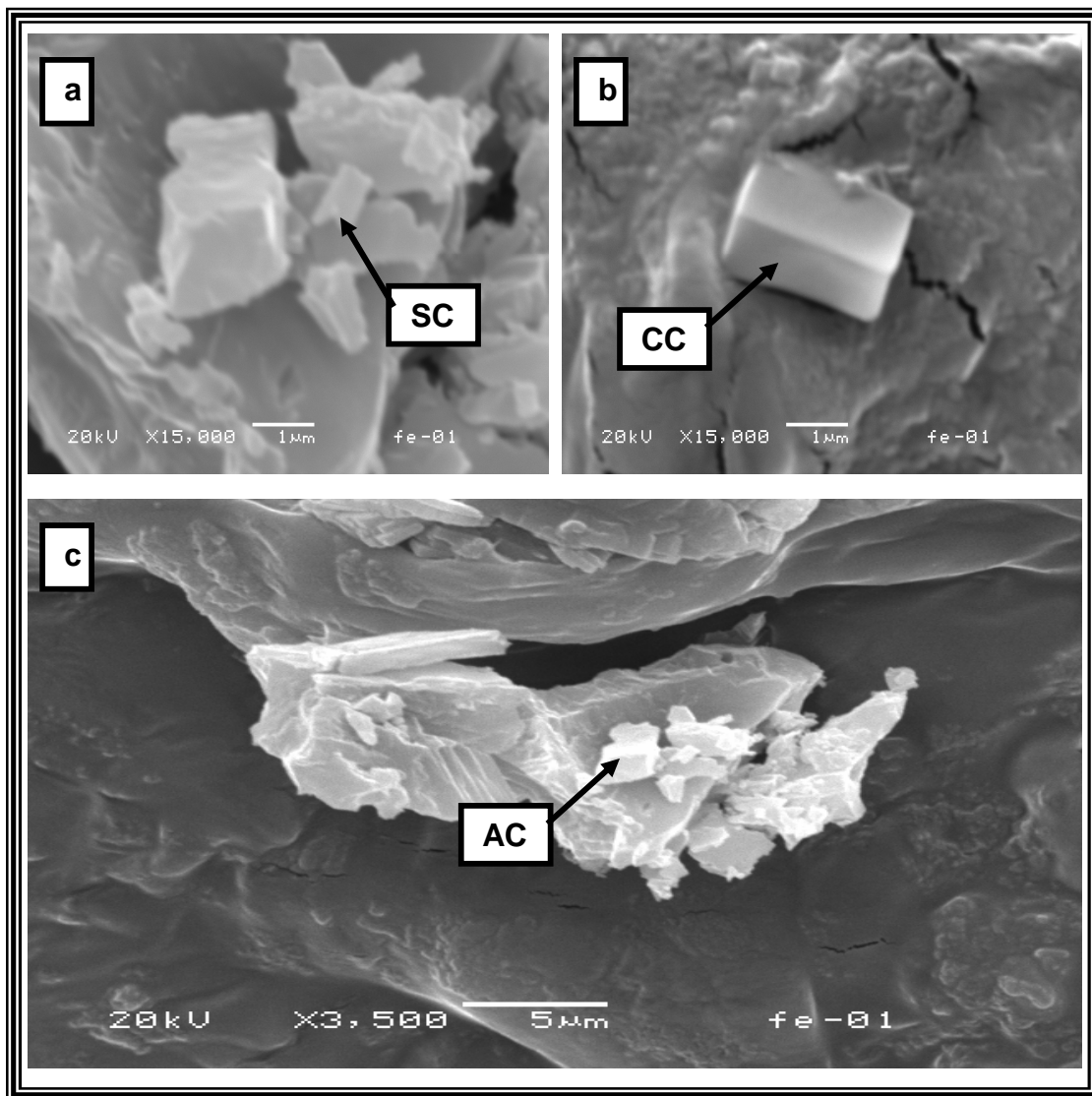


Figura 3.21 Micrografías correspondientes a la fracción soluble de nopal. Figura 3.21 a) Micrografía de fracción soluble a 15000 aumentos. Figura 3.21 b) Micrografía de fracción soluble a 15000 aumentos con cristal de calcio. Figura 3.21 c) Micrografía de fracción soluble a 3500 aumentos con presencia de acumulaciones de calcio

En la figura 3.21 a, aunque la imagen no es de buena calidad, se puede presenciar la acumulación de sales de calcio (**SC**), aunque no se identifica perfectamente de que tipo son. Ésta micrografía se tomó con 15000 aumentos, por lo que dichas sales son de tamaños muy pequeños que van desde 1µm.

Por otra parte, en la figura 3.21 b, la cual también muestra una micrografía tomada a 15000 aumentos, se puede ver un cristal de calcio (**CC**) perfectamente definido.

En la fracción soluble también se pudieron observar otro tipo de acumulación de calcio (**AC**), las cuales se tratan de carbonato de calcio, éstas acumulaciones se pueden ver en la figura 3.21 c.

En la fracción soluble no hay presencia de oxalatos de calcio, aunque si de carbonato de calcio y otras sales.

Finalmente se obtuvieron las micrografías del mucílago de nopal deshidratado, las cuales se presentan en la figura 3.22.

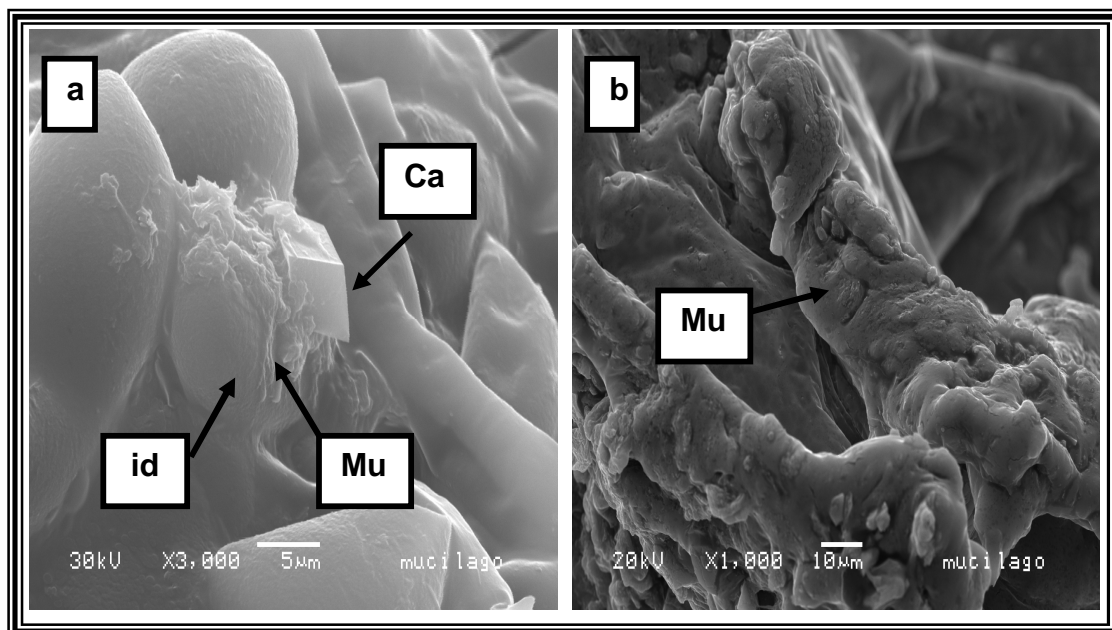


Figura 3.22 Micrografías correspondientes a mucílago de nopal deshidratado. Figura 3.22 a) Micrografía de mucílago a 3000 aumentos evidenciando carbonato de calcio e idioblastos. Figura 3.22 b) Micrografía de mucílago a 1000 aumentos

En la figura 3.22 a, se evidencia la presencia de carbonatos de calcio (**Ca**) en el mucílago, así mismo se observa como los idioblastos (**id**) sirven como depósitos de dichos compuestos, también se puede apreciar el rompimiento de idioblastos y el desprendimiento de mucílago de los mismos. En la figura 3.22 b, se aprecia la estructura del mucílago (**Mu**), éste solo contiene carbonato de calcio.

