



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLÁN**

**ESTABLECIMIENTO DE CONDICIONES DE FILTRACIÓN DE
NEJAYOTE A RÉGIMEN DE PRESIÓN CONSTANTE EN UN
EQUIPO PROTOTIPO**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERA EN ALIMENTOS
P R E S E N T A :
JENNIFER CRUZ LOPEZ**

ASESOR: M. EN C. MARIA DEL CARMEN VALDERRAMA BRAVO

CUAUTITLÁN IZCALLI, EDO. DE MEX.

2011



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.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE TABLAS

RESUMEN

1

INTRODUCCIÓN

2

I ANTECEDENTES

4

1.1 Filtración

4

1.1.1 Mecanismos de filtración

4

1.1.1.1 Filtración por torta

5

1.1.1.2 Filtración por clarificación

6

1.1.1.3 Filtración por membrana

7

1.1.2 Teoría de filtración por torta

8

1.1.2.1 Caída de presión de la torta

13

1.1.2.2 Caída de presión del medio filtrante

14

1.1.2.3 Caída total de presión

16

1.1.3 Compresibilidad de una torta de filtración

17

1.1.4 Filtración intermitente a presión constante sin ayudafiltro

18

1.1.4.1 Obtención de α y Rm a partir de datos experimentales

18

1.1.4.2 Tiempo de filtración

20

1.1.5 Filtración intermitente a presión constante con ayudafiltro en forma de precapa

21

1.1.5.1 Criterio de selección de precapa

23

1.1.5.2 Obtención de α y Rm a partir de datos experimentales

24

1.1.6 Medios filtrantes

25

1.2 Nixtamalización del maíz

27

1.2.1 El grano de maíz

27

1.2.1.1 Estructura

27

1.2.1.2 Composición del grano

29

1.2.2 Nixtamalización del maíz

30

1.3 El nejayote

32

1.3.1 Alternativas de uso del nejayote

34

II METODOLOGÍA

2.1 Objetivos

36

2.2 Recolección de la muestra

39

2.2.1 Descripción del proceso de nixtamalización

39

2.3 Caracterización del nejayote

41

2.3.1 Sólidos totales

41

2.3.2 Densidad

41

2.3.3 Viscosidad

42

2.3.4 pH

44

2.3.5 Análisis Químico Proximal (Base seca)

44

2.3.6 Determinación de calcio

45

2.3.7 Color

45

2.3.8 Rayos X

46

2.3.9 Morfología	46
2.4 Filtración en embudo Buchner	46
2.4.1 Filtraciones preliminares sin ayudafiltro	46
2.4.2 Filtraciones con ayudafiltro	49
2.4.2.1 Caracterización de la tierra de diatomea	49
Rayos X	49
Morfología	50
2.4.2.2 Cálculo para fijar el espesor de precapa	50
2.4.2.3 Selección de espesor de precapa	51
2.5 Filtración en celda	52
2.5.1 Cálculos de precapa en celda	53
2.5.2 Cálculos de dosificación	53
2.5.3 Obtención de tiempo y volumen de filtración	54
2.5.4 Cálculo de la resistencia del medio filtrante (R_m) y la resistencia	57
específica de la torta (α)	
2.5.4.1 Determinación del flujo a través de la precapa (q)	57
2.5.4.2 Determinación de R_m	57
2.5.4.3 Determinación de α	58
2.5.5 Metodología para el cálculo de C	59
2.5.6 Color	60
2.5.7 Calcio	60
III RESULTADOS	
3.1 Caracterización del nejayote	61
3.1.1 Sólidos totales	61
3.1.2 Densidad	61
3.1.3 Viscosidad	62
3.1.4 pH	63
3.1.5 Análisis Químico Proximal (Base seca)	64
3.1.6 Calcio	64
3.1.7 Color	64
3.1.8 Rayos X	65
3.1.9 Morfología	66
3.2 Filtraciones en embudo Buchner	68
3.2.1 Filtraciones preliminares sin ayudafiltro	68
3.3 Filtraciones con ayudafiltro	73
3.3.1 Caracterización de la tierra de diatomea	73
Rayos X	73
Morfología	74
3.3.2 Selección de espesor de precapa	75
3.4 Filtración en celda	76
3.4.1 Velocidad de filtración	76
3.4.2 Determinación de α y R_m	81
3.4.2.1 Determinación del flujo a través de la precapa (q)	81
3.4.2.2 Determinación de R_m	81
3.4.2.3 Determinación de α	82
3.4.3 Color	83

3.4.4 Calcio	84
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	86
REFERENCIAS	89

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	Filtro de torta	6
1.2	Filtración por clarificación	7
1.3	Filtración por membrana	7
1.4	Caída de presión en filtración	9
1.5	Influencia de la presión en los diferentes tipos de torta	17
1.6	Estructura del grano de maíz	28
2.1	Cuadro metodológico	38
2.2	Diagrama del proceso de nixtamalización	39
2.3	Viscosímetro de Ostwald	43
2.4	Medios filtrantes	47
2.5	Embudo Buchner	48
2.6	Filtración en embudo Buchner	48
2.7	Filtración de nejayote con ayudafiltro en forma de precapa	51
2.8	Celda de filtración	52
2.9	Accesorios de la celda a) Empaque b) Soporte c) Medio filtrante d) Empaque	55
2.10	Filtración en celda	56
3.1	Muestra de nejayote	65
3.2	Difractograma de rayos X de sólidos de nejayote	66
3.3	Imagen de SEM de sólidos de nejayote a 1000 x	67
3.4	Gráfica comparativa de las velocidades de filtración de 8 medios filtrantes	69
3.5	Filtrados obtenidos con los 8 medios filtrantes a) Todos los medios filtrantes b) Medios filtrantes 1-5 c) Medios filtrantes 5-8	70
3.6	Medios filtrantes a) Lona poliéster No. 22 8-11 μm b) Nylon con hilo metalizado 10-12 μm c) Papel 9-11 μm	72
3.7	Difractograma de rayos X de tierra de diatomea	73
3.8	Imagen de SEM de tierra de diatomea a 2000x	74
3.9	Log V_f versus Log t_f a las diferentes precapas	75
3.10	Volumen versus tiempo de filtración a presión 0.65 kg/cm ² a) Dosificación 1:0.25 b) Dosificación 1:0.5 c) Dosificación 1:0.75	77
3.11	Velocidad de filtración a dosificación 1:0.25 a) Presión 0.65 kg/cm ² b) Presión 1.0 kg/cm ² c) Presión 1.35 kg/cm ²	79
3.12	Velocidad de filtración a dosificación 1:0.5 a) Presión 0.65 kg/cm ² b) Presión 1.0 kg/cm ² c) Presión 1.35 kg/cm ²	80

ÍNDICE DE TABLAS

1.1	Medios filtrantes	26
1.2	Composición química de las partes del maíz (g/100g base seca)	29
1.3	Composición del nejayote y sus sólidos	33
2.1	Métodos químicos	44
2.2	Características de los medios filtrantes	47
2.3	Cantidades de ayudafiltro para formar precapa	50
2.4	Cantidades de ayudafiltro para dosificación	53
3.1	Determinación de sólidos totales	61
3.2	Determinación de densidad	62
3.3	Determinación de tiempos de caída del nejayote en el Viscosímetro de Ostwald	62
3.4	Determinación de pH	63
3.5	Determinación de AQP	64
3.6	Mediciones de color de nejayote	65
3.7	Velocidades de filtración de 8 medios filtrantes	68
3.8	Filtraciones obtenidas con diferente precapa	75
3.9	Valores de q a diferentes presiones	81
3.10	Valores de Rm a diferentes presiones	82
3.11	Valores de α con diferentes presiones y dosificación para medios filtrantes A, B y C	82
3.12	Valores de ΔE a diferentes presiones y dosificación para medios filtrantes A, B y C	83
3.13	Valores de calcio en mg/L a diferentes presiones y dosificación para medios filtrantes A, B y C	84

RESUMEN

En la presente investigación se realizaron filtraciones de nejayote en un equipo prototipo para evaluar distintos parámetros y poder establecer las condiciones de filtración. Esto para ofrecer una alternativa de tratamiento previo ya sea al desecho como lo hacen en la producción de tortillas los molineros-tortilleros o previo a otras alternativas de uso para el nejayote que se describen en el presente trabajo.

Para ello se realizaron análisis de caracterización del nejayote para conocer su comportamiento, posteriormente se realizaron filtraciones en el embudo Buchner para seleccionar 3 medios filtrantes y determinar el uso de ayudafiltro.

Conociendo estos parámetros y con las condiciones establecidas, se realizaron filtraciones en el equipo prototipo, variando 3 niveles de relación de dosificación, 3 niveles de presión y 3 medios filtrantes.

A partir de estas filtraciones, se obtuvieron datos de tiempo y volumen de filtración para determinar velocidades de filtración, resistencia específica de la torta (α) y la resistencia del medio filtrante (R_m).

A los filtrados obtenidos se les evaluó color por medio de un equipo Minolta CR 300, determinando la diferencia de color ΔE entre el nejayote y los filtrados. También se evaluó el contenido de calcio por medio de espectrofotometría de absorción atómica.

Se estableció que el mejor medio filtrante, para la filtración de nejayote es tela y las condiciones de operación son las siguientes: a dosificación 1:0.25, presión de 1 kgf/cm² y a 1:0.5, presión de 1.35 kgf/cm².

INTRODUCCIÓN

El tratamiento alcalino que se le da al grano del maíz durante la nixtamalización origina que la cantidad de calcio incorporado en el grano durante el proceso sea muy importante. La interacción entre calcio y los diferentes componentes del grano determina las propiedades fisicoquímicas y sensoriales de productos como masa, tortillas y harinas instantáneas (Gutiérrez, *et al.* 2007). Durante el proceso de nixtamalización, los granos de maíz son cocidos en una solución de hidróxido de calcio, dejando un tiempo de reposo de 1-24 h. Después es lavado dos a tres veces para remover el pericarpio, germen y restos de endospermo, el sobrenadante (llamado nejayote) es desechado. El material restante es molido para obtener masa o alternativamente es molido y secado para obtener harina instantánea (Fernández-Muñoz *et al.* 2006).

El nejayote, en general, contiene más del 60% de polisacáridos que no son almidón, además contiene partículas sólidas de fragmentos de pericarpio (fibra), almidón, proteína y germen soluble, así como restos de cal de forma suspendida y disuelta usada durante la cocción (Niño-Medina, 2009). Esta materia orgánica e inorgánica representa una elevada carga contaminante desde el punto de vista ambiental, ya que presenta una temperatura de 40 a 70°C y un pH que oscila entre 12 y 14. Esto es debido a la gran cantidad de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y agua que se emplea durante el proceso, que cuando se arrojan al drenaje o directamente a los acuíferos o al suelo provocan un deterioro ambiental importante.

Es por ello que surge la necesidad de crear técnicas que permitan la eliminación de sólidos suspendidos y neutralizar el pH del agua de nejayote para un mejoramiento del medio ambiente y el aprovechamiento de estos sólidos como productos de alto valor agregado.

El nejayote obtenido de la nixtamalización, es un agua de desecho altamente alcalina, con alta demanda química y biológica de oxígeno, por lo tanto, es considerado un contaminante ambiental. En la nixtamalización típica, procesando 50 kg de maíz a diario, se usa alrededor de 75 litros de agua y genera

una cantidad equivalente de agua de desecho alcalina. Por esto, las alternativas de utilización para los residuos de nejayote en México son necesarios (Niño-Medina, 2009).

Para la separación de partículas en suspensión del nejayote pueden usarse una gran diversidad de métodos, dependientes del tipo de sólido y de la proporción de sólido a líquido en la mezcla. Una de las alternativas para separar estos sólidos es la filtración. Se entiende por filtración, a la operación unitaria en la que el componente sólido insoluble de una suspensión sólido-líquido, se separa del componente líquido, haciendo pasar a éste a través de una membrana porosa que retiene las partículas sólidas, en una superficie superior o dentro de su estructura o ambas a la vez; el fluido puede ser un gas o un líquido (Geankoplis, 2006). Las partículas sólidas suspendidas pueden ser muy finas o bastante grandes, muy rígidas o plásticas, esféricas o de forma muy irregular, agregados o partículas individuales. El producto valioso puede ser el filtrado sin sólidos o la torta sólida. Con frecuencia, la alimentación se modifica de alguna forma mediante un pretratamiento, a fin de aumentar la velocidad de filtración, por medio de calentamiento, recristalización o adición de un “coadyuvante de filtración”, tal como celulosa o tierra de diatomeas (Geankoplis, 2006).

Lin y Miller (2000), Tien y Bai (2003) y Valdes-Pareda (2009) han realizado investigaciones sobre la influencia de la porosidad de la torta y caída de presión, en las velocidades de filtración. Sin embargo, en los últimos años no se ha investigado sobre la influencia que tiene el medio filtrante y los niveles de dosificación, en la resistencia específica de la torta en las velocidades de filtración.

Por lo anterior la finalidad del presente trabajo fue, evaluar los filtrados y tortas de nejayote, obtenidas por filtración, en un equipo prototipo y establecer las mejores condiciones de proceso, como una alternativa de tratamiento previo del nejayote.

CAPITULO I

ANTECEDENTES

1.1 Filtración

1.1.1 Mecanismos de filtración

Dentro de las operaciones de separación mecánica, se hallan las que corresponden a la separación de partículas sólidas en suspensión en un fluido, ya sea como líquido o un gas. Tien y Bai (2003) definen la filtración, como una operación en la que la suspensión a ser tratada es pasada bajo presión a través de un medio que permite al fluido suspendido pasar, quedando retenidas las partículas. Tiller y Hyun (1998) mencionan que las fuerzas interpartículas van desde fuerzas electrostáticas y de Van der Waals hasta fuerzas iónicas. También se pueden formar simples combinaciones geométricas de formas extrañas, hasta estructuras particuladas complejas, que varían enormemente en la resistencia.

En el equipo industrial de filtración, el contenido de sólidos de la alimentación, puede oscilar desde trazas hasta un porcentaje elevado. Con frecuencia la alimentación se modifica de alguna forma mediante un pretratamiento, a fin de aumentar la velocidad de filtración por medio de calentamiento, recristalización o adición de un “coadyuvante de filtración”, tal como celulosa o tierra de diatomeas (Warren, 2002).

A nivel industrial, se dificulta realizar pruebas experimentales, por el volumen de suspensión a filtrar y la capacidad de los equipos, por tal motivo, es necesario recurrir a equipos prototipo, donde los gastos de suspensión son mínimos y los tiempos de operación se reducen. Esto se ve reflejado en los costos de producción. El equipo más sencillo que se puede diseñar, es una celda a presión, considerándola como un prototipo donde se pueden realizar pruebas de filtración, para obtener condiciones de proceso que se pueden extrapolar y/o

escalar a equipos de mayor dimensión, en el que el mecanismo de filtración sea similar al de la celda de filtración.

Un caso particular, que concierne a la operación de filtración, es la capacidad y la humedad del filtro. Generalmente una humedad de torta alta, no es deseable porque puede afectar costos de transportación, material entregado y eficiencia de las subsecuentes operaciones.

En la industria alimentaria, se distinguen tres tipos de mecanismos de filtración. En uno de ellos, se incluyen suspensiones que tienen grandes cantidades de sólidos insolubles y al ser filtrados forman una torta sobre el medio filtrante, pudiendo interesar la obtención del sólido, del filtrado o ambos. Otro tipo es el que incluye las suspensiones con pocos sólidos insolubles, que por regla general suelen ser indeseables y en cuyo caso la filtración se denomina clarificación. Por último, se debe citar la ultrafiltración en donde las partículas sólidas a separar son de tamaños del orden de 0.1 μm (Ibarz, 2005).

1.1.1.1 Filtración por torta

Durante el periodo inicial de flujo en filtración Tien y Bai (2003) mencionan, que se depositan partículas en las capas superficiales del medio, este tipo de filtración suele denominarse filtración por torta. Durante la filtración, los sólidos están presentes en el equipo, formando una cama empacada de partículas a través del fluido filtrado, estas partículas formadas son llamadas torta de filtración. Lin *et al.* (2000) definen una torta obtenida por filtración como una cama empacada de partículas, con un sistema complejo de interpartículas vacías interconectadas. La proporción de sólidos en la suspensión es elevada y la mayor parte de las partículas se recogen en la torta filtrante que posteriormente se separa del medio. Estos autores mencionan que durante la filtración, el espesor de la torta se incrementa con el tiempo. En muchos casos, la torta comienza a ser más compacta y su resistencia al flujo del fluido se incrementa.

El tratamiento teórico ha demostrado, que la naturaleza de la torta tiene un efecto muy pronunciado sobre la velocidad de flujo del filtrado y que es importante que las partículas que forman la torta, tengan un tamaño tan grande como sea posible. Cuando la velocidad de filtración es lenta, la estructura de las partículas es compleja y la calidad de filtrado no es satisfactoria, entonces es necesario adicionar un ayuda filtro o coadyuvante de filtración (Richardson, 1981).

Los filtros de torta separan grandes cantidades de sólidos en forma de cristales o un lodo, como se ilustra en la figura 1.1. Con frecuencia incluyen dispositivos para el lavado de la torta y para eliminar la mayor parte del líquido en los sólidos antes de su descarga.

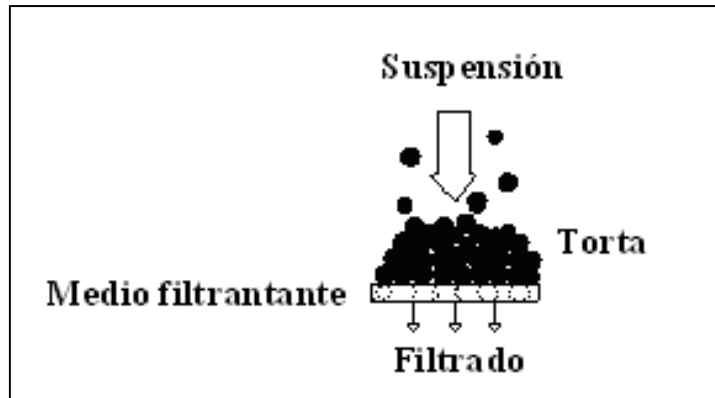


Figura 1.1 Filtro de torta

Existe un mecanismo intermedio, donde partículas de tamaño inferior al diámetro del poro obturan la membrana de filtración, aglomerándose parcialmente, lo que ocasiona una disminución de la velocidad de filtración. El líquido que atraviesa el medio al comienzo de la filtración pasará turbio hasta que se forme esta capa previa de partículas (Helman, 1984).