3.13 Cuantificación de la concentración de calcio por Espectrofotometría de Absorción Atómica

Las técnicas espectroscópicas de análisis se basan en la excitación del analito a un estado de energía superior mediante la absorción de energía térmica, eléctrica o radiante. La palabra espectrometría se utiliza para los casos en que se mide la intensidad de radiación de una longitud de onda determinada absorbida por la muestra. La espectrometría atómica se basa en la absorción o emisión de radiación por átomos o iones elementales. Existen dos regiones del espectro que proporcionan información atómica (la ultravioleta-visible y la de los rayos X) (Guiteras *et al.*, 2003).

La cuantificación de la concentración de calcio se llevó a cabo por la técnica de espectrofotometría de absorción atómica para muestras de suspensión, fracción soluble, fracción insoluble y mucílago de nopal, mediante un espectrofotómetro de absorción atómica de doble haz (Analyst 300, Perkin Elmer, USA) equipado con una lámpara de deuterio de cátodo hueco con corrector de trasfondo.

Los resultados obtenidos de contenido de calcio para cada una de las muestras se presentan en el cuadro 3.7.

Cuadro 3.7 Contenido de calcio en las diferentes fases obtenidas

Muestra	Suspensión	Fracción insoluble	Fracción soluble	Mucílago
Resultado (mg/g)	32.32	13.08	19.23	18.76

Como se puede observar en el cuadro 3.7, los resultados obtenidos se reportan en miligramos de calcio por cada gramo de muestra. La suspensión de nopal deshidratado presenta la mayor cantidad de calcio en comparación con las demás fases obtenidas.

En la fracción insoluble (sólidos insolubles) se obtuvo una concentración de calcio más baja en comparación con la suspensión, mientras que en la fracción soluble (sólidos solubles), donde se encuentra contenido el mucílago, se presentó una mayor concentración de dicho compuesto en comparación con la fracción insoluble. La cantidad de calcio de la fracción insoluble y la soluble constituyen el total de la concentración de calcio presente en la suspensión.






Dichos resultados se pueden explicar debido a que en la suspensión de nopal se encuentra contenida la mayor cantidad de calcio, encontrándose en ésta oxalatos y carbonatos de calcio como se aprecia en las micrografías de las figuras 3.19 a y b presentadas en el apartado de microscopía electrónica de barrido. Al someter la suspensión de nopal deshidratado a la fuerza centrífuga, una mayor cantidad de calcio se libera hacia la fracción soluble (fase ligera), es decir, a la fracción menos densa y éste fue el carbonato de calcio ya que es más soluble en agua, además de que el tamaño de éstos cristales es diminuto, igualmente éstos datos se pueden correlacionar con las micrografías presentadas en microscopía electrónica de barrido en las figuras 3.21 a, b y c.

La fracción insoluble presentó menor cantidad de calcio, ya que en ésta, de acuerdo a los resultados obtenidos de las micrografías de las figuras 3.20 a y b, hay presencia de oxalatos de calcio los cuales son cristales de mayor tamaño y son insolubles en agua, por lo que pueden estar retenidos en los sólidos insolubles que quedan en dicha fracción.

El mucílago presentó menor cantidad de calcio que la fracción soluble porque de ahí se extrae el agua. El alcohol eliminado después de la precipitación pudo haberse llevado una fracción de carbonato de calcio presente en el mucílago.

Esto quiere decir que los nopales con estadíos de maduración de 400 g presentan mayor cantidad de carbonato de calcio, que de oxalatos de calcio, porque el carbonato de calcio solo se encontró en el mucílago, y el oxalato de calcio en la fracción insoluble de los nopales.

CONCLUSIONES









-  Las mejores condiciones para la extracción de mucílago de nopal fueron a velocidades de giro altas, es decir a 5000 rpm, velocidad de alimentación baja 200 mL/min y con tornillo de restricción totalmente cerrado (0 mm), lo que se corroboró tanto con los gráficos de los resultados obtenidos de la experimentación y el diseño factorial. Los clarificados obtenidos a estas condiciones de operación dieron el mucílago de mejor calidad ya que como se mencionó en el análisis de resultados, éstos presentaron un valor mayor de luminosidad (L), menor densidad, valores bajos de turbidez, una menor cantidad de sólidos totales y un mayor tiempo de residencia.
-  La velocidad de giro, velocidad de alimentación así como la altura de tornillos de restricción no presentaron interacciones en ninguno de los niveles trabajados ni en sus combinaciones, sin embargo, tanto los efectos principales como las combinaciones entre factores tienen un efecto significativo, de acuerdo a lo mostrado en las tablas de ANOVA.
-  La metodología de extracción de mucílago de nopal deshidratado empleada da un mayor rendimiento que lo reportado para nopal fresco. Es decir se obtiene una mayor cantidad de mucílago cuando se ocupa nopal deshidratado que es de un 15.057 %.
-  La metodología de extracción empleada es económica, además de que el solvente utilizado (etanol) es amigable con el medio ambiente, fácil de adquirir e inocuo.
-  El mucílago de nopal deshidratado presentó las mejores propiedades reológicas a todas las concentraciones de las disoluciones trabajadas, es decir su viscosidad es más alta que la del de mucílago de nopal fresco. Para ambos mucílagos, a partir de concentraciones de 1%, se observó un comportamiento reofluidificante (pseudoplástico), ya que los valores de n van disminuyendo y los valores de K aumentan conforme se incrementa la concentración de las disoluciones.

-
- 🌵 Las sales de calcio que se encuentran presentes en la suspensión de nopal son carbonatos y oxalatos de calcio, mientras que en la fase pesada o fracción de sólidos insolubles son únicamente oxalatos de calcio. Los carbonatos se encuentran asociados con la fase ligera o fracción soluble y mucílago.
 - 🌵 Se presenta una mayor concentración de calcio tanto en la fracción soluble como en el mucílago de nopal, esto puede ser debido a que dicho compuesto tenga una menor densidad y sea más afín a esta fase, por el contrario los sólidos arrastran la poca cantidad de oxalatos presentes en la suspensión.










RECOMENDACIONES












- 🌵 Para el caso de la reología, interesa comparar el comportamiento reológico así como la viscosidad aparente de nopal fresco y de nopal deshidratado. Se propone que se lleve a cabo un estudio más a fondo en cuanto a las propiedades reológicas y viscoelásticas del mucílago de nopal deshidratado, en un equipo de cono y plato.
- 🌵 Se debe llevar a cabo un estudio más profundo sobre el mucílago de nopal extraído por el método empleado para saber que tanto son afectadas sus propiedades tanto físicas como químicas y de reología al someter el nopal a un deshidratado y molienda previos.
- 🌵 Si se cuenta con un equipo de destilación, se puede llevar a cabo la separación del alcohol empleado en la fracción soluble, esto con el objetivo de que no se tire y pueda ser reutilizado.
- 🌵 Se recomienda trabajar con nopales a diferentes estadíos de maduración para saber si la concentración de mucílago aumenta o disminuye con la edad de los cladodios, así como su concentración de calcio.
- 🌵 Realizar estudios en nopales frescos igualmente con diferentes estadíos de maduración para extraer mucílago.











REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS








-  AOAC. (2000). Official Methods of Analysis of AOAC International, Seventeenth ed. AOAC, Gaithersburg MD, USA.
-  Arenas, A. J. A. (1999). Microscopía electrónica de barrido de bajo vacío. Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ). UNAM. México, D. F. p.13-35.
-  Arizmendi Cotero, D. (2004). Optimización de dos compuestos plastificantes (glicerol y polietilenglicol) en la elaboración de una película plástica comestible obtenida a partir del mucílago de nopal de la especie *Opuntia tomentosa* Salm-Dyck. Universidad Autónoma del Estado de México. Consultado el 16 de Marzo de 2010. Disponible en:
http://www.pncta.com.mx/pages/pncta_investigaciones_04h.asp?page=04e12#up
-  Balderas, M. E. (2009). Composición nutrimental y contenido de taninos en el nopal (*Opuntia Ficus Indica*) en diferentes estadios de maduración. Querétaro. p. 11-13. Tesis (Licenciado en nutrición). Universidad Autónoma de Querétaro. Facultad de Ciencias Naturales.
-  Basurto Santos, D.; Lorenzana–Jiménez, M.; Magos Guerrero, G. A. (2006). Utilidad del nopal para el control de la glucosa en la diabetes mellitus tipo 2. *Revista Facultad de Medicina UNAM*. **49**(4): 157–161.
-  Calvo-Ayne, A. O. (2008). Mapas de referencia y propiedades reológicas de cuatro cultivares de nopalito (*Opuntia* spp.). Texcoco, Edo. de México. p. 33-34. Tesis (Ingeniero Agroindustrial), UACH. Ingeniería Agroindustrial.
-  Calderón-Paniagua, N.; Estrada-Luna, A. A.; Martínez-Hernández, J. de J. (2001). Efecto de la salinidad en el crecimiento y absorción nutrimental de plantas micropropagadas de nopal (*Opuntia* spp.). *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. **7** (2): 127-132.
-  Cárdenas, A.; Higuera-Ciapara, I.; Goycoolea, F. (1997). Rheology and aggregation of cactus (*Opuntia ficus-indica*) mucilage in solution. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*. **2** : 152-159.
-

-
- 🌵 CONAZA. (1994). Nopal Tunero *Opuntia* spp. INE. México.
- 🌵 Contreras-Padilla, M.; Pérez-Torrero, E.; Hernández-Urbiola, M. I.; Hernández-Quevedo, G.; del Real, A.; Rivera-Muñoz, E. M.; Rodríguez-García, M. E. (2010). Evaluation of oxalates and calcium in nopal pads (*Opuntia ficus-indica* var. *redonda*) at different maturity stages. *Journal of Food Composition and Analysis*. **24**: 38-43.
- 🌵 Cornejo-Villegas, M. A.; Acosta-Osorio, A. A.; Rojas-Molina, I.; Gutiérrez-Cortez, E.; Quiroga, M.A.; Gaytan, M.; Herrera, G.; Rodríguez-García, 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.
- 🌵 Corrales, G. J. (2002) Fisiología y Tecnología Postcosecha del Fruto de Tuna y del Nopal Verdura. Reporte de investigación. CIESTAAM. UACH. p. 29-35.
- 🌵 Del-Valle, V.; Hernández-Muñoz, P.; Guarda, A.; Galotto, M. J. (2005). Development of a cactus-mucilage edible coating (*Opuntia ficus indica*) and its application to extend strawberry (*Fragaria ananassa*) shelf-life. *Food Chemistry*. **91**: 751-756.
- 🌵 FAO. (2006). Utilización agroindustrial del nopal. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia. Boletín 162.
- 🌵 Galati, E. M.; Pergolizzi, S.; Miceli, N.; Monforte, M. T.; Tripodo, M. M. (2002). Study on the increment of the production of gastric mucus in rats treated with *Opuntia ficus indica* (L.) Mill. cladodes. *Journal of Ethnopharmacology*. **83**: 229-233.
- 🌵 Ginestra, G.; Parker, M.; Bennett, R. N.; Robertson, J.; Mandalari, G.; Narbad, A.; Curto, R.; Bisignano, G.; Faulds, C. B.; Waldron, K. (2009). Anatomical, Chemical, and Biochemical Characterization of Cladodes from Prickly Pear (*Opuntia ficus-indica*) (L.) Mill.]. *Journal Agricultural and Food Chemistry*. **57**: 10323-10330.
-

-
-  Goldstein, G.; Andrade, J. L.; Nobel, P. S. (1991). Differences in water relations parameters for the chlorenchyma and the parenchyma of *Opuntia ficus-indica* under wet versus dry conditions. *Australian Journal of Plant Physiology*. **18**: 95-107.
-  González, G. S.; Ruiz, V. M. R.; Hernández, B. E. M. (2003). Guía de Microscopía Electrónica. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán. México. p. 1.
-  Granados, S. D. (2003). El nopal. Historia, Fisiología, Genética e importancia frutícola. Trillas. México.
-  Guiteras, J.; Rubio, R.; Fonrodona, G. (2003). Curso Experimental en Química Analítica. SINTESIS. España. 2003. p. 65-66.
-  Guzmán, L. D. y Chávez, J. (2007). Estudio bromatológico del cladodio del nopal (*Opuntia ficus-indica*) para el consumo humano. *Revista Sociedad Química Perú*. **73** (1): 41-45.
-  Hiperbotánica. (2001). www.hiperbotnica.net/. Recuperado el 16 de junio de 2011.
-  Huerta, G. A. y Montes de la rosa, M. I. (2003). Contenido de mucílago en 10 variantes de nopal verdura (*Opuntia* spp.) y sus efectos en las propiedades físicas y texturales. p. 49-51. Tesis (Ingeniero Agroindustrial), UACH. Ingeniería Agroindustrial. México.
-  León, M. F. M. (2010). Secado por aspersion de mucílago de nopal (*Opuntia ficus indica*) y su efecto en las propiedades reológicas de los polvos reconstituidos. Tesis (Maestría en ciencias en conservación y aprovechamiento de recursos naturales). IPN. México. Consultado el 24 de Septiembre de 2011. Disponible en:
http://www.cidiroax.ipn.mx/pdf/posgrado/10A_MANUEL_LEON_MARTINEZ.pdf
-  Loubet, G. A. L. (2008). Biodisponibilidad de calcio presente en harina de nopal (*Opuntia Ficus Indica*) en función de su estadio de maduración. Mineral de la Reforma, Hidalgo. 100 p. Tesis (Licenciada en nutrición), UAEH. Instituto de ciencias de la salud. México.
-