1.1.1.2 Filtración por clarificación

Un segundo mecanismo de filtración se denomina clarificación, en esta operación se eliminan pequeñas cantidades de un sólido insoluble, contenidas en un líquido,

cuyo propósito es obtener un líquido claro (Helman, 1984). Estos sólidos son retenidos en el interior del medio filtrante como se muestra en la figura 1.2.

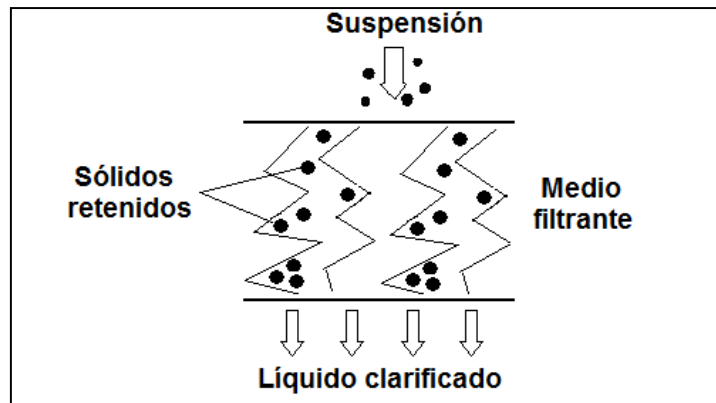


Figura 1.2 Filtración por clarificación

1.1.1.3 Filtración por membrana

En el mecanismo de filtración por membrana, la suspensión de la alimentación fluye bajo presión, a velocidades ligeramente altas, atravesando el medio filtrante como se muestra en la figura 1.3. Se forma una capa delgada de sólidos en la superficie del medio, pero la alta velocidad del líquido mantiene la capa formada. El medio filtrante es una membrana de cerámica, metal o de un polímero con poros lo suficientemente pequeños.

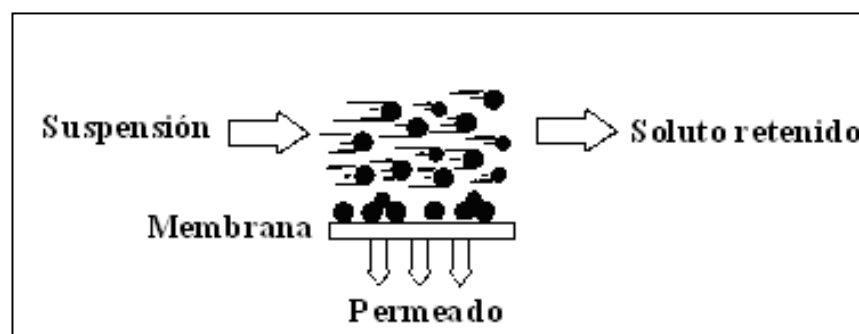


Figura 1.3 Filtración por membrana

El principio es bastante simple: la membrana actúa como un filtro muy específico que dejará pasar el agua, mientras que retiene los sólidos suspendidos

y otras sustancias. Hay varios métodos para permitir que las sustancias atraviesen una membrana. Ejemplos de estos métodos son la aplicación de alta presión, el mantenimiento de un gradiente de concentración en ambos lados de la membrana y la introducción de un potencial eléctrico.

La membrana funciona como una pared de separación selectiva. Ciertas sustancias pueden atravesar la membrana, mientras que otras quedan atrapadas en ella.

La filtración de membrana se puede dividir en micro y ultrafiltración para retirar partículas más grandes. Cuando se necesita desalinizar el agua, se aplican la nanofiltración y la ósmosis inversa. La nanofiltración y las membranas de ósmosis inversa no actúan según el principio de porosidad; la separación ocurre por difusión a través de la membrana. La presión requerida para realizar ambas operaciones, es mucho más alta que la requerida para micro y ultra filtración, mientras que la productividad es mucho más baja (Geankoplis, 2006).

1.1.2 Teoría de filtración por torta

La clásica teoría de filtración desarrollada por Ruth *et al.* (1933) y Ruth (1935) es basada en una analogía heurística con la ley de Ohm, en que la velocidad de filtrado depende de las fuerzas involucradas, como la caída de presión total a través del filtro en relación a las resistencias en serie, resistencia de la torta y la resistencia del medio filtrante (Hosten, 1993). El desarrollo de la teoría convencional consiste en combinar la ecuación de balance de masa y la ecuación de momentum, basada en la ley de Darcy, que es una ecuación empírica que describe el flujo de fluido unidireccional a través de un medio poroso incompresible. Sin embargo Kakwani *et al.* (1985), Bourgeois *et al.* (1997) y Bourgeois *et al.* (1998) han demostrado que una torta no es de carácter lineal uniforme. Normalmente la porosidad es muy alta en la superficie de la torta y decrece a través de su profundidad. Debido a que la predicción de la permeabilidad es un problema desde el punto de vista teórico y experimental, se

han propuesto aproximaciones semi-empíricas, que relacionan la presión del sólido y porosidad para determinar las propiedades indirectas de la torta (Hande *et al.* 2007). Basado en simples argumentos de escalamiento Kozeny *et al.* (1927) y Carman (1956) desarrollaron un modelo teórico para predecir la permeabilidad de medios porosos.

Durante la filtración, los sólidos de la suspensión permanecen en el equipo y forman un lecho de partículas, a través del cual tiene que fluir el filtrado. El filtrado pasa a través de tres resistencias:

- a) Resistencia de los canales, que llevan la suspensión hasta la cara anterior de la torta y el filtrado que sale del medio filtrante.
- b) Resistencia correspondiente a la torta, aumenta a medida que los sólidos se depositan. Se le llama resistencia específica de la torta.
- c) Resistencia correspondiente al medio filtrante.

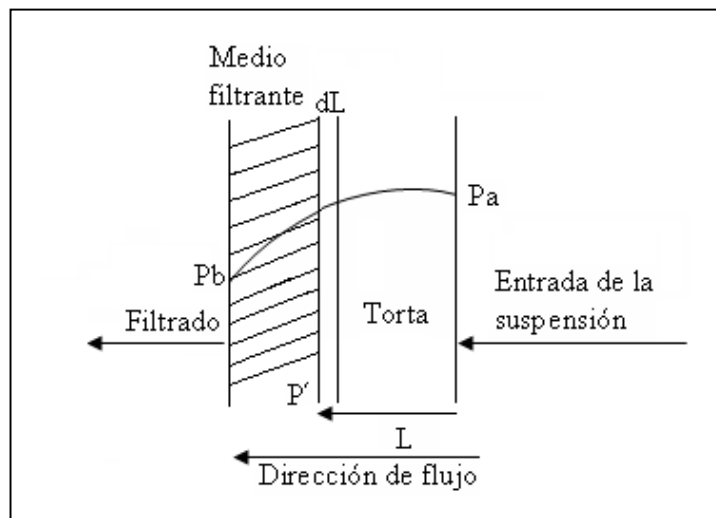


Figura 1.4 Caída de presión en filtración

Donde:

P_a = Presión en la superficie de entrada de la torta.

P_b = Presión a la salida

P' = Presión de la superficie del medio filtrante

Realizando un balance global de presión.

$$\Delta P = P_a - P_b \quad (1.1)$$

Existe una presión intermedia P' entre el medio filtrante y la torta, por lo que la ecuación 1.1 también puede expresarse:

$$\Delta P = (P_a - P') + (P' - P_b) \quad (1.2)$$

Considerando que:

$$\Delta P_T = (P_a - P')$$

$$\Delta P_M = (P' - P_b)$$

ΔP_T = Caída de presión de la torta

ΔP_M = Caída de presión del medio filtrante

Entonces la ecuación 1.2 se puede expresar.

$$\Delta P = \Delta P_T + \Delta P_M \quad (1.3)$$

El flujo unidireccional en medios porosos es generalmente descrito por la ley de Darcy, que es mostrada en la ecuación 1.4

$$u = \frac{K}{\mu} \left(\frac{dP}{dL} \right) \quad (1.4)$$

Donde:

u = Velocidad promedio en el medio

K = Permeabilidad

$\frac{dP}{dL}$ = Gradiente de presión para un espesor L .

μ = Viscosidad

Debido a que la predicción de la permeabilidad es un problema desde el punto de vista teórico y experimental, se han propuesto aproximaciones semi-empíricas para determinar el valor. Basado en simples argumentos de escalamiento Kozeny *et al.* (1927) y Carman (1956) desarrollaron un modelo teórico para predecir la permeabilidad de medios porosos.

$$K = \frac{\varepsilon^3}{c(1-\varepsilon)^2 \left(\frac{Sp}{Vp} \right)^2} \quad (1.5)$$

Donde:

ε = Porosidad

Sp = Superficie de las partículas

Vp = Volumen de las partículas

El valor de c , considerada la constante de Kozeny-Carman depende de la porosidad, microestructura de poros y capilaridades (Kaviany, 1995). Carman (1956) reportó que $c = 4.8 \pm 0.3$ si se considera que las partículas tienen forma esférica. Peng y Boming (2008) y Valdes-Pareda *et al.* (2009) mencionan que generalmente el valor de $c = 5$. Sin embargo Rahli *et al.* (1997) determinaron en la constante de Kozeny-Carman variaciones en fibras monodispersas empacadas aleatoriamente.

Considerando que el flujo a través de una cama empacada es análogo a lo que ocurre en un conjunto de tubos circulares rectos y que se considera flujo laminar, con frecuencia la caída de presión se expresa como función de la relación superficie-volumen en el que se considera partículas de formas geométricas no uniformes donde $c = 4.17$, entonces al sustituir la ecuación 1.5 en 1.4 se tiene:

$$u = \frac{\varepsilon^3}{4.17 \mu (1-\varepsilon)^2 \left(\frac{Sp}{Vp} \right)^2} \left(\frac{dP}{dL} \right) \quad (1.6)$$

Despejando $\left(\frac{dP}{dL}\right)$ de la ecuación 1.6.

$$\frac{dP}{dL} = \frac{4.17\mu u(1-\varepsilon)^2 \left(\frac{Sp}{Vp}\right)^2}{\varepsilon^3} \quad (1.7)$$

Como el área de filtrado A es medida perpendicularmente a la dirección del flujo, entonces:

$$u = \frac{dV / dt}{A} \quad (1.8)$$

V = Volumen de filtrado recolectado desde el comienzo de la filtración hasta un tiempo t .

El gasto volumétrico del líquido es independiente del espesor L ya que depende de la cantidad de sólidos que se depositan en la torta, por lo que:

$$dV = \underbrace{A(1-\varepsilon)}_{\text{Área de sólidos}} dL \quad (1.9)$$

Como $\rho_p = \frac{m}{V}$ entonces $\rho_p = \frac{dm}{dV}$ o bien $dV = \frac{dm}{\rho_p}$

m = Masa de sólidos

ρ_p = Densidad de las partículas

La ecuación 1.9 queda:

$$\frac{dm}{\rho_p} = A(1-\varepsilon) dL \quad (1.10)$$

Despejando dL de la ecuación 1.10 y sustituyendo en la ecuación 1.7

$$dL = \frac{dm}{A(1-\varepsilon)\rho_p}$$

$$\frac{dP}{dm} = \frac{4.17\mu u (1-\varepsilon)^2 \left(\frac{Sp}{Vp}\right)^2}{\varepsilon^3 A(1-\varepsilon)\rho_p}$$

Despejando dP :

$$dP = \frac{4.17\mu u (1-\varepsilon) \left(\frac{Sp}{Vp}\right)^2}{\varepsilon^3 \rho_p A} dm$$

(1.11)

1.1.2.1 Caída de presión de la torta.

En filtración a bajas caídas de presión de suspensiones que contienen partículas rígidas y uniformes, todos los términos son independientes del espesor por lo que la ecuación 1.11 se puede integrar directamente. Si m_c es la masa total de sólidos en la torta:

$$\int_{P'}^{Pa} dP = \frac{4.17\mu u (1-\varepsilon) \left(\frac{Sp}{Vp}\right)^2}{\varepsilon^3 \rho_p A} \int_0^{m_c} dm$$

Resolviendo la integral:

$$Pa - P' = \frac{4.17\mu u (1-\varepsilon) \left(\frac{Sp}{Vp}\right)^2}{\varepsilon^3 \rho_p A} m_c$$

$$\Delta P_T = \frac{4.17\mu u (1-\varepsilon) \left(\frac{Sp}{Vp}\right)^2}{\varepsilon^3 \rho_p A} m_c$$

(1.12)

En consideración que existe una fuerza de la torta que se opone al paso del flujo que depende de la relación entre los sólidos que se van depositando para

formar la torta y su porosidad, se involucra un término α denominado resistencia específica de la torta que relaciona:

$$\text{Considerando que } \alpha = \frac{4.17 (1 - \varepsilon) \left(\frac{S_p}{V_p} \right)^2}{\varepsilon^3 \rho_p}, \text{ se sustituye en la ecuación}$$

1.12

$$\Delta P_T = \frac{\alpha \mu u m_c}{A} \tag{1.13}$$

Las dimensiones de $\alpha = LM^{-1}$.

De la ecuación 1.13 α es la resistencia específica de la torta, sin embargo en la mayor parte de las tortas que se encuentran en operaciones industriales no están formadas por partículas rígidas individuales. La suspensión usual es una mezcla de aglomerados, ó flóculos, consistentes en débiles acoplamientos de partículas muy pequeñas, y la resistencia de la torta depende de las propiedades de los flóculos en vez de la geometría de las partículas individuales. Los flóculos se depositan sobre la cara de la torta situada en la dirección de la corriente superior y forman un entramado de canalillos. La resistencia de la torta depende del método utilizado en la preparación de la suspensión, del tiempo y temperatura. A la torta que se forma se llama compresible y hace que el gradiente de la presión sea no lineal, tal como se muestra en la figura 1.4 y su valor local varía con el tiempo, por lo que la ecuación 1.13 estrictamente no sería aplicable, pero en la práctica estas variaciones se ignoran (Helman, 1984).

1.1.2.2 Caída de presión del medio filtrante

Al igual que en la caída de presión de la torta, todos los términos son independientes del espesor por lo que la ecuación 1.11 se puede integrar directamente. Si m_c es la masa total de sólidos en la torta:

$$\int_{P_b}^{P'} dP = \frac{4.17 \mu u (1-\varepsilon) \left(\frac{Sp}{Vp} \right)^2}{\varepsilon^3 \rho_p A} \int_0^{m_c} dm$$

Resolviendo la integral:

$$P' - P_b = \frac{4.17 \mu u (1-\varepsilon) \left(\frac{Sp}{Vp} \right)^2}{\varepsilon^3 \rho_p A} m_c$$

Sustituyendo el valor de $\alpha = \frac{4.17 (1-\varepsilon) \left(\frac{Sp}{Vp} \right)^2}{\varepsilon^3 \rho_p}$

$$\Delta P_M = \frac{\alpha \mu u}{A} m_c$$

(1.14)

En la superficie del medio filtrante se va formando la torta por lo que existe otra fuerza involucrada con respecto al medio filtrante que se opone al paso del flujo que depende de la resistencia que opone la torta (α), de la cantidad de sólidos que se van depositando en el medio filtrante y del área del medio filtrante que es constante. Esta fuerza que se opone al paso del fluido se denomina resistencia del medio filtrante (Rm), el cual involucra los términos antes mencionados $Rm = \frac{\alpha m_c}{A}$.

Sustituyendo Rm en la ecuación 1.14:

$$\Delta P_M = Rm \mu u$$

(1.15)

Las dimensiones de $Rm = L^{-1}$

La resistencia del medio filtrante Rm varía con la caída de presión, debido a que la velocidad del líquido más alta, causada por una caída de presión, hace que partículas adicionales de sólidos penetren en el medio filtrante. La Rm también varía con el tiempo y la limpieza del medio filtrante; pero como solo es importante durante las primeras etapas de la filtración, casi siempre resulta

satisfactorio suponer que es constante durante cualquier filtración y obtener su valor a partir de datos experimentales (Warren, 2002).

1.1.2.3 Caída total de presión

Para obtener la caída total de presión, se sustituyen las ecuaciones 1.13 y 1.15 en la ecuación $\Delta P = \Delta P_T + \Delta P_M$.

$$\Delta P = \frac{\alpha \mu u m_c}{A} + Rm \mu u \quad (1.16)$$

Sustituyendo la ecuación 1.8 $u = \frac{dV/dt}{A}$ en la ecuación 1.16.

$$\Delta P = \frac{\alpha \mu dV/dt m_c}{A^2} + \frac{Rm \mu dV/dt}{A} \quad (1.17)$$

Reacomodando y factorizando la ecuación 1.17.

$$\Delta P = \frac{\mu}{A} dV/dt \left(\frac{\alpha m_c}{A} + Rm \right)$$

Despejando $\frac{dV}{dt}$

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\Delta P}{\frac{\mu}{A} \left(\frac{\alpha m_c}{A} + Rm \right)} \quad (1.18)$$

Teniendo en cuenta que C es la masa de sólidos depositados por unidad de volumen, entonces:

$$C = \frac{m_c}{V}$$

Despejando m_c y sustituyéndola en la ecuación

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\Delta P}{\frac{\mu}{A} \left(\frac{\alpha C V}{A} + R_m \right)} \quad (1.19)$$

La ecuación 1.19 es la ecuación general de filtración (Warren, 2002).

1.1.3 Compresibilidad de una torta de filtración

La resistencia opuesta al paso del fluido es función del espesor de la torta, y por lo tanto, es creciente a medida que aumenta el espesor de la torta, como consecuencia del depósito de nuevas cantidades de sólidos. La resistencia de la torta es función también de la viscosidad del fluido y, fundamentalmente, es función de la permeabilidad de la torta depositada.

Con el objeto de mantener el flujo uniforme a medida que progresa la filtración, del mismo modo aumenta progresivamente la presión sobre el sistema y en este aspecto las tortas pueden modificar o no sus características de permeabilidad modificando el flujo conseguido.