-
-  Magloire, F. J.; Konarski, P.; Zou, D.; Conrad, S. F.; Zou, C. (2006). Nutritional and medicinal use of Cactus pear (*Opuntia* spp.) cladodes and fruits. *Frontiers in Bioscience*. **11**: 2574-2589.
-  Matsuhira, B.; Lillo, L. E.; Sáenz, C.; Urzúa, C. C.; Zárate, O. (2006). Chemical characterization of the mucilage from fruits of *Opuntia ficus indica*. *Carbohydrate Polymers*. **63**: 263–267.
-  Medina-Torres, L., Brito-De la Fuente, E., Torrestiana-Sánchez, B. y Katthain, R. (2000). Rheological properties of the mucilage gum (*Opuntia ficus-indica*). *Food Hydrocolloids*. **14**: 417-424.
-  Medina-Torres, L. (2005). Estudio reológico de mucílago de nopal y su efecto sinérgico con otros hidrocoloides de uso alimenticio. Tesis UNAM. Posgrado en Ciencias Químicas. México. p. 102.
-  Medina-Torres, L.; Gallegos-Infante, J. A.; González-Laredo, R. F.; Rocha-Guzmán, N. E. (2007). Drying kinetics of nopal (*Opuntia ficus-indica*) using three different methods and their effect on their mechanical properties. *Food Science and Technology*, **41**(7):1183-1188.
-  Méndez, A. (2011). Turbidez. En línea 11 enero 2011 <http://quimica.laguia2000.com/propiedades/turbidez> Consultado el 26 de febrero de 2011.
-  Muller, H. G. (1973). Introducción a la reología de los alimentos. Acribia. España. p. 74-77.
-  Nobel, P. S.; Cavelier, J.; Andrade, J. L. (1992). Mucilage in cacti: Its apoplastic capacitance, associated solutes, and influence on tissue water relations. *Journal of Experimental Botany*. **43**: 641-648.
-  Orozco Álvarez, C.; Yáñez Fernández, J.; Hernández Rodríguez, E. (2005). XI Congreso Nacional de Biotecnología y Bioingeniería. Mérida, Yucatán.
-  Ríos, R. J. y Quintana, M. V. (2004) Manual del Participante, Manejo General del Cultivo del Nopal. Colegio de Postgraduados. Secretaria de la Reforma Agraria. p. 8-10.
-  Rodríguez, F. H. (2009). Cultivo orgánico del nopal. Trillas. México. p. 19.
-

-
-  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 dry vacuum nopal powders as a function of the maturation. *Plant Foods Human Nutrition*. **62**: 107-112.
-  Roudot, A C. (2004) Reología y análisis de la textura de los alimentos. Acribia. España. p. 59-61.
-  Ruiz, F. (2009). Aplicación de películas comestibles a base de quitosano y mucílago de nopal en fresa (*Fragaria ananassa*) almacenada en refrigeración. p. 22-23. Tesis (Maestría en ciencia de alimentos). Universidad de las Américas Puebla, México.
-  Sáenz, C. y Sepúlveda, E. (1993). Alternativas de industrialización de la tuna (*Opuntia ficus-indica*). *Alimentos*. **18**(3): 29-32.
-  Saenz, C. (2000). Processing technologies: an alternative for cactus pear (*Opuntia* spp.) fruits and cladodes. *Journal of Arid Environments*. **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.
-  SAGARPA. (2008). Servicio de información agroalimentaria y pesquera. Estadística básica. Anuario estadístico de la producción agrícola de los Estados Unidos Mexicanos.
-  Sánchez, H. (1978). Las Cactáceas de México. 2 ed. Vol. 1. UNAM. México. p. 30-33; 62-69.
-  Sepúlveda, E.; Sáenz, C.; Aliaga, E.; Aceituno, C. (2007). Extraction and characterization of mucilage in *Opuntia* spp. *Journal of Arid Environments*. **68**: 534–545.
-  Steffe, F. J. (1996). Rheological Methods in Food Process Engineering. 2^a ed. Freeman Press, East Lansing, M.I, USA. p. 19-27.
-

-
-  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.
-  Trachtenberg, S. y Mayer, M. A. (1981). Composition and properties of *Opuntia Ficus-Indica* mucilage. *Phytochemistry*. **20**(12): 2665-2668.
-  Valdez Cepeda, R. D.; Blanco, M. F.; E. Vázquez Alvarado, R. E.; Magallanes Quintanar, R. (2008). Producción y usos del nopal para verdura. *Revista Salud Pública y Nutrición*. **14**: 1-19.
-  Vázquez, N. G. y Echeverría, O. (2000). Introducción a la Microscopía Electrónica aplicada a las ciencias biológicas. Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México. Fondo de Cultura Económica. México. p. 93.
-  Vega, H. N. Y. (2007). Empleo de cubiertas comestibles en nopalito desespinado (*Opuntia sp.*) de la variedad Milpa Alta. p. 7. Tesis (Ingeniero Agroindustrial). Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de Ingeniería Agroindustrial, México.
-  Wayne, W. D. (1994). Bioestadística. Base para el análisis de las ciencias de la salud. 3ª ed. LIMUSA. México. p. 322-325.
-  Yacamán, M. J. y Reyes, G. J. (1995). Microscopía electrónica una visión del microcosmos. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. Fondo de Cultura Económica. México. p. 34-36.

ANEXO I

Gráficos de interacciones de las variables de respuesta con respecto a los factores empleados (velocidad de giro, velocidad de alimentación y altura de tornillo).

En la figura 1 se representa el diagrama de interacciones de todos los factores con respecto a la variable de respuesta volumen de clarificado.

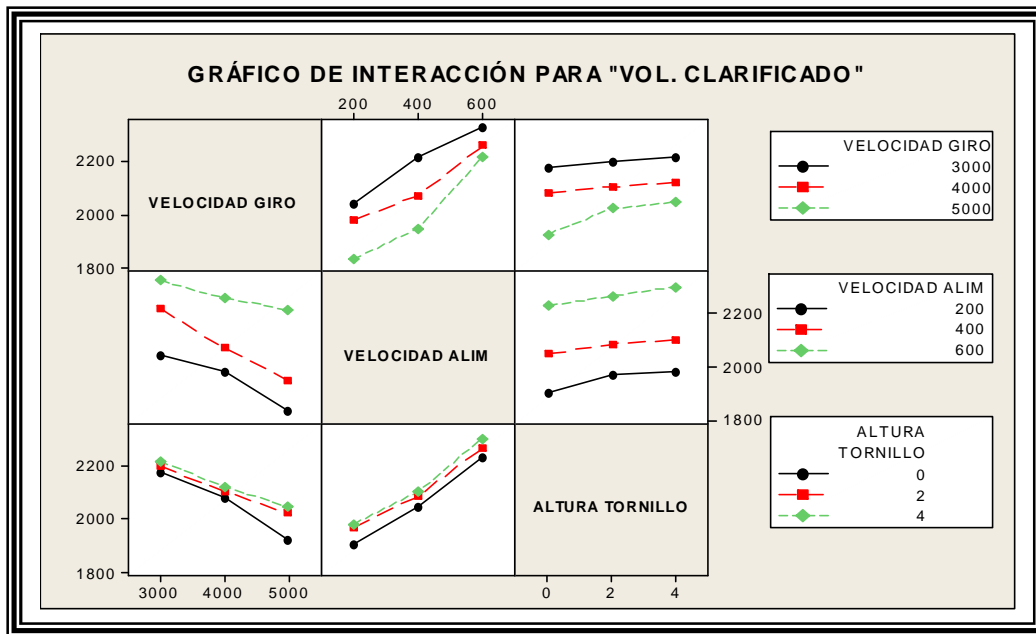


Figura 1. Diagrama de interacciones para la variable de respuesta volumen de clarificado

Como se puede apreciar en la figura 1, no existe interacción entre los factores a esos niveles de variación. Sin embargo de lado izquierdo del diagrama se aprecia que a una velocidad de alimentación de 200 y 400 mL/min y altura de tornillo de 2 y 4 mm en esos puntos tienen el mismo efecto sobre la cantidad de volumen clarificado obtenido. Para la interacción entre las variables velocidad de giro y altura de tornillo, se tiene el mismo efecto cuando hay velocidades de 3000 y 4000 rpm a altura de tornillo 0 y por otra parte a las tres velocidades de giro con altura de tornillo 2 y 4.

El diagrama de interacciones de todos los factores con respecto a la variable de respuesta Luminosidad (L), se representa en la figura 2.

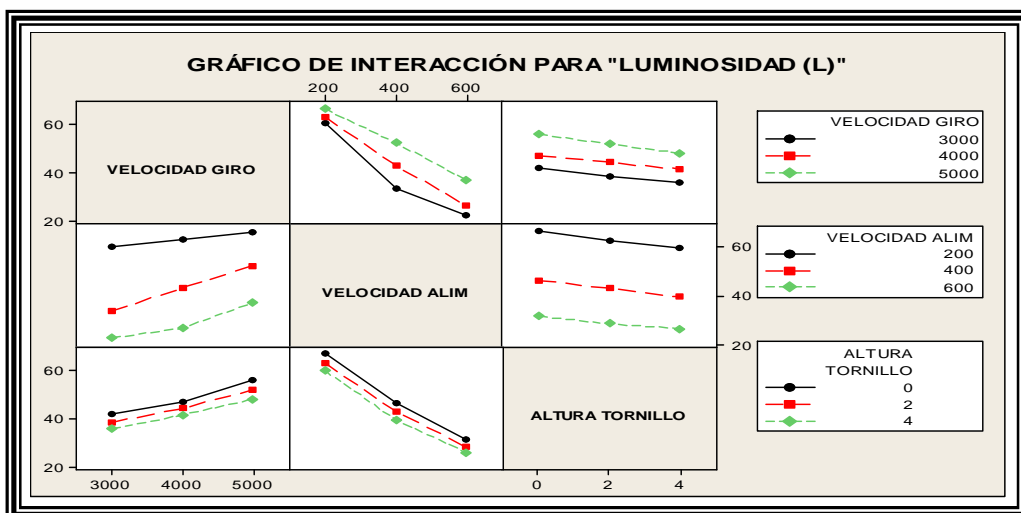


Figura 2. Diagrama de interacciones para la variable de respuesta Luminosidad (L)

En esta figura, se puede observar que no hay interacción entre los factores, sin embargo en la combinación de velocidad de alimentación con respecto a la velocidad de giro casi llegaban a tener el mismo efecto a una velocidad de 200 mL/min y velocidad de giro de 3000 y 4000 rpm.

Para la variable de respuesta densidad, el diagrama de interacciones se presenta en la figura 3.

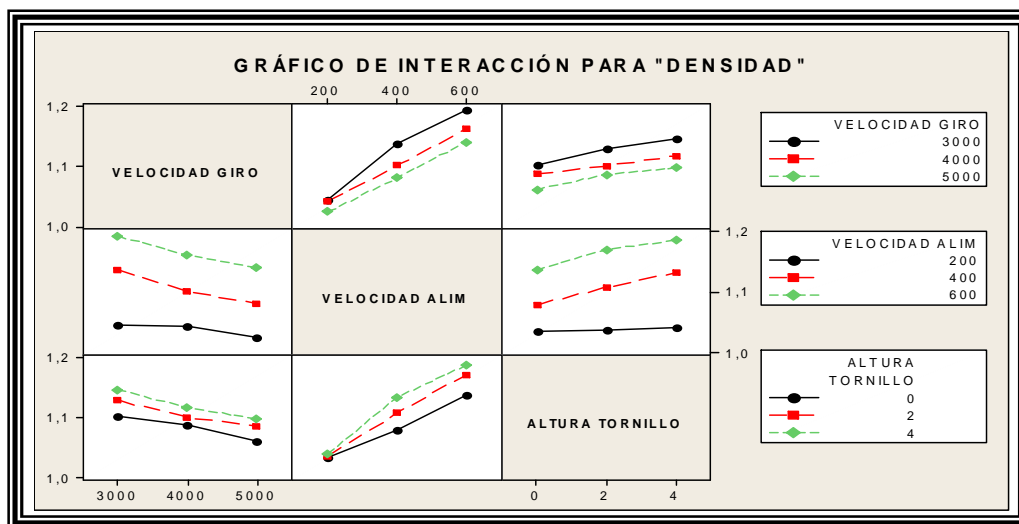


Figura 3. Diagrama de interacciones para la variable de respuesta densidad

De lado derecho en la figura 3, se puede ver que no existe interacción entre ellos cuando se combinan velocidad de alimentación y velocidad de giro con la altura de tornillo, sin embargo la interacción entre la velocidad de giro y la de alimentación se da en un solo punto que es a 200 mL/min en 3000 y 4000 rpm, en ese punto se presenta el mismo efecto en el valor de la densidad. De lado izquierdo del diagrama a una velocidad de alimentación de 200 mL/min y a las tres alturas de tornillo se presenta el mismo efecto sobre la densidad. Al combinar velocidad de giro con altura de tornillo de 2 y 4 mm se puede ver que casi presentan el mismo efecto en los tres puntos sobre el valor de la densidad pero no hay interacción entre ellos.

Para la variable de respuesta turbidez, el diagrama de interacciones se presenta en la figura 4.