Según su comportamiento respecto a la presión aplicada, las tortas se clasifican en a) tortas incompresibles, cuando no modifican apreciablemente su permeabilidad al modificarse la presión actuante y b) tortas compresibles, las que disminuyen su permeabilidad a medida que aumenta la presión. (Ver figura 1.5)

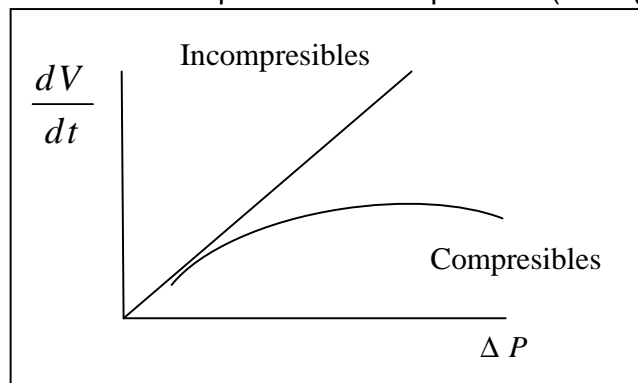


Figura 1.5 Influencia de la presión en los diferentes tipos de tortas (Helman, 1984)

En las tortas incompresibles, la velocidad de filtración, será directamente proporcional a la presión aplicada. Este caso se presenta con tortas formadas por partículas cristalinas, indeformables, de dimensiones más o menos uniformes.

En las tortas compresibles, el aumento de presión tiende a modificar la forma de las partículas produciendo la obturación total o parcial de los poros de la torta modificando su permeabilidad, son tortas formadas por partículas sólidas, que ofrecen características de semicoloides.

El agregado de materiales granulares o fibrosos a una suspensión de las características anteriores, modifica apreciablemente la permeabilidad de la torta obtenida por su constitución de una estructura, que mantiene más o menos su forma a pesar de la aplicación de la presión (Helman, 1984).

1.1.4 Filtración intermitente a presión constante sin ayudafiltro

La filtración intermitente a presión constante, se realiza cuando se filtra una suspensión que forma una torta, con un índice de compresibilidad bajo. La suspensión llega al filtro manteniendo en toda la operación la presión constante, lo cual, implica que la velocidad de filtración, disminuye paulatinamente.

Cuando la caída de presión es constante, las únicas variables en la ecuación general de filtración son el volumen de filtrado y el tiempo (Warren, 2002).

1.1.4.1 Obtención de α y R_m a partir de datos experimentales

Partiendo de la ecuación general de filtración, se integra considerando una caída de presión constante.

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\Delta P}{\frac{\mu}{A} \left(\frac{\alpha C V}{A} + Rm \right)}$$

Multiplicando los términos.

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\Delta P}{\frac{\mu \alpha C V}{A^2} + \frac{\mu Rm}{A}}$$

Separando variables

$$\left(\frac{\mu \alpha C V}{A^2} + \frac{\mu Rm}{A} \right) dV = \Delta P dt$$

Multiplicando los términos

$$\left(\frac{\mu \alpha C}{A^2} \right) V dV + \left(\frac{\mu Rm}{A} \right) dV = \Delta P dt$$

Integrando

$$\left(\frac{\mu \alpha C}{A^2} \right) \int_{V_1}^{V_2} V dV + \left(\frac{\mu Rm}{A} \right) \int_{V_1}^{V_2} dV = \Delta P \int_{t_1}^{t_2} dt$$

Resolviendo

$$\left(\frac{\mu \alpha C}{A^2} \right) \frac{V^2}{2} \Big|_{V_1}^{V_2} + \left(\frac{\mu Rm}{A} \right) V \Big|_{V_1}^{V_2} = \Delta P t \Big|_{t_1}^{t_2}$$

Sustituyendo los límites

$$\left(\frac{\mu \alpha C}{2A^2} \right) (V_2^2 - V_1^2) + \left(\frac{\mu Rm}{A} \right) (V_2 - V_1) = \Delta P (t_2 - t_1)$$

Como $V_2^2 - V_1^2 = (V_2 - V_1)(V_2 + V_1)$, entonces la ecuación queda:

$$\left(\frac{\mu \alpha C}{2A^2} \right) (V_2 - V_1)(V_2 + V_1) + \left(\frac{\mu Rm}{A} \right) (V_2 - V_1) = \Delta P (t_2 - t_1)$$

Dividiendo entre $(V_2 - V_1)$ y cancelando términos

$$\left(\frac{\mu \alpha C}{2A^2} \right) \frac{(V_2 - V_1)(V_2 + V_1)}{(V_2 - V_1)} + \left(\frac{\mu Rm}{A} \right) \frac{(V_2 - V_1)}{(V_2 - V_1)} = \Delta P \frac{(t_2 - t_1)}{(V_2 - V_1)}$$

Cancelando términos

$$\left(\frac{\mu \alpha C}{2A^2} \right) (V_2 + V_1) + \left(\frac{\mu Rm}{A} \right) = \Delta P \frac{(t_2 - t_1)}{(V_2 - V_1)}$$

Considerando al volumen promedio $\bar{V} = \frac{V_2 + V_1}{2}$, a $\Delta t = t_2 - t_1$ y $\Delta V = V_2 - V_1$, entonces la ecuación se modifica

$$\left(\frac{\mu \alpha C}{A^2}\right) \bar{V} + \left(\frac{\mu Rm}{A}\right) = \Delta P \frac{\Delta t}{\Delta V}$$

Despejando $\frac{\Delta t}{\Delta V}$

$$\frac{\Delta t}{\Delta V} = \left(\frac{\mu \alpha C}{\Delta P A^2}\right) \bar{V} + \left(\frac{\mu Rm}{\Delta P A}\right)$$

(1.20)

Si a la ecuación 1.20 se relaciona con una función lineal

$$\frac{\Delta t}{\Delta V} = m \bar{V} + b$$

Donde:

$$m = \frac{\mu \alpha C}{\Delta P A^2} \quad y \quad b = \frac{\mu Rm}{\Delta P A}$$

Por regresión lineal se obtienen los valores de la pendiente (m) y ordenada al origen (b) de los cuales se despeja α y Rm , respectivamente.

1.1.4.2 Tiempo de filtración

Para obtener el tiempo de filtración se va a partir de la siguiente ecuación:

$$\left(\frac{\mu \alpha C}{A^2}\right) \frac{V^2}{2} \Big|_{V_1}^{V_2} + \left(\frac{\mu Rm}{A}\right) V \Big|_{V_1}^{V_2} = \Delta P \quad t \Big|_{t_1}^{t_2}$$

Considerando:

$$V_2 = V_f \quad t_1 = 0 \quad t_2 = t_f \quad V_1 = 0$$

Se sustituyen los límites

$$\left(\frac{\mu \alpha C}{2A^2}\right) V_f^2 + \left(\frac{\mu Rm}{A}\right) V_f = \Delta P t_f$$

Despejando t_f

$$t_f = \left(\frac{\mu \alpha C}{2 \Delta P A^2} \right) V_f^2 + \left(\frac{\mu R m}{\Delta P A} \right) V_f \quad (1.21)$$

1.1.5 Filtración intermitente a presión constante con ayudafiltro en forma de precapa.

Algunas aplicaciones de especial dificultad por la baja velocidad de filtración, complejidad de la mezcla o calidad no satisfactoria de clarificación, requieren el empleo de ayudafiltros, materiales de prefiltración o materiales de precapa. Estas son sustancias granuladas o fibrosas, que permiten la formación sobre el medio filtrante, de una torta prefiltrante adicional de mayor permeabilidad y mayor profundidad, donde quedan retenidas las fases heterogéneas, en forma de flóculos deformables o pastas de mayor viscosidad y contenido en sólidos finos. Ejemplos de sustancias frecuentemente empleadas para la ayuda de filtración son; las tierras de diatomeas, diatomita o tierras diatomáceas (sílice de alta pureza).

Los ayudafiltros se utilizan de dos maneras: como precapa y mezcladas con la lechada dosificación o “alimentación agregada”. En la filtración en precapa, se utiliza una capa delgada de aproximadamente 0.5 a 1 kg/m², depositada sobre el medio filtrante antes de iniciar la alimentación al filtro, y se emplea principalmente, para proteger dicho medio del ensuciamiento, producido por los sólidos atrapados antes de que lleguen al medio filtrante. Así mismo, proporciona una matriz más fina para retener los sólidos finos y asegurar la claridad del filtrado. La aplicación como dosificación, consiste en una adición continua de ayuda filtros, para el filtrado a la alimentación del filtro, para incrementar la porosidad de la torta.

La cantidad agregada se determina mediante pruebas, más puede ser igual al doble de la cantidad de sólidos a eliminar (Perry, 2001).

La aplicación o uso de ayudafiltros tiene algunas variantes, que dependen primero de sus características propias, del costo y del rendimiento, y de las condiciones de operación y la suspensión que se pretende filtrar.

a) Precapa

Es una cantidad fija de ayudafiltro expresada en masa por unidad de área filtrante. Dicha cantidad, se emplea para formar una capa delgada de ayudafiltro sobre el medio filtrante, el espesor que adquiere, depende de su densidad volumétrica.

Para la formación de la precapa se emplea líquido limpio, sin impurezas. Las finalidades de la precapa son:

- Evitar que el medio filtrante se obstruya con impurezas, con lo que se prolonga su duración considerablemente
- Proporcionar claridad inmediata
- Facilitar la limpieza del medio filtrante al finalizar el ciclo

La formación de la precapa, se realiza haciendo circular una suspensión de tierra de diatomeas y de líquido libre de impurezas. Debido a que la mayor parte de las partículas, son más pequeñas que las aberturas del medio filtrante, estas deben formar la precapa haciendo un puente sobre las mismas. Estos puentes pueden ser destruidos por burbujas de aire, cambios bruscos en la presión o vibraciones, haciendo que el líquido filtrado se enturbie hasta que se corrigen estos defectos. Si la distribución de la precapa en el filtro es adecuada para llenarse con líquido limpio, se puede bombear o inyectar la suspensión concentrada de ayudafiltro.

Las cantidades para la formación de la precapa, deben ser de 5 a 7 kg por cada 10 m² de área, se usan mayores cantidades cuando la distribución de flujo dentro del filtro es mala. Si la distribución es correcta, con estas cantidades se formará una precapa de 1/16" de espesor (Toledo, 2007).

b) Dosificación

Es aquella cantidad de ayudafiltro necesaria para proporcionar y mantener la permeabilidad de la torta filtrante. La dosificación se agrega para hacer posible la filtración, para aumentar el rendimiento de un equipo en su ciclo de filtración.

La finalidad de la dosificación, es mantener la permeabilidad de la torta filtrante, proporcionando un flujo y calidad de filtrado adecuados. La cantidad de ayudafiltro que se emplea en dosificación, depende principalmente de la cantidad de sólidos presentes, que interesa remover de la suspensión en cuestión, por lo tanto, es importante que primero se determine, la cantidad de sólidos presentes en la suspensión a filtrar. Una vez que se tiene, la relación del porcentaje de sólidos no disueltos presentes, entonces se puede calcular la cantidad de ayudafiltro necesario para lograr una buena separación. La dosificación de ayudafiltro se expresa con relación a los sólidos presentes en la suspensión, es decir, un líquido cuyo contenido de sólidos es de 1 % en peso, se puede empezar a probar con otro 1% lo que resultaría una relación de 1:1 (Molina, 1991).

1.1.5.1 Criterio de selección de precapa

Para la selección de precapa Tiller, 1962, propone la siguiente metodología:

Retomando la ecuación 1.21.

$$t_f = \left(\frac{\mu \alpha C}{2 \Delta P A^2} \right) V_f^2 + \left(\frac{\mu R m}{\Delta P A} \right) V_f$$

Considerando $k = \left(\frac{\mu \alpha C}{2 \Delta P A^2} \right)$ y $b = \left(\frac{\mu R m}{\Delta P A} \right)$ y sustituyendo en la

ecuación 1.21.

$$t_f = k V_f^2 + b V_f$$

(1.22)

Factorizando la ecuación 1.22:

$$t_f = k V_f^2 \left(1 + \frac{b}{kV_f} \right) \quad (1.23)$$

Aplicando logaritmos

$$\log t_f = \log k + 2 \log V_f + \log \left(1 + \frac{b}{kV_f} \right) \quad (1.24)$$

Dividiendo entre 2 y despejando $\log V_f$:

$$\log V_f = 0.5 \log t_f - 0.5 \log k - 0.5 \log \left(1 + \frac{b}{kV_f} \right) \quad (1.25)$$

Considerando que en un proceso de filtración a medida que aumenta el tiempo, el volumen aumenta, entonces el último término tiende a cero, por consiguiente se cancela. De ahí que la ecuación queda modificada:

$$\log V_f = 0.5 \log \frac{t_f}{k} \quad (1.26)$$

En la práctica es difícil llegar a obtener el valor de la pendiente de 0.5, sin embargo en pruebas de clarificación se obtienen valores menores a 0.5.

Por regresión lineal se obtiene el valor de la pendiente de los datos experimentales y se selecciona el valor de precapa cercano o mayor a 0.5.

1.1.5.2 Obtención de α y R_m a partir de datos experimentales

En un proceso de filtración cuando se emplea precapa es muy común que la resistencia específica de la torta sea mayor en comparación con la R_m , por lo que para evitar valores negativos, se parte de la ecuación 1.21:

$$t_f = \left(\frac{\mu \alpha C}{2 \Delta P A^2} \right) V_f^2 + \left(\frac{\mu R m}{\Delta P A} \right) V_f$$

En la primera etapa de filtración sólo se forma la precapa y no se tienen sólidos de suspensión, por lo que el valor de $C=0$, entonces la ecuación 1.21 se modifica de la siguiente forma:

$$t_f = \left(\frac{\mu R m}{\Delta P A} \right) V_f \quad (1.27)$$

Relacionando el flujo volumétrico como $q = \frac{V_f}{t_f}$, la ecuación 1.27 se modifica:

$$\frac{1}{q} = \left(\frac{\mu R m}{\Delta P A} \right) \quad (1.28)$$

Sustituyendo la ecuación 1.28 en la ecuación 1.21:

$$t_f = \left(\frac{\mu \alpha C}{2 \Delta P A^2} \right) V_f^2 + \frac{V_f}{q} \quad (1.29)$$

Reacomodando la ecuación 1.29:

$$\left(t_f - \frac{V_f}{q} \right) = \left(\frac{\mu \alpha C}{2 \Delta P A^2} \right) V_f^2 \quad (1.30)$$

1.1.6 Medios filtrantes

Un medio filtrante ideal, debe ser de un tamaño tal, que retenga una gran cantidad de sólidos filtrados, se obtenga un filtrado libre de partículas sólidas, y pueda limpiarse fácilmente por lavado; aunque son importantes algunas otras características, como la mínima resistencia al flujo del fluido, la resistencia

mecánica suficiente para la presión de trabajo, resistencia química al ataque de los materiales a filtrar y facilidad de despegue de la torta (Weber, 1979). En la tabla 1.1 se muestra las características de algunos medios filtrantes.

Tabla 1.1 Medios filtrantes

MEDIO FILTRANTE	CARACTERÍSTICAS
PAPEL FILTRO	Formada por fibras de celulosa, retienen sólidos muy finos y aclaran soluciones, los filtros de papel pueden separar con alta eficacia partículas inferiores a 1 mm. Según la textura del papel pueden separar prácticamente toda la materia suspendida. Permite el manejo de soluciones con pH de 0 a 12 y temperaturas de hasta 120°C.
MATERIALES FIBROSOS	Fibras naturales como algodón, lana o sintéticas como nylon. Son muy utilizadas en procesos de filtración de líquidos, especialmente en filtros prensa, en la industria aceitera, industria química y en la industria de alimentos y bebidas.
MEDIOS DE TELA	Algodón o fieltro, retienen partículas de 0.01 micras, la eficacia no depende de la velocidad de filtración. El medio filtrante es manufacturado a partir de fibras naturales o sintéticas.

Fuente :(Richardson, 1981 y Sans *et al.* 1989)

1.2 Nixtamalización del maíz.

1.2.1 El grano de maíz

1.2.1.1 Estructura

El maíz (*Zea mays*) es una de las plantas más útiles al hombre. Una de sus principales características es su gran adaptación, ya que se cultiva desde el Ecuador a diferentes latitudes del norte y sur; desde el nivel del mar, hasta más de 3200 metros sobre el nivel del mar; en suelos y climas muy variables y con una tecnología muy diversa.

El maíz se adapta mejor en suelos húmedos y fértiles, en regiones subtropicales templadas y en regiones tropicales, con temperaturas altas durante el día y bajas durante la noche.

El fruto de la planta de maíz se llama comercialmente grano, botánicamente es una cariósida y agrícolamente se le conoce como semilla.

La composición química es variable y relacionada con estadio, raza, variedad, tecnología del cultivo y clima, parte de la planta o del grano que se analice, técnicas y métodos de análisis.

En general el maíz tiene alto valor nutritivo como fuente de energía, por su alto contenido de carbohidratos, pero no posee las suficientes proteínas, tanto en cantidad como en calidad, debido a la deficiencia de dos aminoácidos esenciales: lisina y triptófano; además es insuficiente en la vitamina niacina y en minerales (Reyes, 1990).

En la figura 1.6 se presenta el diagrama de un grano de maíz y sus partes.