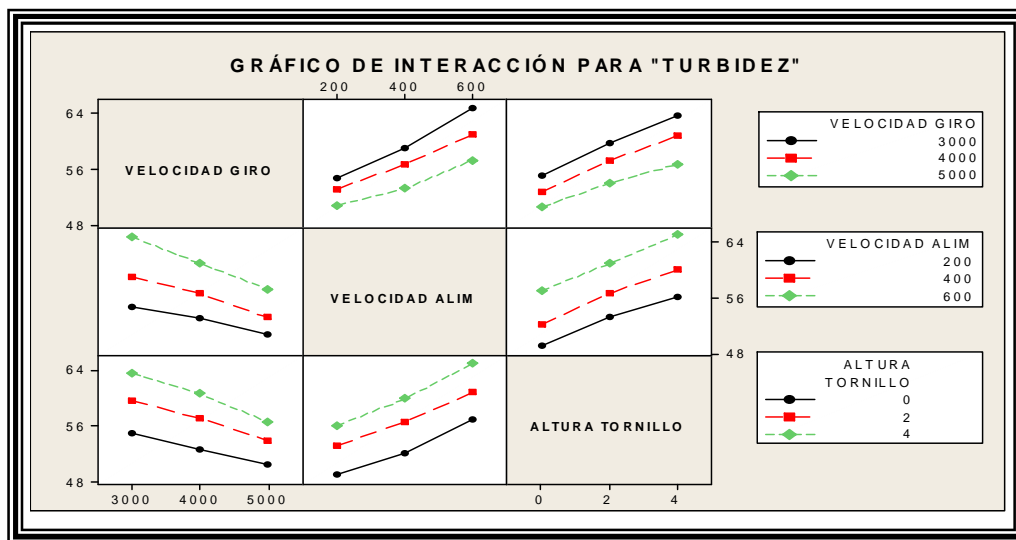


Figura 4. Diagrama de interacciones para la variable de respuesta turbidez

En la figura 4, se presenta la matriz de interacciones para todos los factores, sin embargo como se aprecia no hay interacción entre ninguna combinación de los mismos.

En la figura 5, se presenta el diagrama de interacciones para la variable de respuesta sólidos totales.

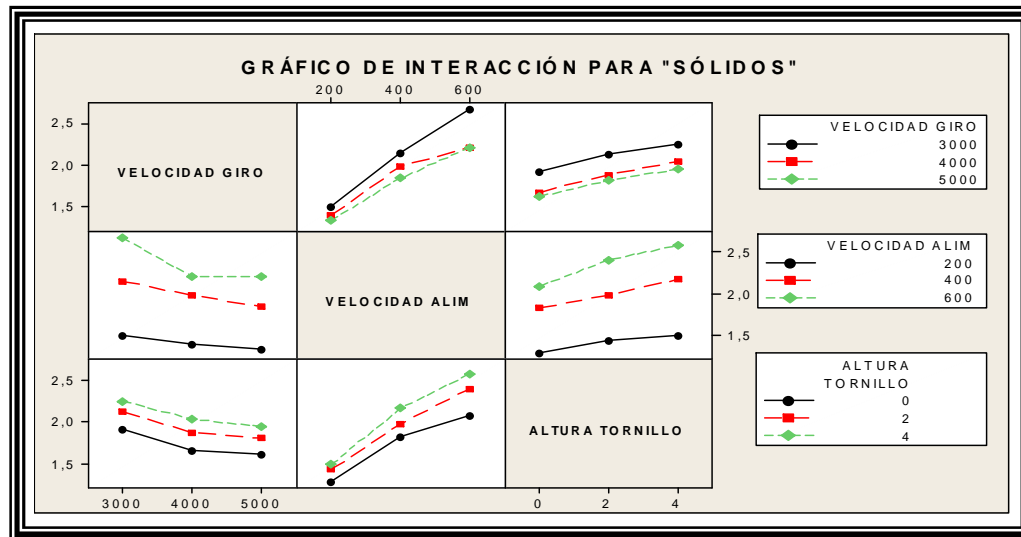


Figura 5. Diagrama de interacciones para la variable de respuesta sólidos totales

Como se puede ver de lado derecho a una velocidad de alimentación de 200 y 600 mL/min con velocidades de giro de 4000 y 5000 rpm, se presenta el mismo efecto en esos puntos para el valor obtenido de sólidos totales. Al combinar la velocidad de giro con la altura de tornillo también se puede ver que a velocidades de giro de 4000 y 5000 rpm y a las tres alturas de tornillo se presenta el mismo efecto sobre los valores de los sólidos totales. Para la combinación entre velocidad de alimentación y altura de tornillo no hay interacciones. De lado izquierdo no se presenta interacción al combinar las velocidades de giro y de alimentación, tampoco al combinar velocidad de giro con altura de tornillo, sin embargo a velocidad de alimentación de 200 mL/min y altura de tornillo de 2 y 4 mm, en ese punto se presenta el mismo efecto sobre la cantidad de sólidos obtenida.

El diagrama de interacciones para la variable de respuesta rendimiento de mucílago se presenta en la figura 6.

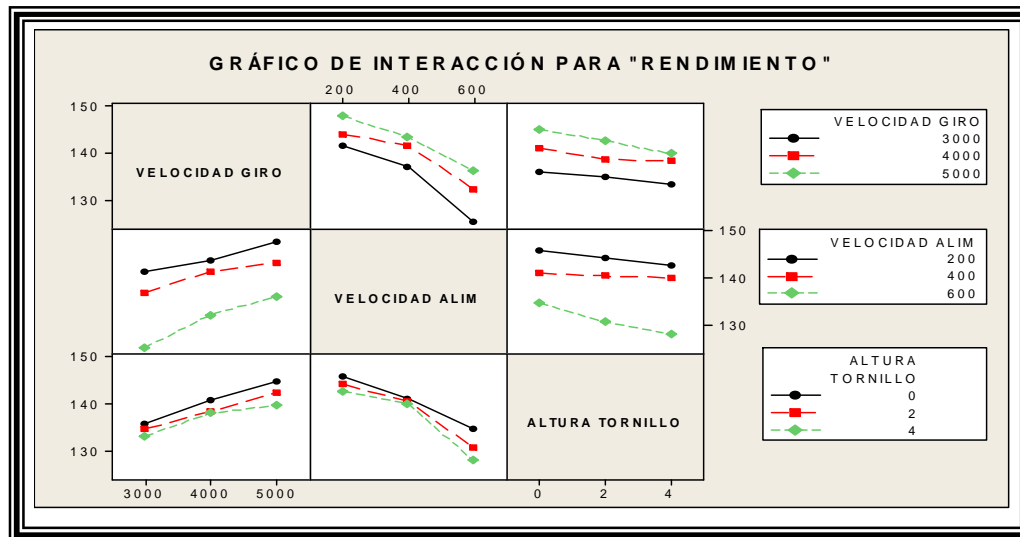


Figura 6. Diagrama de interacciones para la variable de respuesta rendimiento

Como se puede ver en la figura 6, de lado derecho de la matriz no se presentan interacciones entre las combinaciones de los diferentes factores. Sin embargo de lado izquierdo la combinación de velocidad de giro con velocidad de alimentación no presenta interacción, por el contrario al combinar una velocidad de giro de 3000 rpm con altura de tornillo de 0 y 2 mm, en este punto hay un mismo efecto para el valor de rendimiento obtenido. Igualmente a velocidad de giro de 4000 rpm y a altura de tornillo de 2 y 4 mm también se presenta el mismo efecto en ese punto sobre la variable de respuesta. En la combinación de los factores velocidad de alimentación y altura de tornillo se muestra el mismo efecto sobre el rendimiento a una velocidad de 400 mL/min y a las tres alturas de tornillo.

En la figura 7, se presenta el diagrama de interacciones para la variable de respuesta tiempo de residencia.

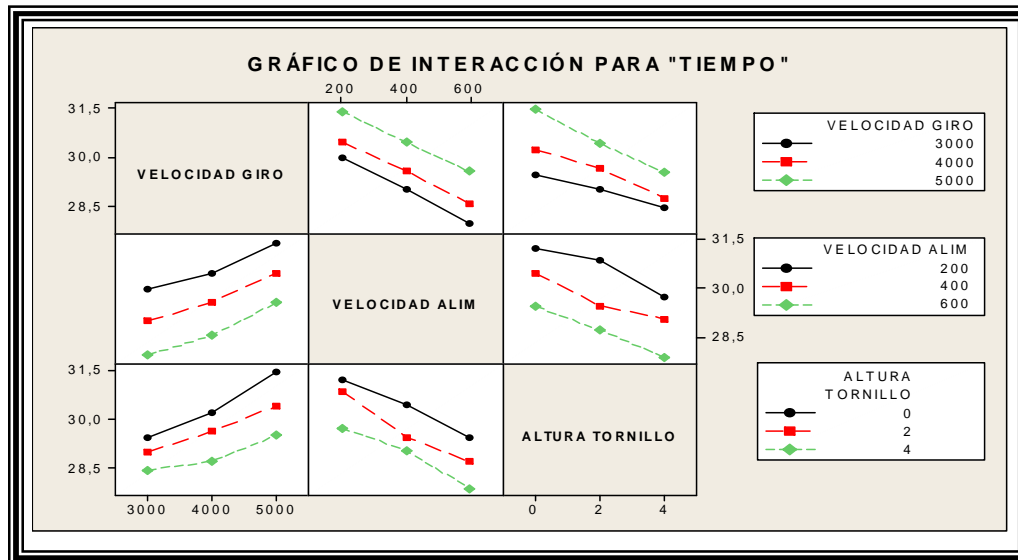


Figura 7. Diagrama de interacciones para la variable de respuesta tiempo de residencia

En la figura 7, se presenta la matriz de interacciones para todos los factores, sin embargo como se aprecia no hay interacción entre ninguna combinación de los mismos.

ANEXO II

Tablas de Análisis de Varianza (ANOVA), para las variables de respuesta volumen de clarificado, luminosidad, densidad, turbidez, sólidos totales, rendimiento y tiempo de residencia.

Tabla 1. Análisis de varianza para la variable de respuesta volumen de clarificado.

Analysis of Variance for Vol clarif, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
VELOCIDAD GIRO	2	520890	520890	260445	19679,14	0,000
VELOCIDAD ALIM	2	1345938	1345938	672969	50849,32	0,000
ALTURA TORNILLO	2	64008	64008	32004	2418,21	0,000
VELOCIDAD GIRO*VELOCIDAD ALIM	4	70031	70031	17508	1322,88	0,000
VELOCIDAD GIRO*ALTURA TORNILLO	4	24205	24205	6051	457,22	0,000
VELOCIDAD ALIM*ALTURA TORNILLO	4	3372	3372	843	63,70	0,000
VELOCIDAD GIRO*VELOCIDAD ALIM* ALTURA TORNILLO	8	14200	14200	1775	134,11	0,000
Error	54	715	715	13		
Total	80	2043357				

S = 3,63793 R-Sq = 99,97% R-Sq(adj) = 99,95%

Tabla 2. Análisis de varianza para la variable de respuesta Luminosidad (L).

Analysis of Variance for Luminosidad (L), using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F
VELOCIDAD GIRO	2	2345,12	2345,12	1172,56	1283478,04
VELOCIDAD ALIM	2	16285,43	16285,43	8142,71	8912970,99
ALTURA TORNILLO	2	544,91	544,91	272,45	298226,38
VELOCIDAD GIRO*VELOCIDAD ALIM	4	436,02	436,02	109,01	119317,51
VELOCIDAD GIRO*ALTURA TORNILLO	4	12,59	12,59	3,15	3445,57
VELOCIDAD ALIM*ALTURA TORNILLO	4	9,66	9,66	2,42	2644,54
VELOCIDAD GIRO*VELOCIDAD ALIM* ALTURA TORNILLO	8	8,76	8,76	1,09	1198,29
Error	54	0,05	0,05	0,00	
Total	80	19642,54			

Source	P
VELOCIDAD GIRO	0,000
VELOCIDAD ALIM	0,000
ALTURA TORNILLO	0,000
VELOCIDAD GIRO*VELOCIDAD ALIM	0,000
VELOCIDAD GIRO*ALTURA TORNILLO	0,000
VELOCIDAD ALIM*ALTURA TORNILLO	0,000
VELOCIDAD GIRO*VELOCIDAD ALIM* ALTURA TORNILLO	0,000
Error	
Total	

S = 0,0302255 R-Sq = 100,00% R-Sq(adj) = 100,00%

Tabla 3. Análisis de varianza para la variable de respuesta densidad.

Analysis of Variance for Densidad, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F
VELOCIDAD GIRO	2	0,025678	0,025678	0,012839	2526,18
VELOCIDAD ALIM	2	0,222089	0,222089	0,111044	21848,52
ALTURA TORNILLO	2	0,018645	0,018645	0,009322	1834,20
VELOCIDAD GIRO*VELOCIDAD ALIM	4	0,004553	0,004553	0,001138	223,98
VELOCIDAD GIRO*ALTURA TORNILLO	4	0,000708	0,000708	0,000177	34,82
VELOCIDAD ALIM*ALTURA TORNILLO	4	0,006312	0,006312	0,001578	310,46
VELOCIDAD GIRO*VELOCIDAD ALIM* ALTURA TORNILLO	8	0,003540	0,003540	0,000442	87,05
Error	54	0,000274	0,000274	0,000005	
Total	80	0,281799			

Source	P
VELOCIDAD GIRO	0,000
VELOCIDAD ALIM	0,000
ALTURA TORNILLO	0,000
VELOCIDAD GIRO*VELOCIDAD ALIM	0,000
VELOCIDAD GIRO*ALTURA TORNILLO	0,000
VELOCIDAD ALIM*ALTURA TORNILLO	0,000
VELOCIDAD GIRO*VELOCIDAD ALIM* ALTURA TORNILLO	0,000
Error	
Total	

S = 0,00225443 R-Sq = 99,90% R-Sq(adj) = 99,86%

Tabla 4. Análisis de varianza para la variable de respuesta turbidez.