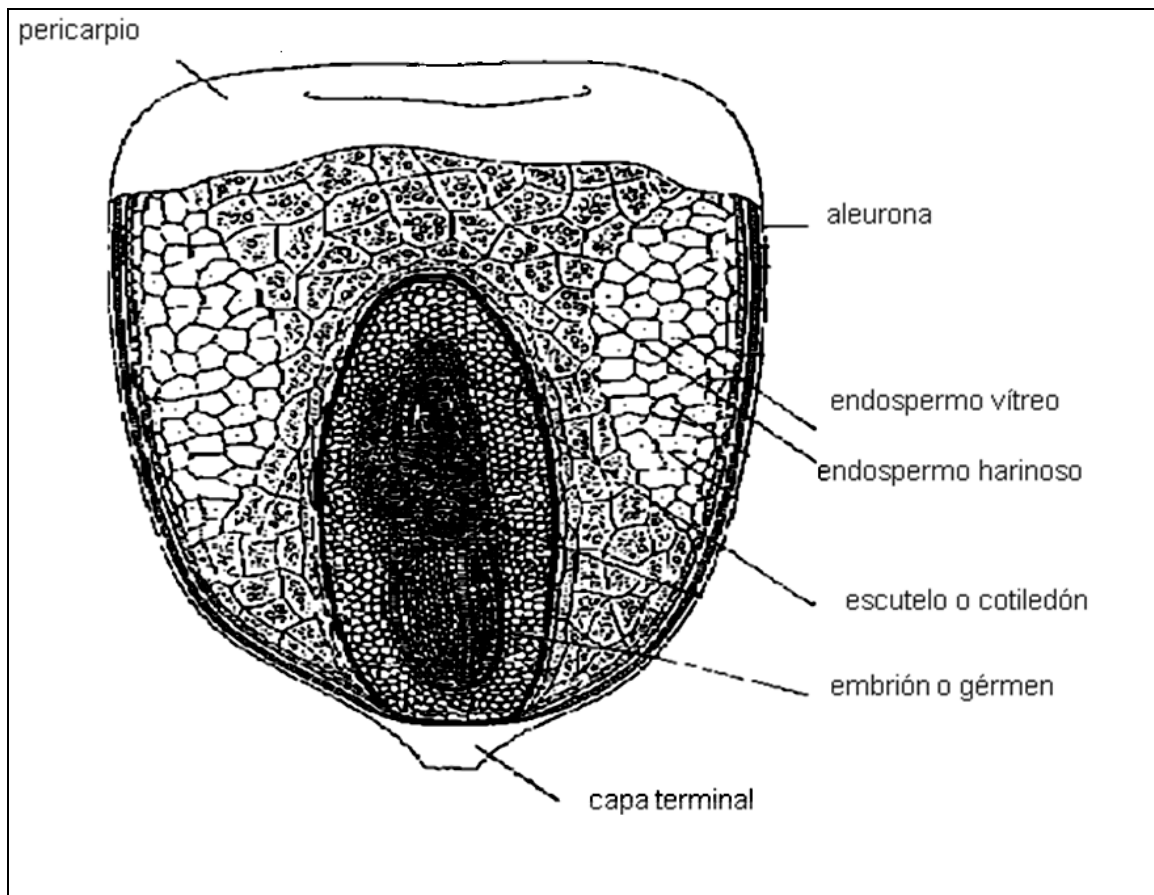


Figura 1.6 Estructura del maíz (Wolf, et al., 1969)

Pericarpio. Cubierta del fruto, de origen materno, se conoce como testa, hollejo o cáscara. Contiene trazas de almidón, grasa, proteína, cenizas, azúcares y fibra (carbohidratos no amiláceos como celulosa y hemicelulosa).

Aleurona. Capa de células del endospermo, de naturaleza proteica.

Endospermo. Tejido de reserva de la semilla que alimenta al embrión durante la germinación; es la parte de mayor volumen. Dos regiones bien diferenciadas hay en el endospermo suave o harinoso y el duro o endospermo vitreo, la proporción depende de la variedad. Ahí se encuentra la mayor parte del almidón (el 86.6% promedio del almidón total del grano) y contiene además, las

proteínas: albúminas, globulinas, prolamina (zeína) y glutelinas (gluten del maíz), y en escasas cantidades grasas (aceite), cenizas y azúcares.

Escutelo o cotiledón. Parte del embrión.

Embrión o germen. Planta en miniatura con la estructura para originar una nueva planta, al germinar la semilla. Contiene la mayor cantidad de grasa del grano (34.4% promedio) y almidón, cenizas, azúcares; biológicamente tiene más valor nutritivo en las proteínas: albúminas, globulinas, glutelinas (más %) y escasa zeína (prolamina).

Capa terminal. Parte que se une al olote, con una estructura esponjosa, adaptada para la rápida absorción de humedad. Entre esta capa y la base del germen se encuentra un tejido negro conocido como capa hilar, la cual funciona como un mecanismo sellante durante la maduración del grano (la formación de la capa negra indica grano maduro) (Reyes, 1990).

1.2.1.2 Composición del grano.

La composición química promedio del grano de maíz y de sus diferentes partes anatómicas mayoritarias se muestra en el cuadro tabla 1.2.

Tabla 1.2 Composición química de las partes del maíz (g/100g base seca)

Partes del grano	% en peso	Almidón	Proteína	Grasa	Azúcares	Cenizas
Grano total	100	72	10	5	2	1.7
Endospermo	83	87	9	1	0.5	0.2
Germen	12	8	20	34	12	10
Pericarpio	5	7	4	1	0.5	0.3

Fuente: Klaus y Karel, (1991)

En varios países como México, tiene escaso uso ganadero. El maíz se aprovecha directamente como alimento humano (tortillas, bollos, arepas, elote, etcétera) o como materia prima en la industria alimentaria (harina, maicena, aceite, mieles, etcétera) e industria diversa. En México, la mayor parte de la producción del maíz es para uso del grano como alimento humano en la fabricación de tortilla y/o la fabricación de harina de maíz nixtamalizado (Reyes, 1990).

La industrialización del maíz, es una de las pocas industrias autóctonas de México y de América. El proceso de fabricación de la tortilla es relativamente simple, pero tuvieron que haber pasado muchos siglos para su implementación (Reyes, 1990).

1.2.2 Nixtamalización del maíz

El nixtamal, es un tipo de masa preparada con maíz y con cal, principalmente, para la elaboración de tortillas en México. La palabra proviene del náhuatl *nextli*, o cenizas de cal, y *tamalli*, masa de maíz cocido (Boucher y Muchnik, 1995).

El tratamiento alcalino que se le da al grano de maíz, origina que la cantidad de calcio incorporado en el grano durante el proceso, sea muy importante, por diversas razones. La interacción entre calcio y los diferentes componentes del grano, determina las propiedades fisicoquímicas y sensoriales de productos como masa, tortillas y harinas instantáneas (Gutiérrez *et al.*, 2007). El calcio imparte sabor característico a la tortilla, facilita la remoción de pericarpio, controla la actividad microbiana, incrementa la gelatinización de los gránulos de almidón y aumenta el valor nutrimental (Hallaver, 1987). Durante el proceso de nixtamalización, los granos de maíz son cocidos en una solución de hidróxido de calcio, dejando un tiempo de reposo de 1-24 h. Valderrama *et al.* (2010), mostraron que durante el tiempo de reposo, ocurren diversos mecanismos de absorción de calcio dentro del grano de maíz, acumulación, difusión y percolación. Los resultados mostraron que a un tiempo crítico, la absorción de calcio en el

pericarpio sufre un cambio drástico, originando un incremento del contenido de calcio en el maíz nixtamalizado. Posteriormente es lavado dos o tres veces para remover el pericarpio, germen y restos de endospermo, el sobrenadante (llamado nejayote) es desechado. El material restante es entonces molido para obtener masa o alternativamente es molido y secado para obtener harina instantánea (Fernández-Muñoz *et al.*, 2006). El proceso de nixtamalización degrada y solubiliza las paredes de las células componentes del maíz, de esta manera facilita la eliminación del pericarpio.

Durante una nixtamalización a nivel laboratorio, solamente el 25% de hemicelulosa de pericarpio de maíz es solubilizada, las gomas del pericarpio del maíz son homogéneas, mientras los polisacáridos aislados del nejayote se muestran heterogéneos (Saulnier *et al.*, 1993).

La nixtamalización del maíz mejora su valor nutritivo, al desnaturalizarse las proteínas del maíz, particularmente las glutelinas, hace más disponibles al triptófano y lisina. En este proceso también ocurre la gelatinización del almidón, que permite la formación de la masa. El tiempo requerido de cocción del maíz con agua y cal depende de las características y variedades del maíz. El criterio amplio para determinar las condiciones adecuadas de nixtamalización son las propiedades mecánicas y sensoriales del resultado de las tortillas, que incluyen la extensibilidad, plasticidad, flexibilidad, suavidad, inflabilidad, textura, sabor y olor (Trejo-González *et al.*, 1982).

Un beneficio más, aportado por el medio alcalino durante el proceso de nixtamalización, es la destrucción de aflatoxinas en el maíz contaminado por *Aspergillus flavus*. (Trejo-González *et al.*, 1982).

1.3 El nejayote

En el nejayote se solubilizan minerales, grasas, vitaminas y algunas proteínas, como las albuminas y las globulinas (Badui, 2006). En general el nejayote contiene más del 60% de polisacáridos que no son almidón. El nejayote tiene altas concentraciones de materia orgánica en suspensión y en solución de 5 -50 g/L debido al uso de hidróxido de calcio en el proceso. El nejayote contiene de 6 a 8 % inicial de sólidos secos, que incluye parte del pericarpio, hemicelulosa, carbohidratos, proteínas, calcio, endospermo, pequeñas partes del germen y carotenoides (pigmentos), responsables de su color amarillo. Debido a los altos volúmenes de nejayote producidos durante la nixtamalización (5:1 proporción en peso inicial de maíz) y por su elevada concentración de materia orgánica, el nejayote obtenido en las fábricas de nixtamalización se considera altamente nutricional, sin embargo el líquido es altamente alcalino y si no es tratado se considera un contaminante para el medio ambiente (Velasco-Martínez *et al.*, 1997).

En la nixtamalización típica, procesando 50 kg de maíz a diario, se usa alrededor de 75 litros de agua y genera una cantidad equivalente de agua de desecho alcalina. Así, de esta manera, las alternativas de utilización de los residuos de nejayote en México son necesarias (Niño-Medina, 2009).

El nejayote por su alto contenido de cenizas 23.15%, las cuales contienen de 7.13 a 13.06% de calcio, podría ser utilizado como una fuente alterna de calcio en la alimentación de los animales domésticos como lo mostró Velasco-Martínez *et al.*, 1997.

El nejayote tiene una viscosidad baja, sin embargo los residuos de pericarpio que quedan en el líquido contienen gomas, como arabinosilanos, que presentan propiedades funcionales, tales como marcadores, selladores, emulsificantes, estabilizantes y espesantes (Saulnier *et al.*, 1993).

La composición del nejayote se muestra en la tabla 1.3.

Tabla 1.3 Composición del nejayote y sus sólidos

Componente	Nejayote (%)	Sólidos secos (%)
Humedad	97.85	7.04
Proteína	7.42	5.11
Fibra cruda	22.77	19.29
Grasa	1.48	0.81
Carbohidratos	55.67	52.45
Cenizas	12.66	23.15
Calcio	13.13	13.06
Fósforo	----	1.94

(Velasco-Martínez *et. al.*, 1997)

El nejayote se tira al drenaje, si se considera que se tiran más de 250 ton de desechos sólidos de maíz, esto equivale a la basura diaria de 4 millones de personas, además de 32 ton de cal y 10,000 m³ de agua caliente. El problema es serio y la realidad es que esto se diluye, porque la actividad industrial de la molienda del maíz, se da en industrias que procesan muy pocas cantidades. El proceso tradicional de nixtamalización, con sus 3500 años de edad, desde el punto de vista ecológico se encuentra en sus primeras etapas evolutivas y presenta muchas limitantes tecnológicas en este aspecto. El gran problema que presenta la industria para la preparación de harinas instantáneas y masa de nixtamal es el gran volumen de nejayote producido. Como resultado de este proceso, ocurren pérdidas importantes de tiamina, niacina, riboflavina, grasa y fibra.

Es por ello que surge la necesidad, de implementar una metodología que permita la eliminación de sólidos suspendidos, bajar la temperatura y neutralizar el pH del agua de nejayote, para un mejoramiento del medio ambiente y el aprovechamiento de estos sólidos como productos de alto valor agregado.

1.3.1 Alternativas de uso del nejayote

En el tratamiento de aguas residuales, se han tratado de instrumentar legislaciones que eviten la descarga de esta agua al drenaje con objeto de reducir el grado de contaminación de acuíferos, donde generalmente son enviadas dichas aguas, pero debido a la falta de tecnologías apropiadas, para tratar esta agua de desecho, con procesos, técnica y económicamente factibles para las condiciones específicas de cada sector o región, no se aplican en todas partes.

En el 2006 se logró instalar en el molino “El Esfuerzo” en Iztapalapa, un decantador; para ello se hizo una pequeña obra civil para la recolección del nejayote y la instalación de tubería, para la conexión entre equipos pues se está utilizando el nejayote recolectado ya que se utiliza para la limpieza y arrastre de maíz de las tinas al molino. Es necesario destacar que la realización de esta fase del proyecto, se logró con una inversión de \$20,050 (Ramírez, 2006).

A pesar de que el desarrollo está aún inconcluso, los ahorros en agua se están ya reflejando, en este momento se están economizando 2000 litros de agua por día, mismos que se utilizaban en la limpieza y arrastre de maíz de las tinas al molino, pues se está utilizando el nejayote recolectado para hacerlo.

Con la separación de los sólidos del nejayote, se busca reutilizar tanto el líquido filtrado como los sólidos separados, para evitar que sea desechado y no contamine, buscando alternativas de uso para los molineros-tortilleros. La separación de partículas en suspensión del nejayote, puede resolverse usando una gran diversidad de métodos, dependientes del tipo de sólido y de la proporción de sólido a líquido en la mezcla. Cuando la proporción de sólidos es bastante baja la filtración es el método más común.

Los residuos de la industria de la tortilla, generalmente son desechados y utilizados para preparar alimento para ganado; sin embargo, pueden ser fuentes

importantes de ácido ferúlico. El ácido ferúlico (AF), es un potente antioxidante abundante en el reino vegetal. Entre los residuos agroindustriales, el pericarpio de maíz es la fuente más prometedora de AF, pues posee altas concentraciones de este componente. Sin embargo, la alcalinidad y contenido microbiano del nejayote crearon un ambiente de inestabilidad que ocasionó variaciones importantes en la concentración del AF. Por esta razón se descartó la utilización de este residuo. Se determinó que las harinas contenían 8 g de AF/Kg. Para la recuperación de AF de las soluciones de hidrolizado, se evaluó la utilización de adsorbentes y resinas de intercambio iónico (Sánchez, 2008).

Los cereales son fuentes de gomas con aplicaciones alimenticias, tal es el caso de la goma de maíz, ésta nueva goma se extraería del nejayote. De esta manera la utilización del nejayote como fuente potencial de goma de maíz, puede representar una alternativa de uso de este residuo contaminante y una opción para disminuir el costo de extracción de esta goma. El nejayote se filtra para eliminar partículas gruesas en suspensión y se acidifica para detener la reacción que provoca la nixtamalización, después se eliminan del líquido las proteínas contaminantes y es tratado con alcohol para obtener la goma. Una vez seca, la fórmula es presentada en polvo, y de llegar a comercializarse podría tener un precio 50 % menor que la goma arábica, que alcanza hasta los 20 dólares por gramo en el mercado, ofreciendo las mismas propiedades e incluso otros beneficios (Carvajal- Millán, 2007).

Así de esta manera las alternativas de utilización para los residuos de nejayote en México son necesarias, por lo que es preciso implementar métodos de separación mecánicos-físicos como una etapa preliminar.

CAPITULO II METODOLOGÍA

2.1 Objetivos

El desarrollo experimental del proyecto se realizó en diferentes instituciones, permitiendo el uso de sus laboratorios con equipos.

- Laboratorio Experimental Multidisciplinario Nave 2000 de la Facultad de Estudios Superiores-Cuautitlán (UNAM), Edo. de México.
- Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada (UNAM), Campus Juriquilla, Querétaro, Qro.
- Facultad de Ciencias Naturales (UAQ), Campus Juriquilla, Querétaro, Qro.

Así mismo el Nejayote se recolectó de un molino donde realizan el proceso de nixtamalización tradicional, el cual está ubicado en Avenida Francisco I Madero, el Rosario Cuautitlán Izcallí.

OBJETIVO GENERAL: Evaluar los filtrados de nejayote obtenidos durante la filtración en un equipo prototipo y establecer las mejores condiciones de proceso como una alternativa de tratamiento preliminar del nejayote.

OBJETIVOS PARTICULARES:

1. Realizar filtraciones de nejayote en embudo Buchner con diferentes medios filtrantes para seleccionar los que presenten mayor velocidad de filtración y calidad de filtrado.
2. Realizar filtraciones de nejayote en embudo Buchner con ayudafiltro a diferentes espesores de precapa, seleccionando el valor de precapa en el cual se ha formado completamente la torta de nejayote y la velocidad de filtración es mayor.

3. Realizar filtraciones de nejayote en un equipo prototipo a diferentes presiones y relaciones de dosificación para obtener la resistencia específica de la torta (α) y resistencia del medio filtrante (Rm).

4. Evaluar el líquido filtrado mediante colorimetría y determinar el contenido de calcio para correlacionar los mejores resultados con las condiciones de filtración de nejayote.

El cuadro metodológico se muestra en la figura 2.1.

OBJETIVO GENERAL: Evaluar los filtrados de nejayote obtenidos durante la filtración en un equipo prototipo y establecer las mejores condiciones de proceso como una alternativa de tratamiento previo del nejayote.