Analysis of Variance for Turbidez, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
VELOCIDAD GIRO	2	447,572	447,572	223,786	11521,42	0,000
VELOCIDAD ALIM	2	907,602	907,602	453,801	23363,56	0,000
ALTURA TORNILLO	2	785,100	785,100	392,550	20210,09	0,000
VELOCIDAD GIRO*VELOCIDAD ALIM	4	29,826	29,826	7,456	383,89	0,000
VELOCIDAD GIRO*ALTURA TORNILLO	4	16,195	16,195	4,049	208,44	0,000
VELOCIDAD ALIM*ALTURA TORNILLO	4	5,500	5,500	1,375	70,80	0,000
VELOCIDAD GIRO*VELOCIDAD ALIM* ALTURA TORNILLO	8	3,611	3,611	0,451	23,24	0,000
Error	54	1,049	1,049	0,019		
Total	80	2196,454				

S = 0,139368 R-Sq = 99,95% R-Sq(adj) = 99,93%

Tabla 5. Análisis de varianza para la variable de respuesta sólidos totales.

Analysis of Variance for Sólidos, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F
VELOCIDAD GIRO	2	1,43335	1,43335	0,71668	4431,35
VELOCIDAD ALIM	2	12,53864	12,53864	6,26932	38764,50
ALTURA TORNILLO	2	1,64609	1,64609	0,82305	5089,06
VELOCIDAD GIRO*VELOCIDAD ALIM	4	0,39231	0,39231	0,09808	606,43
VELOCIDAD GIRO*ALTURA TORNILLO	4	0,00586	0,00586	0,00146	9,05
VELOCIDAD ALIM*ALTURA TORNILLO	4	0,21268	0,21268	0,05317	328,76
VELOCIDAD GIRO*VELOCIDAD ALIM* ALTURA TORNILLO	8	0,05026	0,05026	0,00628	38,85
Error	54	0,00873	0,00873	0,00016	
Total	80	16,28792			

Source	P
VELOCIDAD GIRO	0,000
VELOCIDAD ALIM	0,000
ALTURA TORNILLO	0,000
VELOCIDAD GIRO*VELOCIDAD ALIM	0,000
VELOCIDAD GIRO*ALTURA TORNILLO	0,000
VELOCIDAD ALIM*ALTURA TORNILLO	0,000
VELOCIDAD GIRO*VELOCIDAD ALIM* ALTURA TORNILLO	0,000
Error	
Total	

S = 0,0127172 R-Sq = 99,95% R-Sq(adj) = 99,92%

Tabla 6. Análisis de varianza para la variable de respuesta rendimiento.

Analysis of Variance for Rendimiento, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
VELOCIDAD GIRO	2	832,51	832,51	416,26	6807,48	0,000
VELOCIDAD ALIM	2	2451,43	2451,43	1225,72	20045,44	0,000
ALTURA TORNILLO	2	167,25	167,25	83,63	1367,62	0,000
VELOCIDAD GIRO*VELOCIDAD ALIM	4	82,15	82,15	20,54	335,87	0,000
VELOCIDAD GIRO*ALTURA TORNILLO	4	26,40	26,40	6,60	107,92	0,000
VELOCIDAD ALIM*ALTURA TORNILLO	4	77,08	77,08	19,27	315,15	0,000
VELOCIDAD GIRO*VELOCIDAD ALIM* ALTURA TORNILLO	8	35,48	35,48	4,43	72,53	0,000
Error	54	3,30	3,30	0,06		
Total	80	3675,61				

S = 0,247279 R-Sq = 99,91% R-Sq(adj) = 99,87%

Tabla 7. Análisis de varianza para la variable de respuesta tiempo de residencia.

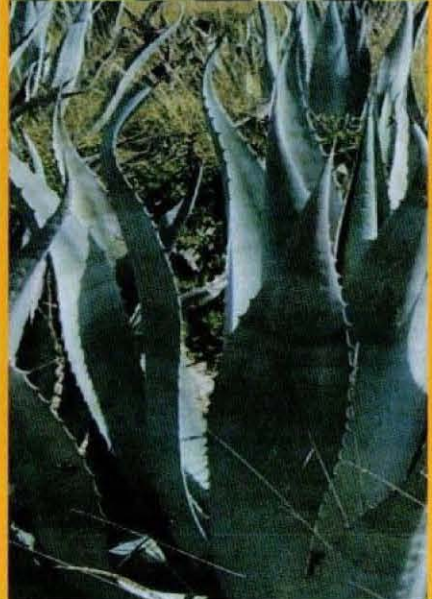
Analysis of Variance for Tiempo, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
VELOCIDAD GIRO	2	30,7054	30,7054	15,3527	1943,08	0,000
VELOCIDAD ALIM	2	50,4662	50,4662	25,2331	3193,56	0,000
ALTURA TORNILLO	2	29,8165	29,8165	14,9083	1886,83	0,000
VELOCIDAD GIRO*VELOCIDAD ALIM	4	0,1057	0,1057	0,0264	3,34	0,016
VELOCIDAD GIRO*ALTURA TORNILLO	4	2,0820	2,0820	0,5205	65,87	0,000
VELOCIDAD ALIM*ALTURA TORNILLO	4	1,4946	1,4946	0,3736	47,29	0,000
VELOCIDAD GIRO*VELOCIDAD ALIM* ALTURA TORNILLO	8	0,7802	0,7802	0,0975	12,34	0,000
Error	54	0,4267	0,4267	0,0079		
Total	80	115,8773				

S = 0,0888889 R-Sq = 99,63% R-Sq(adj) = 99,45%



Este trabajo fue presentado en el IX Simposium Nacional y II Internacional de la Producción y Aprovechamiento del Nopal y Maguey, así como en el 10° Congreso Interamericano de Computación Aplicada a la Industria de Procesos (CAIP´2011)



La Facultad de Agronomía
Universidad Autónoma de Nuevo León



Otorga la presente

CONSTANCIA

A: Ing. Erika Paredes Martínez

Por haber impartido la Ponencia
"Condiciones de proceso de extracción de mucilago
de nopal deshidratado" en el

IX Simposium Nacional y II Internacional

Producción y Aprovechamiento del Nopal y Maguey

Ph. D. Rigoberto E. Vázquez Alvarado
ORGANIZADOR DEL EVENTO

Ph. D. Jesús Alfonso Fernández Delgado
DIRECTOR

Escobedo, N. L. México
12 y 13 de noviembre de 2010



CAIP'2011

Girona, 30 de Mayo – 3 de Junio

CERTIFICADO

ERIKA P. MARTÍNEZ

ha participado en el 10º Congreso Interamericano de Computación Aplicada a la Industria de Procesos (CAIP'2011), realizado en la ciudad de Girona, Catalunya - España, del 30 de Mayo al 3 de Junio del año 2011, con la comunicación:

"OPTIMIZACIÓN DE LA EXTRACCIÓN DE MUCÍLAGO DE NOPAL POR MÉTODOS MECÁNICO-FÍSICOS EMPLEANDO EL DISEÑO DE SUPERFICIE DE RESPUESTA"

El Trabajo está incluido como Capítulo de Libro en el CD de Actas del Congreso (ISBN 978-84-8458-356-1) y en el Libro de resúmenes (ISBN 978-84-8458-355-4).

Girona, a 3 de Junio de 2011.



Dr. Jordi Poch García
Presidente del Comité Organizador CAIP'2011



UTN
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL



EPS
UdG Escola Politécnica Superior

Universitat de Girona

Ajuntament de Girona

GOBIERNO DE ESPAÑA
MINISTERIO DE CIENCIA E INNOVACIÓN