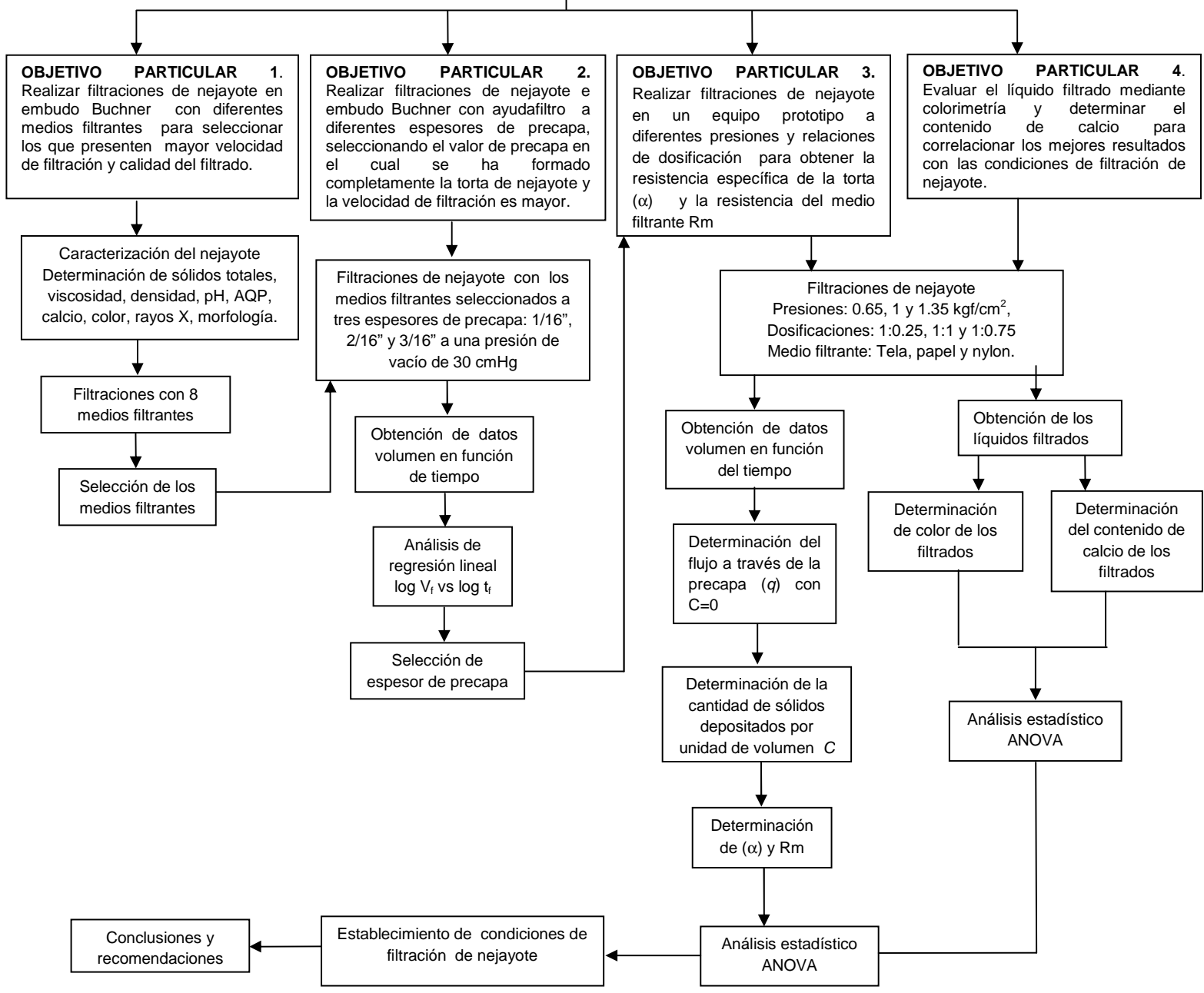


Figura 2.1 Cuadro metodológico

2.2 Recolección de la muestra

Para tener un mayor control de la muestra y condiciones del proceso de nixtamalización (ver figura 2.2), se recolectaba nejayote en envases de 20 litros dos veces por semana.

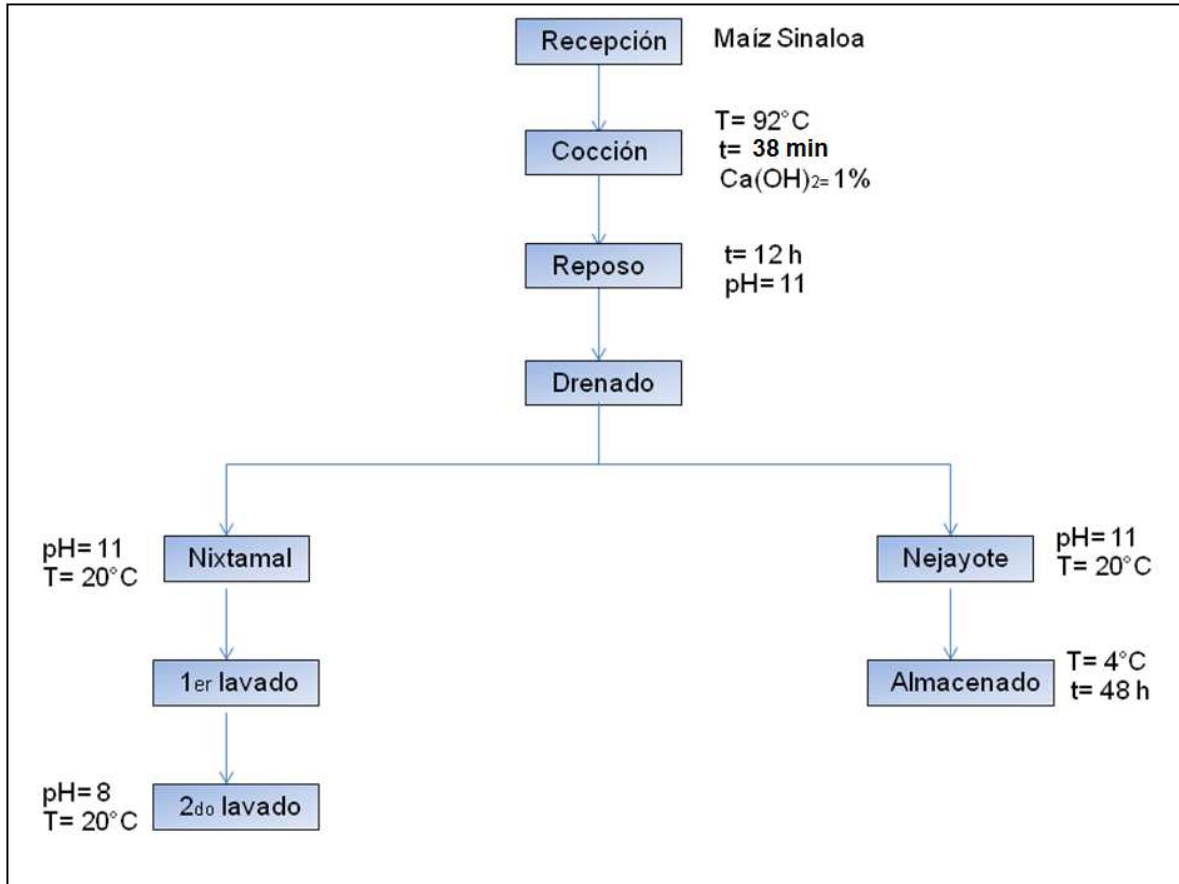


Figura 2.2 Diagrama de proceso de nixtamalización

2.2.1 Descripción del proceso de nixtamalización

Recepción

El maíz Sinaloa es recibido en el molino en costales de 50 kg.

Cocción

En una solución de hidróxido de calcio al 1% se precocen granos de maíz a una temperatura de 92°C por un tiempo de 38 minutos. Durante este proceso se

incrementa el porcentaje de calcio y disponibilidad de niacina, lo que contribuye a mejorar el nivel nutricional del producto.

Reposo

Durante el tiempo de reposo de 12 horas ocurre el mecanismo de absorción, acumulación y percolación de calcio en las capas más externas e internas del pericarpio (Valderrama-Bravo *et al.*, 2010). En esta etapa, existe la hidrólisis de los componentes del pericarpio, tales como heteroxilanos (Niño-Medina, 2009), dando origen a la apertura de nuevas trayectorias para la libre difusión de calcio (Laria *et al.*, 2007). Valderrama-Bravo *et al.* (2010) demostraron por microscopía electrónica de barrido, que durante el tiempo de reposo el fenómeno de percolación está presente, evidenciado este suceso, por la presencia de microhoyos en la capa más interna del pericarpio (aleurona).

Durante la cocción y el tiempo de reposo, se alcanza en la solución de hidróxido de calcio un pH de 11. El proceso facilita diversas transformaciones del grano, como la pérdida del pericarpio, pérdidas de proteínas solubles, principalmente albúmina y globulina de bajo peso molecular, contenidas en el germen y la parcial gelatinización del almidón. Estos cambios químicos y reológicos contribuyen a mejorar la textura del maíz, lo cual contribuirá a la consistencia final de la masa (Méndez-Montalvo *et al.*, 2007).

Drenado

Consiste en separar el líquido sobrenadante (nejayote) que lleva algunas porciones de pericarpio. De este proceso se obtienen dos productos, el nixtamal cocido y el nejayote.

Nixtamal

El grano de maíz precocido es llamado “nixtamal”, el cual es lavado para desprender por completo los restos de pericarpio y disminuir el valor de pH hasta 8. Posteriormente, es molido en un equipo de discos de piedras volcánicas y

amasado, en una mezcladora de espas marca Celorio con una capacidad de 50 kg.

Nejayote

El líquido sobrenadante que tiene un pH de 11 es almacenado en cámaras de refrigeración a 4°C por un tiempo no mayor a 48 horas. El nejayote es posteriormente filtrado a temperatura ambiente.

2.3. Caracterización del nejayote

2.3.1 Sólidos Totales

Para la determinación de sólidos totales, se tomaron 10 mL de muestra de los envases de nejayote de que se llevaban cada semana, para obtener un valor promedio del porcentaje de sólidos presentes.

La prueba se realizó basada en el método 925.09 del AOAC, (2000). Se tomaron 10 muestras de nejayote de 10 mL, agitándolo previamente para obtener una muestra homogénea y se colocó en charolas de aluminio previamente puestas a peso constante. Los cálculos se realizaron con la ecuación 2.1.

$$\%S.T. = 100 - \left(\frac{W_2 - W_1}{W_2} \times 100 \right) \quad (2.1)$$

S.T.= Sólidos Totales

W_2 = Peso de la muestra húmeda (g)

W_1 = Peso de la muestra seca (g)

De los datos obtenidos se obtuvo el promedio y desviación estándar.

2.3.2 Densidad

La medición de densidad se realizó en un picnómetro a 17°C, considerando que la densidad de la muestra, se puede evaluar tomando como referencia la de un fluido conocido que en este caso es agua.

La determinación de densidad se realizó tomando como referencia la norma ASTM D-854 y el procedimiento fue:

- Pesar el picnómetro vacío
- Llenar el picnómetro con agua hasta el volumen indicado y registrar su peso.
- Llenar el picnómetro con el nejayote hasta el volumen indicado y registrar su peso.
- Realizar el procedimiento 5 veces.
- Calcular la densidad a partir de la ecuación 2.2 y obtener la media aritmética y desviación estándar.

$$\rho_1 = \frac{m_1}{m_2} \rho_2$$

(2.2)

Donde:

m_1 = Masa de nejayote.

ρ_1 = Densidad del nejayote.

m_2 = Masa de agua (o líquido de densidad conocida).

ρ_2 = Densidad del agua (o líquido de densidad conocida).

2.3.3 Viscosidad

La determinación de la viscosidad se realizó en el viscosímetro de Ostwald (Figura 2.3), el cual consiste en medir el tiempo que emplea un volumen de líquido contenido entre dos marcas A y B en fluir, en virtud de la gravedad por un capilar. Determina la viscosidad relativa o específica y consiste en determinar la viscosidad relacionada con el agua.

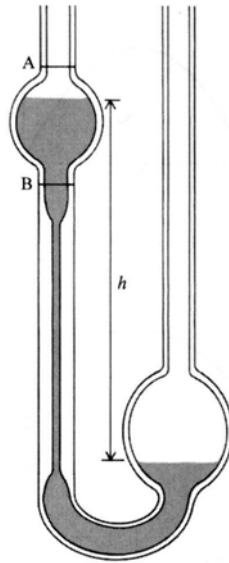


Figura 2.3 Viscosímetro de Ostwald

Se midió el tiempo de los dos fluidos cuyas viscosidades se desea conocer, y como la presión de conducción es la fuerza de gravedad y proporcional a la densidad del líquido, la viscosidad absoluta se obtiene por medio de la ecuación 2.3.

$$\mu_2 = \frac{\rho_2}{\rho_1} \mu_1 \tag{2.3}$$

Donde:

μ_2 = Viscosidad del nejayote

μ_1 = Viscosidad del agua

ρ_1 = Densidad del agua

ρ_2 = Densidad del nejayote

El procedimiento se realizó de la siguiente forma:

- Agregar al viscosímetro agua, de tal manera que el bulbo grande quede lleno hasta la mitad.

- Llenar con el líquido los dos bulbos pequeños con ayuda de la perilla de succión, de tal manera que no queden burbujas de aire dentro del viscosímetro.
- Medir el tiempo que se demora en descender el líquido por las marcas A y B.
- Purgar el viscosímetro con el nejayote y realizar el mismo procedimiento que con el agua.
- Realizar el procedimiento cinco veces para cada fluido y obtener la media y desviación estándar.

2.3.4 pH

La medición de pH en el nejayote y en las muestras filtradas se realizó basado el método 943.02 del AOAC (2000). La temperatura a la cual se realizó la medición fue 21.20°. El potenciómetro HANNA instruments HI 8014 fue calibrado con una solución buffer de pH 4.

Se realizaron 10 mediciones y se obtuvo el promedio y desviación estándar.

2.3.5 Análisis Químico Proximal (Base seca)

En la tabla 2.1, se muestra los métodos empleados para las determinaciones del análisis químico proximal del nejayote en base seca, basados en el AOAC (1998).

Tabla 2.1 Métodos químicos

Componente	Método
Humedad	925.10
Grasa	920.39
Cenizas	923.03
Proteína	954.01
Fibra	962.09

Todos los análisis se realizaron por triplicado y se obtuvo la media aritmética.

2.3.6 Determinación de calcio

El contenido de calcio en el nejayote, se realizó por espectrofotometría de absorción atómica siguiendo el método 971.20 del AOAC (1998). Se utilizó un estándar de 1000 ppm de calcio para preparar la curva de calibración y una referencia certificada *corn meal-solid*, para establecer el porcentaje de recuperación en un espectrofotómetro AA-110 VARIAN. Se emplearon como gases aire-acetileno para producir la flama. El aparato está equipado con una lámpara de deuterio con corrector de trasfondo y una lámpara de cátodo hueco para determinar calcio. Las condiciones experimentales del equipo fueron: presión de aire seco 12 *psi*, presión de acetileno 70 *psi*, longitud de onda del láser 422.76 *nm*, corriente de la lámpara: 10 μ A y corte de ancho 0.7 *nm*.

Las muestras se realizaron por triplicado y se obtuvo el promedio y desviación estándar.

2.3.7 Color

La determinación de color del nejayote se realizó en un colorímetro Minolta CR 300. Los parámetros de color correspondientes al espacio de color uniforme CIELAB (CIE, 1978) fueron obtenidos directamente del equipo. Cada color en el espacio, tiene una única localización, definida por sus coordenadas cartesianas con respecto a los ejes L, a y b. Donde L es el grado de luminosidad y cubre un valor de 100 para blanco y 0 para negro; a es el grado de rojizo para valores positivos y verdoso para valores negativos. El valor b es el grado de amarillento para valores positivos y azulado para valores negativos (Adams, 1942).

Se realizaron mediciones de color por triplicado en 3 diferentes muestras y se obtuvo el promedio y desviación estándar.

2.3.8 Rayos X

La difracción de rayos X fue empleado para detectar la presencia de componentes cristalinos de polvo de Nejayote. Las muestras de polvo (USA malla 60) fueron densamente empacadas en una moldura de Al. El patrón de difracción de rayos X de las muestras fueron evaluadas en un difractómetro Rigaku Miniflex, operando a 35kV, 15mA con radiación Cu K α y longitud de onda $\lambda=1.5406$ A. Los difractogramas fueron obtenidos desde 4-80 $^{\circ}$ en una escala 2 θ , con un intervalo de 0.05. El software del análisis del espectro usado fue Diffract/AT, Socavin VI-2.

2.3.9 Morfología

La morfología de los sólidos de nejayote fueron analizados en un microscópio electrónico de barrido a alto vacio (JEOL JSM-GOGOLV). Las muestras fueron montadas en soportes de bronce y fijadas con una cinta magnética de grafito. A las muestras se les realizó un baño de oro en un evaporador de metales, las cuales fueron sometidas a 3 ciclos de rotación por 4 minutos cada uno. Posteriormente las muestras fueron transferidas al microscopio donde fueron observadas a 20 kV.

2.4 Filtración en embudo Buchner

2.4.1 Filtraciones preliminares sin ayudafiltro

Una vez caracterizado el nejayote se realizaron filtraciones en el embudo Buchner sin la utilización de ayudafiltro.

Se seleccionaron 8 medios filtrantes y se elaboró un catálogo para numerar cada uno de ellos, como se muestra en la figura 2.4.



Figura 2.4 Medios filtrantes

Las características y tipo de material de cada medio filtrante se muestran en la tabla 2.2.

Tabla 2.2 Características de los medios filtrantes

No. medio	Características
1	Lona de fibras de algodón
2	Poliéster con hilos de nylon
3	Polipropileno
4	Algodón
5	Polipropileno con Nylon
6	Tela poliéster # 22 , tamaño de poro 8-11 micras
7	Nylon con hilo metalizado, tamaño de poro 10-12 micras, es estable al calor hasta 130°C
8	Papel, tamaño de poro 9-11 micras

Las pruebas de filtración en embudo Buchner se realizaron con la finalidad de seleccionar el medio filtrante y conocer la necesidad de utilizar ayudafiltro. El embudo es montado como se muestra en la figura 2.5.

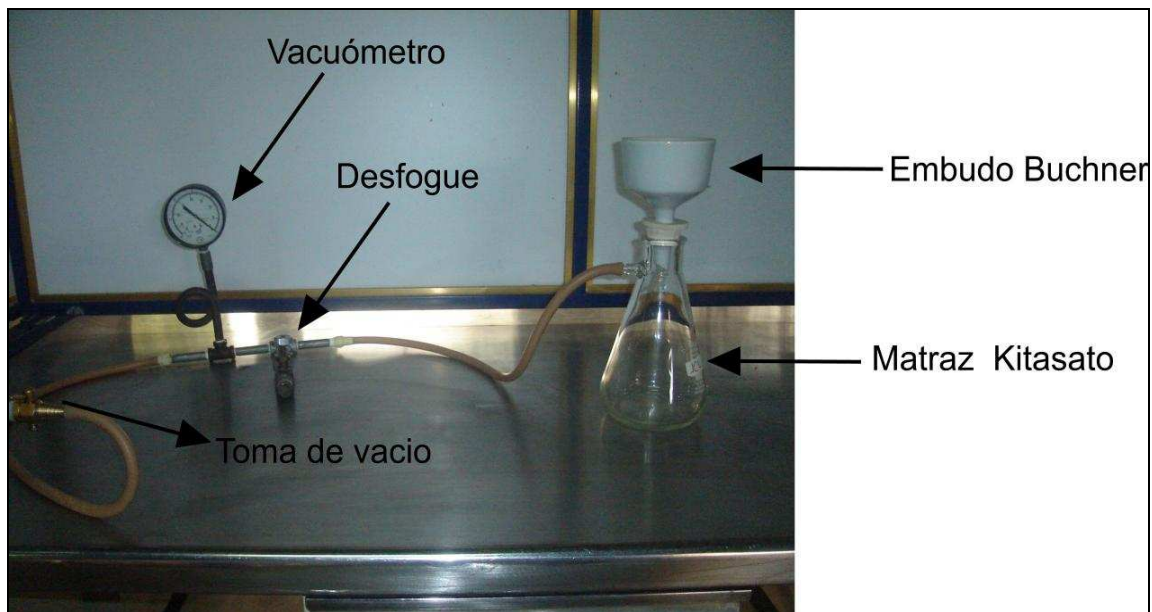


Figura 2.5 Embudo Buchner

El procedimiento que se llevó a cabo para las filtraciones se indica a continuación:

- Agregar 100 ml de nejayote en la probeta
- Colocar el medio filtrante en embudo Buchner como se muestra en la figura 2.6.



Figura 2.6 Filtración en embudo Buchner

- Agregar agua al matraz kitasato para ir ajustando la presión de vacío a 30 cmHg y así mismo mojar el medio filtrante
- Una vez ajustada la presión retirar el agua del matraz

- Verter 100 ml de nejayote en el embudo Buchner e inmediatamente activar la presión de vacío e ir la controlando con ayuda del vacuómetro y registrar el tiempo de filtrado.
- Detener la presión de vacío cuando no se observe más líquido filtrado de nejayote que pasa a través del medio filtrante.
- Retirar el nejayote del matraz y colocarlo en una probeta de 100 ml para determinar el volumen de filtrado y calcular la velocidad de filtración mediante la ecuación 2.4.

$$V_{fil} = \frac{V_f}{t_f} \quad (2.4)$$

Donde:

V_{fil} = Velocidad de filtración mL/s.

V_f = Volumen final de filtrado mL.

t_f = Tiempo final de filtrado s.

- Realizar el procedimiento por triplicado para cada uno de los medios filtrantes.
- Recolectar 10 mL del filtrado y observar todos los filtrados.
- Realizar un histograma para analizar los clarificados de los filtrados con las velocidades de filtración.

2.4.2 Filtraciones con ayuda de filtro

2.4.2.1 Caracterización de la tierra de diatomea

Se empleó una tierra de diatomea de la marca Celite, Hyflo Super Cel de la compañía Almería S.A. de C.V.,

Rayos X

El método empleado fue el mismo que el punto 2.3.8.

Morfología

El método empleado fue el mismo que el punto 2.3.9.

2.4.2.2 Cálculos para fijar el espesor de precapa

Después de haber seleccionado los medios filtrantes, se realizó un ANOVA con un factor, para seleccionar el espesor de precapa a tres niveles de variación 1/16", 2/16" y 3/16". La variable de respuesta fue la velocidad de filtración.

El valor teórico para formar un espesor de precapa de 1/16" es de 5 a 7 kg por cada 10 m² de área de filtración (Toledo, R., 2007).

Se midió el diámetro del embudo que es de 8.5 cm y se calculó el área de filtración.

$$\text{Área} = 0.00567 \text{ m}^2$$

Considerando el promedio de 6 kg, en base a la relación, se efectuó la siguiente regla de cálculo para obtener la cantidad de ayudafiltro.

6 kg	10 m ²	Área teórica
0.00340 kg	0.00567 m ²	Área de embudo

Para verificar la validez de la relación teórica se formaron las precapas y se midieron con un Vernier. Las cantidades empleadas para cada espesor se muestran en la tabla 2.3.

Tabla 2.3 Cantidades de ayuda filtro para formar precapa

Espesor de precapa	Ayudafiltro (g)
1/16"	3.40
2/16"	6.8
3/16"	13.05

El procedimiento para formar las precapas se describe a continuación:

- Montar el equipo como se muestra en la figura 2.5.
- Pesar la cantidad de tierra de diatomea necesaria para el espesor deseado; las cantidades se muestran en la tabla 2.3.
- Mezclar la tierra de diatomea en 300 ml de agua, hacerla pasar por el medio filtrante y retirar el agua del matraz.
- Una vez formada la precapa se filtró el nejayote registrándose datos de tiempo y volumen de filtración como se muestra en la figura 2.7.



Figura 2.7 Filtración de nejayote con ayudafiltro en forma de precapa.

2.4.2.3 Selección de espesor de precapa

Para la selección de espesor de precapa se trabajó sólo con un medio filtrante para reducir número de experimentaciones en la celda de filtración.

El criterio para la selección de precapa se basó en el método propuesto por Tiller, 1962, descrito en el punto 1.5.1.

Con los datos obtenidos experimentalmente se realizó un análisis de regresión lineal del $\log V_f$ versus $\log t_f$ para obtener la pendiente y el coeficiente de correlación.

2.5 Filtración en celda

Como primer paso a seguir para filtrar en la celda, se le dió mantenimiento, se lijó el cuerpo de la celda con una lija No. 1200 para abrillantar el cuerpo de acero inoxidable. También se lijaron los tubos y las válvulas que componen la celda, así como los soportes de la misma, para después ser pintados. La celda se muestra en la figura 2.8.

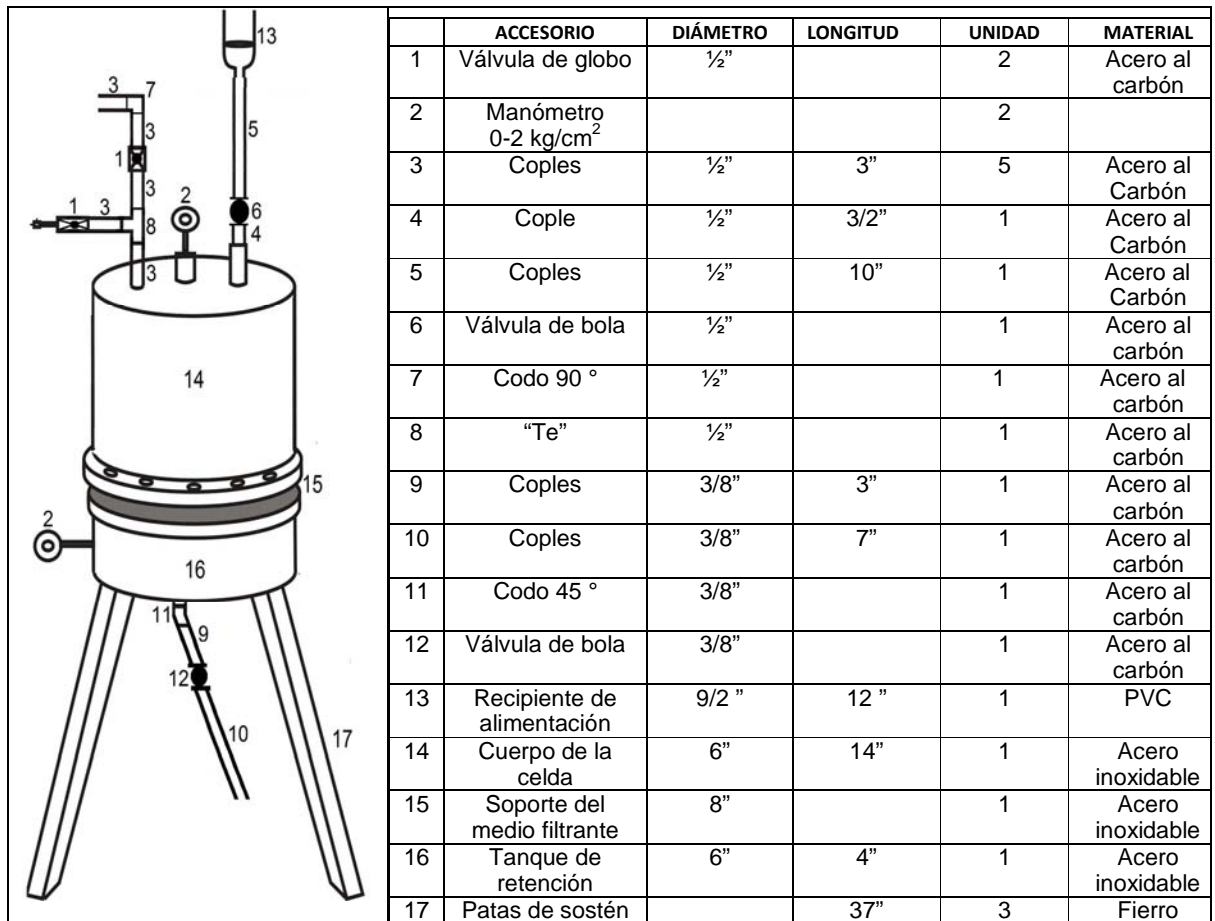


Figura 2.8 Celda de filtración

2.5.1 Cálculos de precapa en celda

Para formar la precapa en celda de filtración se siguió la misma secuencia que en el embudo Buchner para el cálculo de la cantidad de tierra de diatomea, tomando en cuenta el diámetro de la celda para obtener el área de filtración.

Se midió el diámetro interno de los empaques, que fue de 15 cm y se calculó el área de filtración.

$$\text{Área} = 0.0176 \text{ m}^2$$

Considerando el promedio de 5 kg, en base a la relación, se efectuó la siguiente regla de cálculo para obtener la cantidad de ayudafiltro.

5 kg	10 m ²	Área teórica
0.0088 kg	0.0176 m ²	Área de celda

Con el espesor de precapa seleccionado se pesó la cantidad necesaria de ayudafiltro (17.6 g, 2/16”).

2.5.2 Cálculos de dosificación

La utilización de ayudafiltro en forma de dosificación, depende de la cantidad de sólidos presentes en el nejayote. La variación de la relación de dosificación y la cantidad de ayudafiltro adicionada se muestra en la tabla 2.4.

Tabla 2.4 Cantidades de ayudafiltro para dosificación

Relación de dosificación SN:AF	Ayudafiltro (g)
1:0.25	9.1
1:5	18.2
1:75	27.3

SN= Sólidos de nejayote

AF=Ayudafiltro

El procedimiento para preparar el nejayote con la dosificación requerida se describe a continuación:

- Adicionar la cantidad de tierra diatomea directamente al nejayote a filtrar tomando en cuenta la cantidad de sólidos presentes en el nejayote, es decir, si se van a filtrar 1000mL de nejayote y se adicionan 9.1 g de tierra de diatomea el volumen de nejayote será 990.9 mL.
- Mezclar la solución.

2.5.3 Obtención de volumen y tiempo de filtración

Para la selección de los niveles de variación de presión se realizaron pruebas preliminares para determinar los rangos de aplicación.

Las variables seleccionadas y sus niveles de variación fueron:

Independientes:

Presión: 0.65, 1.0 y 1.35 kgf/cm²

Dosificación: 1:0.25, 1:0.5 y 1:0.75.

Medios filtrantes: Tela, nylon y papel

Respuesta: Velocidades puntuales de filtración.

Para la obtención de los datos se realizó el siguiente procedimiento

- Se colocan los empaques sobre la base de la celda como lo muestra la figura 2.9.

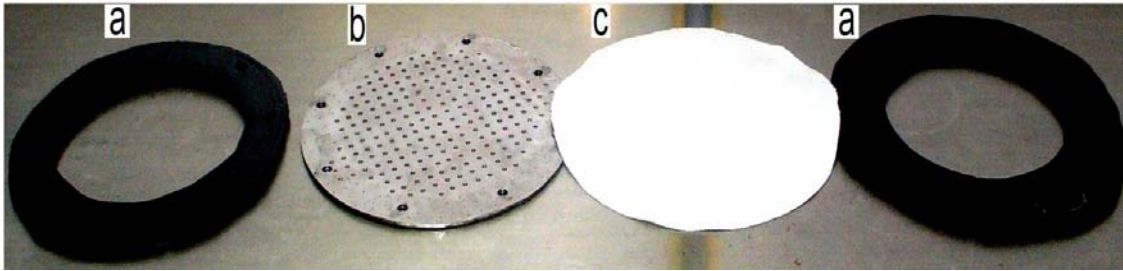


Figura 2.9 Accesorios de la celda a) Empaques b) Soporte c) Medio filtrante

- Se monta el cuerpo de la celda para ser atornillada.
- Se adiciona la suspensión de ayudafiltro en el tanque de alimentación.
- Se abre la válvula de bola No. 6 para dejar pasar la suspensión.
- Se abre la válvula de globo No. 1 para permitir el paso del aire controlando la presión con ayuda del manómetro.
- Se abre la válvula de bola No. 12 que permite la salida del filtrado, y es cerrada cuando deje de salir agua.
- Se cierra la válvula No. 1 para no permitir el paso del aire.
- Se adiciona el nejayote a filtrar en el tanque de alimentación y se abre la válvula de bola No. 6 para permitir el paso dentro de la celda, una vez dentro la suspensión es cerrada la misma válvula.
- Nuevamente se abre la válvula No. 1 regulando la presión y es abierta la válvula No.12 para empezar el ciclo de filtración (ver figura 2.10).



Figura 2.10 Filtración en la celda

- El filtrado es recolectado en una probeta para registrar el tiempo y el volumen (ver figura 2.10).
- Al finalizar el ciclo de filtración se cierran las válvulas No. 12 y No.1, entonces se desmonta y se extrae la torta.
- Se realizó el mismo procedimiento de filtración para los tres medios filtrantes seleccionados tela, nylon y papel.

Las velocidades de filtración se analizaron estadísticamente por ANOVA a un nivel de significancia de $\alpha=0.5$ y se realizó un análisis de medias TUKEY.

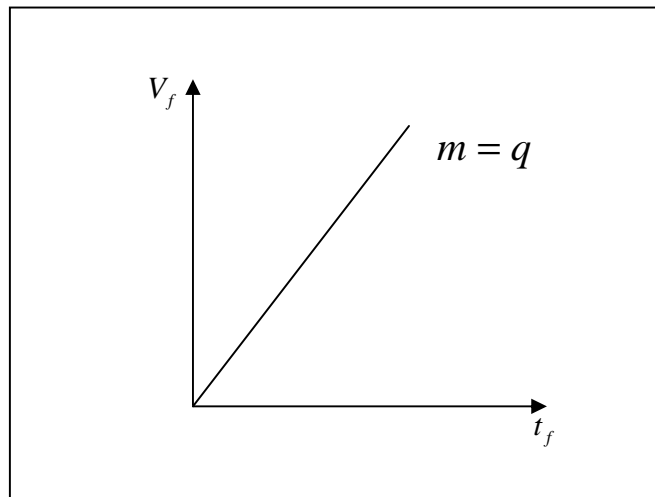
Se graficaron los valores de volumen versus tiempo.

2.5.4 Cálculo de la resistencia del medio filtrante (R_m) y la resistencia específica de la torta (α)

2.5.4.1 Determinación del flujo a través de la precapa (q)

Para obtener el valor de q se realizó el siguiente procedimiento:

- Formar la precapa en la celda siguiendo el mismo procedimiento que en el embudo Buchner.
- Pasar 1600 ml de agua a través de la celda y registrar datos de tiempo y volumen.
- Analizar los datos de volumen en función del tiempo por regresión lineal en donde el valor de la pendiente es el valor de q , como se muestra en la siguiente gráfica:



- Repetir el mismo procedimiento por triplicado para cada una de las presiones establecidas, 0.65, 1.0 y 1.35 kgf/cm².

2.5.4.2 Determinación de R_m .

Retomando la ecuación 1.28 $\frac{1}{q} = \left(\frac{\mu R_m}{\Delta P A} \right)$ el valor de R_m , se despeja de la ecuación para cada una de las presiones establecidas. Se realizan tres replicas para cada unidad experimental.

2.5.4.3 Determinación de α .

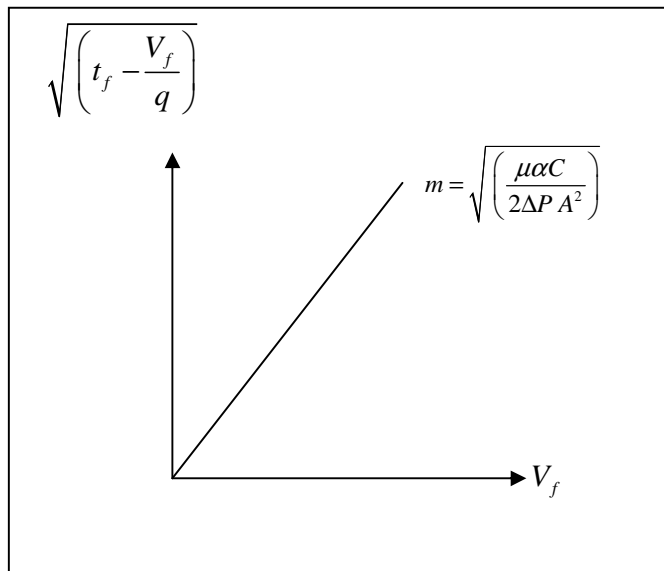
Retomando la ecuación 1.29 $\left(t_f - \frac{V_f}{q}\right) = \left(\frac{\mu\alpha C}{2\Delta P A^2}\right) V_f^2$, para linealizarla se aplica raíz cuadrada:

$$\sqrt{\left(t_f - \frac{V_f}{q}\right)} = \sqrt{\left(\frac{\mu\alpha C}{2\Delta P A^2}\right)} V_f \quad (2.5)$$

Relacionando la ecuación 2.5 con una función lineal:

$$y = \sqrt{\left(t_f - \frac{V_f}{q}\right)} \quad m = \sqrt{\left(\frac{\mu\alpha C}{2\Delta P A^2}\right)}$$
$$y = m V_f \quad (2.6)$$

Se grafican los valores de “y” en función a V_f y por regresión lineal se obtiene la pendiente (m) de recta y se despeja α .



El valor de α despejado de la pendiente de la recta representa la ecuación 2.7.

$$\alpha = \frac{m^2 2\Delta P A^2}{\mu C} \quad (2.7)$$

Donde:

A= Área de filtración de la celda (m²)

(ΔP)=Caída de presión total en el sistema (kg/ms²)

μ=Viscosidad del nejayote (Pa.s)

C=Cantidad de sólidos depositados por unidad de volumen filtrado (kg/m³)

m = Pendiente que resulta de graficar los datos tabulados de cada corrida (s/m⁶)

Se realizó un ANOVA para cada uno de los medios filtrantes, teniendo como factores la presión y relación de dosificación. La variable de respuesta fue la resistencia específica de la torta α.

2.5.5 Cálculo de C (sólidos depositados por unidad de volumen)

Para la determinación del valor de C se siguió el procedimiento que se muestra a continuación.

- Realizar las filtraciones con las condiciones especificadas en el diseño.
- Al final de cada corrida, extraer la torta de filtración y pesarla
- Secar la torta en el horno y pesar nuevamente
- Obtener la humedad de la torta y posteriormente obtener los sólidos retenidos, restándole el peso de la tierra de diatomea utilizada
- El valor de C es calculado con la ecuación 2.8.

$$C = \left(\frac{\text{Sol.Retenido}(g)}{1600ml} \right) \left(\frac{1kg}{1000g} \right) \left(\frac{1 \times 10^6}{1m^3} \right) \quad (2.8)$$

- El valor de C es modificado, según la relación de dosificación que se esté trabajando.

2.5.6 Color

La determinación de color se realizó a las muestras filtradas y el equipo empleado fue colorímetro Minolta CR-300 y la metodología empleada fue apoyada por el trabajo de Meléndez–Martínez *et al.* (2005). Se evaluó la diferencia de color ΔE_{ab} que es un parámetro muy importante para determinar la relación entre los análisis visuales y numéricos. Este valor es calculado por la ecuación 2.9 y definido como la distancia euclidiana entre dos puntos en el espacio tridimensional definido por L, a y b.

$$\Delta E_{ab} = \sqrt{(L_{ref} - L_i)^2 + (a_{ref} - a_i)^2 + (b_{ref} - b_i)^2} \quad (2.9)$$

Donde:

L_{ref} , a_{ref} y b_{ref} ,= Coordenadas de color del neyayote.

L_i , a_i y b_i = Coordenadas de color del filtrado.

Los valores de diferencia de color se obtuvieron por triplicado y se analizaron estadísticamente por ANOVA con un nivel de significancia de $\alpha=0.05$.

2.5.7 Calcio

La determinación de calcio se realizó a las muestras filtradas y el método aplicado fue igual que el realizado para la muestra de nejayote.

Los valores de calcio se obtuvieron por triplicado y se analizaron estadísticamente por ANOVA con un nivel de significancia de $\alpha=0.05$.

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Caracterización del Nejayote

3.1.1 Sólidos Totales

En la tabla 3.1 se muestran los resultados de la determinación de sólidos totales en el nejayote.

Tabla 3.1 Determinación de sólidos totales del nejayote.

Replica	% Sólidos Totales
1	2.35
2	2.5
3	2.25
4	2.2
5	1.9
6	2.4
7	2.32
8	2.1
9	2.45
10	2.33
Promedio	2.28
DS	± 0.18

Como se observa en la tabla 3.1 el contenido de sólidos de nejayote es muy bajo, sin embargo es importante retirar los sólidos debido a la alcalinidad del nejayote sin filtrar.

3.1.2 Densidad

En la tabla 3.2 se muestran los resultados de la determinación de la densidad de agua y nejayote obtenidos a 17°C.

Tabla 3.2 Determinación de densidad.

Replica	Densidad agua (kg/m³)	Densidad nejayote (kg/m³)
1	991.460	1002.545
2	991.440	1004.658
3	990.325	1003.168
4	992.125	1003.542
5	990.683	1003.680
Promedio	991.407	1003.519
DS	± 0.906	± 0.773

En los resultados obtenidos de la densidad del nejayote obtenida a 17°C, se observa que la densidad es muy cercana a la del agua (991.407 Kg/m³), debido a la baja cantidad de sólidos presentes en la muestra.

3.1.3 Viscosidad

Los resultados de los tiempos y viscosidades obtenidos para el agua y nejayote a 17°C en el viscosímetro de Ostwald se muestra en la tabla 3.3.

Tabla 3.3 Determinación de tiempos de caída en el viscosímetro Ostwald

Replica	Tiempo Agua (s)	Tiempo Nejayote (s)
1	11.78	28.53
2	11.95	28.47
3	11.98	28.00
4	11.87	28.20
5	11.89	28.74
Promedio	11.89	28.39
DS	± 0.08	± 0.29

El valor de viscosidad del nejayote fue:

$$\mu_{\text{nejayote}} = 0.002584 \text{ Pa s}$$

El resultado obtenido muestra un valor bajo de viscosidad correspondiente a un fluido newtoniano, aproximadamente dos veces el valor de viscosidad del agua ($\mu_{\text{agua}} = 0.0010694 \text{ Pa s}$).

3.1.4 pH.

En la tabla 3.4 se muestran los resultados de la determinación de pH en el nejayote.

Tabla 3.4 Determinación de pH del nejayote.

Replica	pH
1	10.94
2	10.44
3	10.24
4	10.88
5	11.87
6	11.84
7	11.22
8	11.35
9	11.01
10	11.55
Promedio	11.134
DS	± 0.49

El valor del pH del nejayote es muy alto por el contenido de Ca(OH)_2 adicionado en el proceso de nixtamalización.

3.1.5 Análisis Químico Proximal (Base seca)

En la tabla 3.5 se muestran los resultados obtenidos del análisis químico proximal.

Tabla 3.5 Determinación de AQP

Componente	Porcentaje (%)	DS
Humedad	5.5526	± 0.60
Grasa	0.3563	± 0.09
Cenizas	31.0546	± 1-31
Proteína	4.5852	± 0.89
Fibra	23.5332	± 1.60
Carbohidratos	34.9181	± 1.76

En la tabla 3.5 se observa que el contenido de cenizas es alto debido a la presencia de calcio y la fibra, también muestra un valor elevado por la presencia de celulosa, hemicelulosa y lignina que son los compuestos mayoritarios del pericarpio. Los resultados reportados por Velasco-Martínez *et al.*1997 también muestran valores altos en los contenidos de cenizas y fibra.

3.1.6 Calcio

El valor promedio de contenido de calcio fue 1526 mg/L, que al realizar un análisis comparativo con el contenido de calcio en agua de 40- 60 mg/L para un agua blanda y de 120-200 mg/L para un agua dura. La cantidad de calcio presente en el nejayote es muy elevada por lo que es un fuerte contaminante si éste es arrojado al drenaje.

3.1.7 Color

En la tabla 3.6 se muestran los resultados obtenidos de color de nejayote.

Tabla 3.6 Mediciones de color de nejayote

Replica	L	A	b
1	26.80	2.68	2.90
2	25.45	2.98	3.54
3	24.41	2.57	2.98
4	23.5	2.89	3.04
5	23.01	2.96	2.41
6	22.57	3.25	3.41
Promedio	24.29	2.89	3.20
DS	± 1.60	± 0.24	± 0.25

Los datos obtenidos de “a” indican que el color de nejayote tiende a estar en la zona de rojizo y el valor de “b” en la zona de amarillo. Respecto al factor de luminosidad “L”, se encuentra alejado del valor blanco por la presencia de color en el nejayote. Estos valores se contrastan con una muestra de nejayote representada por la figura 3.1.



Figura 3.1 Muestra de nejayote

3.1.8 Rayos X

En la figura 3.2 se muestra el difractograma de rayos X de sólidos de nejayote.

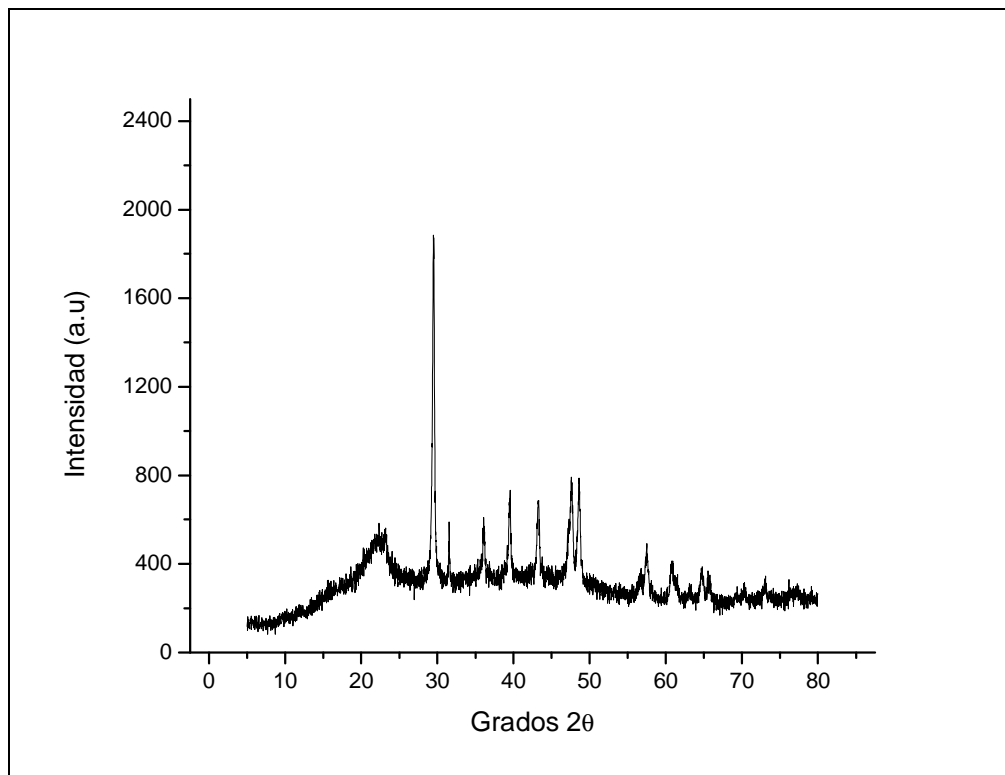


Figura 3.2 Difractograma de rayos X de sólidos de nejayote.

La figura 3.2 muestra los patrones de difracción de rayos X para sólidos de nejayote como una función del ángulo difractado en escala 2θ . El principal componente cristalino en este patrón es calcita (CaCO_3) el cual es identificado por medio de Powder Diffraction File (PDF # 47-1743).

3.1.9 Morfología

La figura 3.3 representa los principales componentes presentes en el nejayote, como almidón, fibras y carbonato de calcio.

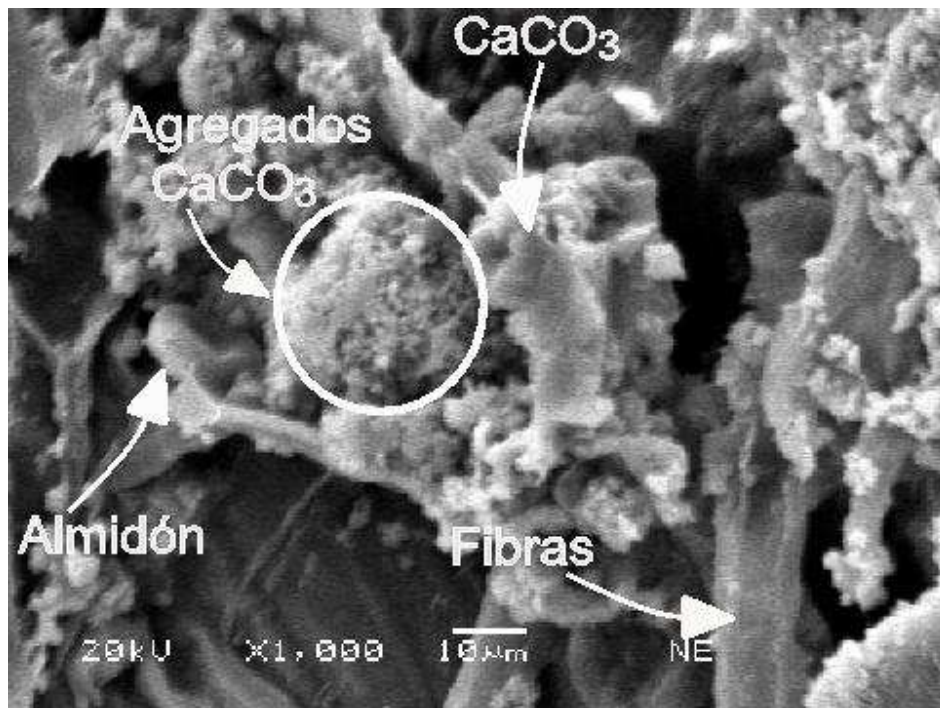


Figura 3.3 Imagen de SEM de sólidos de nejayote a 1000x.

En investigaciones realizadas por Arámbula-Villa *et al.* 2001, demostraron la presencia de almidón en el nejayote y en la figura 3.3 se observa la presencia de moléculas de almidón aproximadamente de 15-16 μm . Por su parte, Gutiérrez *et al.* 2007, demostraron que el pericarpio del maíz, contiene fibras de hemicelulosa, celulosa y lignina, las cuales pueden observarse en la figura 3.3 y que presentan un tamaño aproximadamente de 20 x 13 μm . Valderrama *et al.* (2010), demostraron que durante el tiempo de reposo en la nixtamalización, se forman agregados de calcio, los cuales son mostrados como agregados de carbonato de calcio de diferente tamaño y forma. En esta micrografía se muestra un gran agregado de carbonato de calcio de aproximadamente 30 μm de diámetro. Sin embargo existen otros agregados de diferentes formas.

3.2 Filtración en embudo Buchner

3.2.1 Filtraciones preliminares sin ayudafiltro

En la tabla 3.7 se muestra el promedio de las velocidades de filtración para los 8 medios filtrantes: 1) Lona de fibras de algodón, 2) Poliéster con hilos de nylon, 3) Propileno, 4) Algodón, 5) Propileno con nylon, 6) Tela poliéster, 7) Nylon con hilo metalizado y 8) Papel.

Tabla 3.7 Velocidades de filtración de 8 medios filtrantes

MEDIO	TIEMPO FINAL (s)	VOLUMEN FINAL (mL)	VELOCIDAD DE FILTRACION(mL/s)
1.Lona de fibras de algodón	6.467	90.33	13.969
2.Poliester con hilos de nylon	5.017	62.66	12.490
3.Polipropileno	7.267	72.73	10.009
4.Algodón	5.017	62.63	12.484
5.Polipropileno con nylon	15.017	38	2.531
6.Tela poliéster	2.001	97.33	48.641
7.Nylon con hilo metalizado	3.467	93.66	27.017
8.Papel	2.483	86.44	34.808

En la figura 3.4 se muestra el histograma de medio filtrante versus velocidad de filtrado.

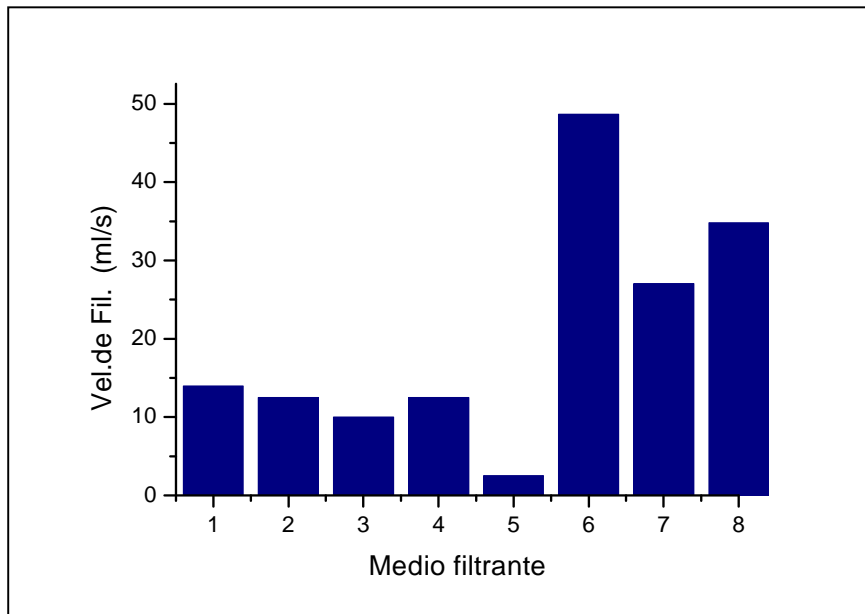


Figura 3.4 Gráfica comparativa de las velocidades de filtrado de 8 medios filtrantes.

Como se observa en la figura 3.4, los medios filtrantes que tuvieron una mayor velocidad de filtrado fueron el 6 (Tela poliéster), 7 (Nylon con hilo metalizado) y 8 (Papel).

De los filtrados obtenido se tomó una muestra de 10 mL , los cuales se observan en la Fig. 3.5.

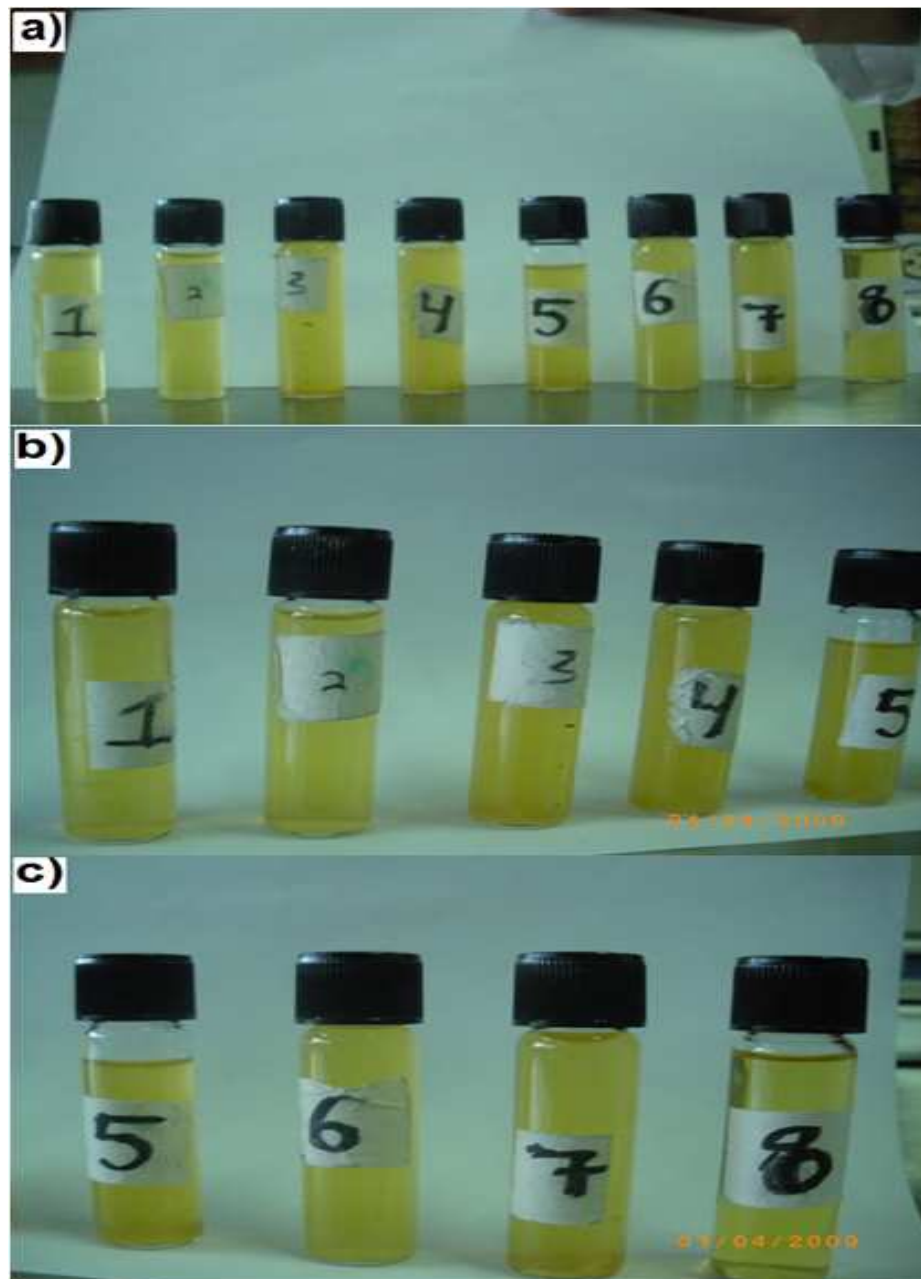


Figura 3.5 Filtrados obtenidos con los 8 medios filtrantes a) Todos los medios filtrantes b) Medios filtrantes 1-5 c) Medios filtrantes 5-8.

En la figura 3.5a, se observa que los filtrados con mayor calidad de filtrado son los obtenidos con los medios filtrantes 1 y 8. En la mayoría de los filtrados, se deduce la presencia de sólidos. En la figura 3.5b se observa que los

filtrados 1 y 2 son los que presentan mayor claridad. En la figura 3.5c, se observa que los filtrados 7 y 8 son los de mayor calidad de filtrado.

Comparando los resultados con los obtenidos en velocidad de filtrado, se seleccionan los medios filtrantes 7 (Nylon con hilo metalizado) y 8 (Papel) porque son los que presentaron velocidades de filtración mayores y mayor calidad de filtrado. El medio filtrante 6 (Tela poliéster) se seleccionó porque fue el que tuvo mayor velocidad de filtración. Sin embargo a pesar de que el medio filtrante 1 (Lona de fibras de algodón) presentó mayor claridad no se selecciona porque su velocidad de filtración es más baja.

Los medios filtrantes seleccionados fueron el 6, 7 y 8, correspondiente al medio de lona poliéster No. 22, nylon con hilo metalizado y papel que tipo respectivamente, como se muestra en la figura 3.6.

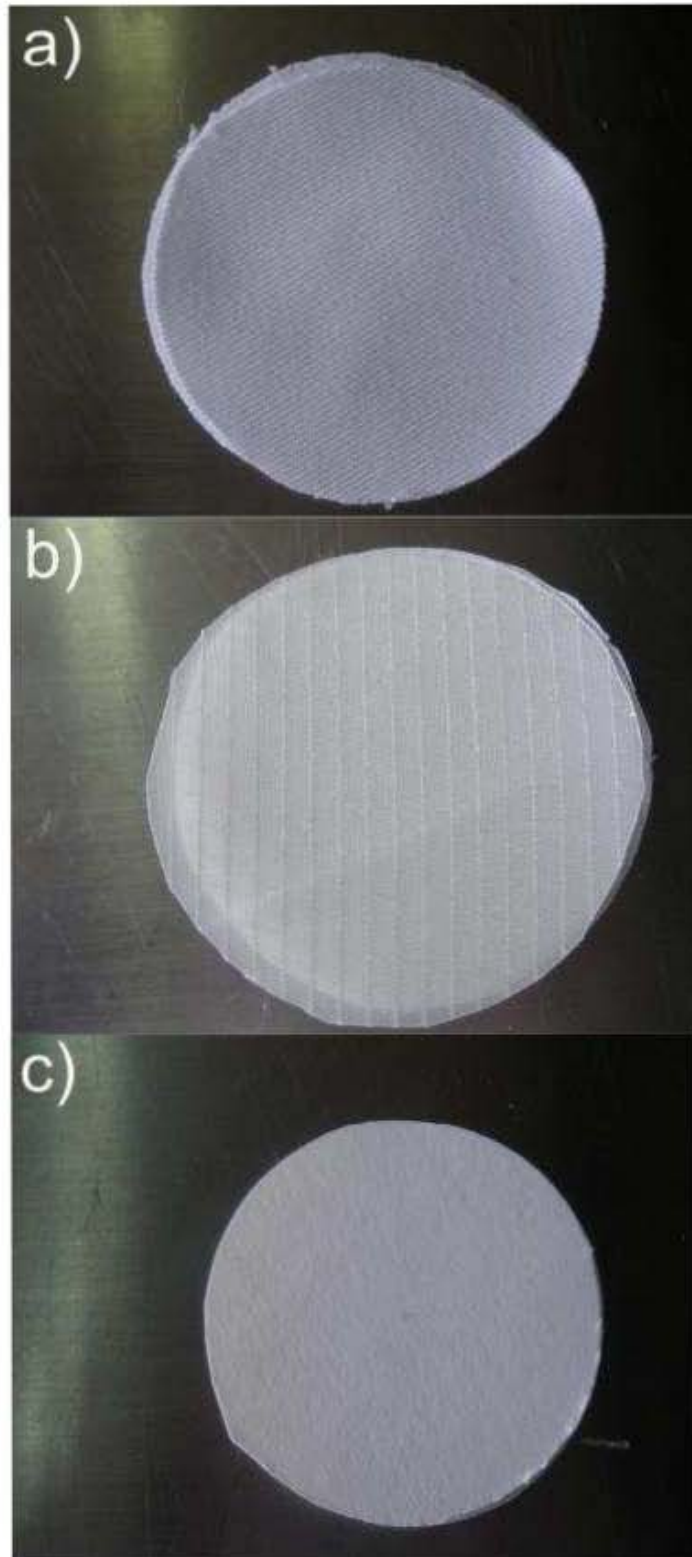


Figura 3.6 Medios filtrantes a) Lona poliéster No. 22 8-11 μ m b) Nylon con hilo metalizado 10-12 μ m c) Papel 9-11 μ

Como se observó en la figura 3.5, las velocidades de filtración son bajas debido a que la filtración se realizó sin ayudafiltro, por lo que para tener una mejor eficiencia de la operación, es necesario emplear ayudafiltro en forma de precapa y dosificación.

3.3 Filtraciones con ayudafiltro

3.3.1 Caracterización de la tierra de diatomea

Rayos X

En la figura 3.7 se muestra el difractograma de tierra de diatomea.

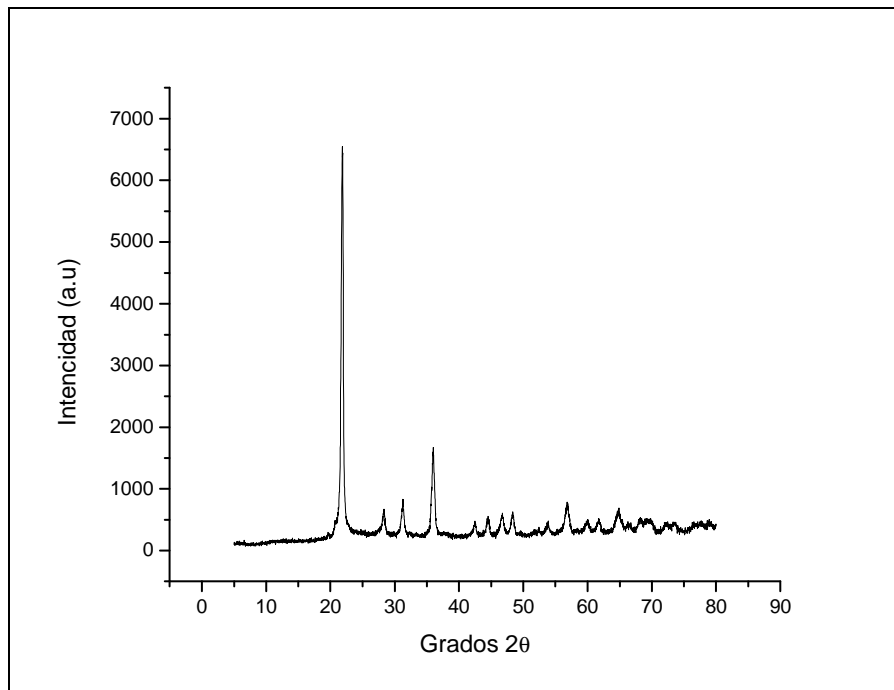


Figura 3.7 Difractograma de rayos X de tierra de diatomea.

La figura 3.7 muestra los patrones de difracción de rayos X para tierra de diatomea como una función del ángulo difractado en escala 2θ . El principal componente cristalino en este patrón es cristobalita (SiO_2) el cual es identificado por medio de Powder Diffraction File (PDF # 39-1425).

En esta figura 3.7 se observa que la estructura de la tierra de diatomea representa un material más puro con una mayor cristalinidad, a diferencia de la figura 3.2.

Morfología

En la figura 3.8 se muestra la morfología de la tierra de diatomea, tomada a 2000x de aumentos. Se muestran diferentes estructuras lo que las hace especialmente aptas como coadyuvante de filtración ya que presentan un tamaño de partícula entre 10-12 μm . Es importante hacer mención, que algunas tierras diatomeas se encuentran fracturadas, lo cual puede influir en la formación de la estructura porosa requerida. Este efecto podría ocasionar que el acomodo de las partículas sea diferente lo cual puede influir en las velocidades de filtración.

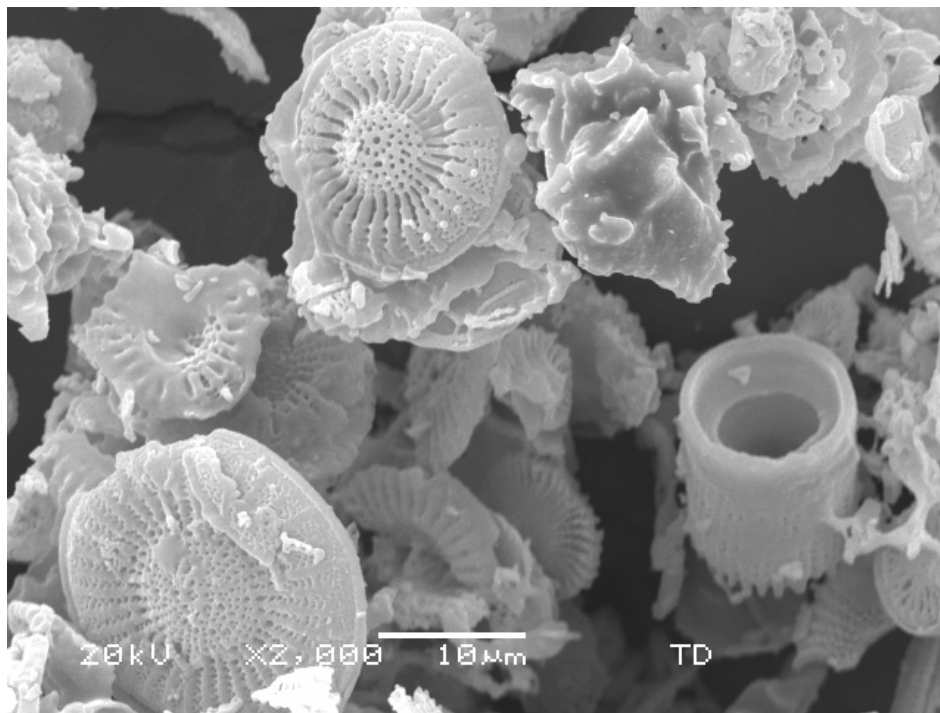


Figura 3.8 Imagen de SEM de tierra de diatomea tomada a 2000x.

3.3.2 Selección de espesor de precapa

Los promedios de datos obtenidos de pendiente y correlación a las diferentes precapas se muestran en la tabla 3.8.

Tabla 3.8 Filtraciones obtenidas a diferente precapa

PRECAPA	CORRELACION	PENDIENTE
1/16"	0.9519	0.3132
2/16"	0.9146	0.5121
3/16"	0.8834	0.38213

En la figura 3.9, se muestra el $\log V_f$ versus $\log t_f$ a 3 diferentes valores de precapa.

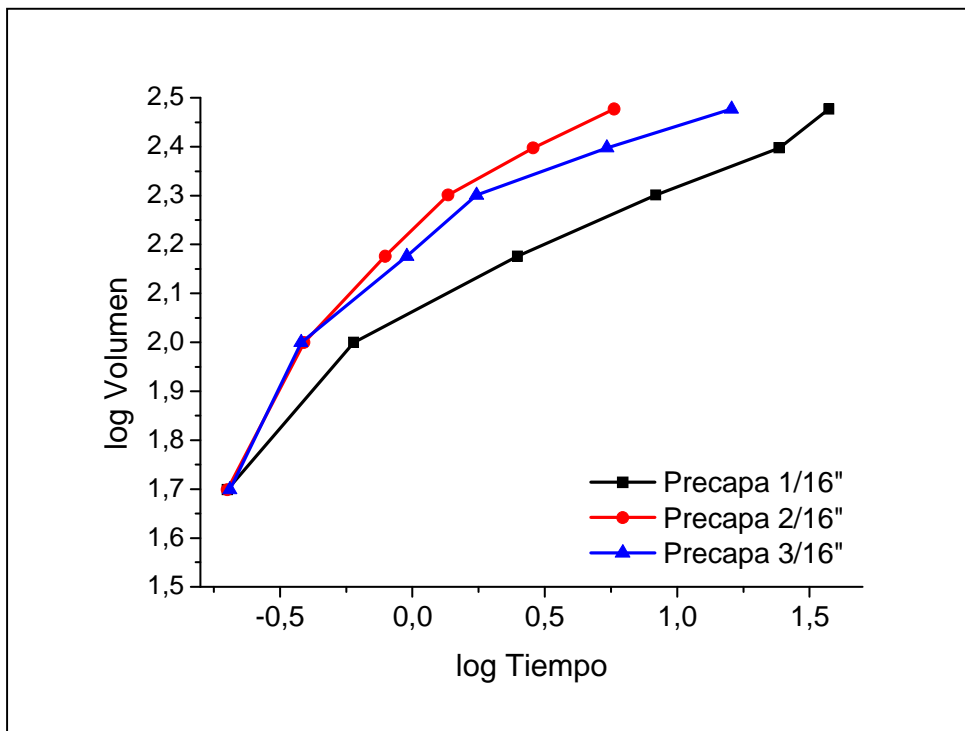


Figura 3.9 Log V_f versus log t_f a las diferentes precapas

En la gráfica 3.9 se observa, que al mismo volumen los tiempos de filtración son menores para la precapa 2/16". De acuerdo al análisis estadístico, se encontró diferencia significativa entre las pendientes y se seleccionó la precapa de

2/16", porque es la más próxima a 0.5, como fue indicado en la metodología propuesta por Tiller, 1962.

3.4 Filtración en celda

3.4.1 Velocidad de filtración

El análisis estadístico mostró que la velocidad de filtración es significativa ($\alpha=0.00001$) para las tres variables independientes, medio filtrante, dosificación y presión.

Los resultados de medias (TUKEY) mostraron que la presión influye significativamente en todos los niveles sobre el volumen de filtración. Respecto al medio filtrante, el medio de tela fue el que marco la diferencia significativa al obtener el mayor volumen de filtración. En la dosificación la media en la que se obtuvo mayor volumen filtrado en la relación 1:0.75.

En la figura 3.10 se muestra la gráfica de volumen versus tiempo de filtración manteniendo constante la presión a 0.65 kgf/cm^2 a tres diferentes niveles de dosificación. Los medios filtrantes se identificaron de la siguiente forma:

Medio A= Medio de tela

Medio B= Medio de papel

Medio C= Medio de nylon

En la figura 3.10 se observa que a la presión de 0.65 kgf/cm^2 , el comportamiento del medio filtrante B, fue similar en los 3 niveles de dosificación, no siendo así para el medio A y C. En la figura 3.10a el medio que presenta mayor velocidad de filtración es el medio A, siendo el medio C, el de menor velocidad. Sin embargo en la figura 3.10b, que corresponde a la dosificación 1:0.5, el medio A fue el que presentó menor velocidad, siendo en este caso el medio C el de mayor velocidad. En la figura 3.10c se observa un comportamiento similar a la figura 3.10a en la que el medio A es el que presenta mayor velocidad de filtración. También se observó que a mayor relación de dosificación mayor velocidad de

filtración. Este hecho se debe a la mayor cantidad de ayudafiltro añadido hace más permeable la torta de filtración y permite el paso del filtrado rápidamente.

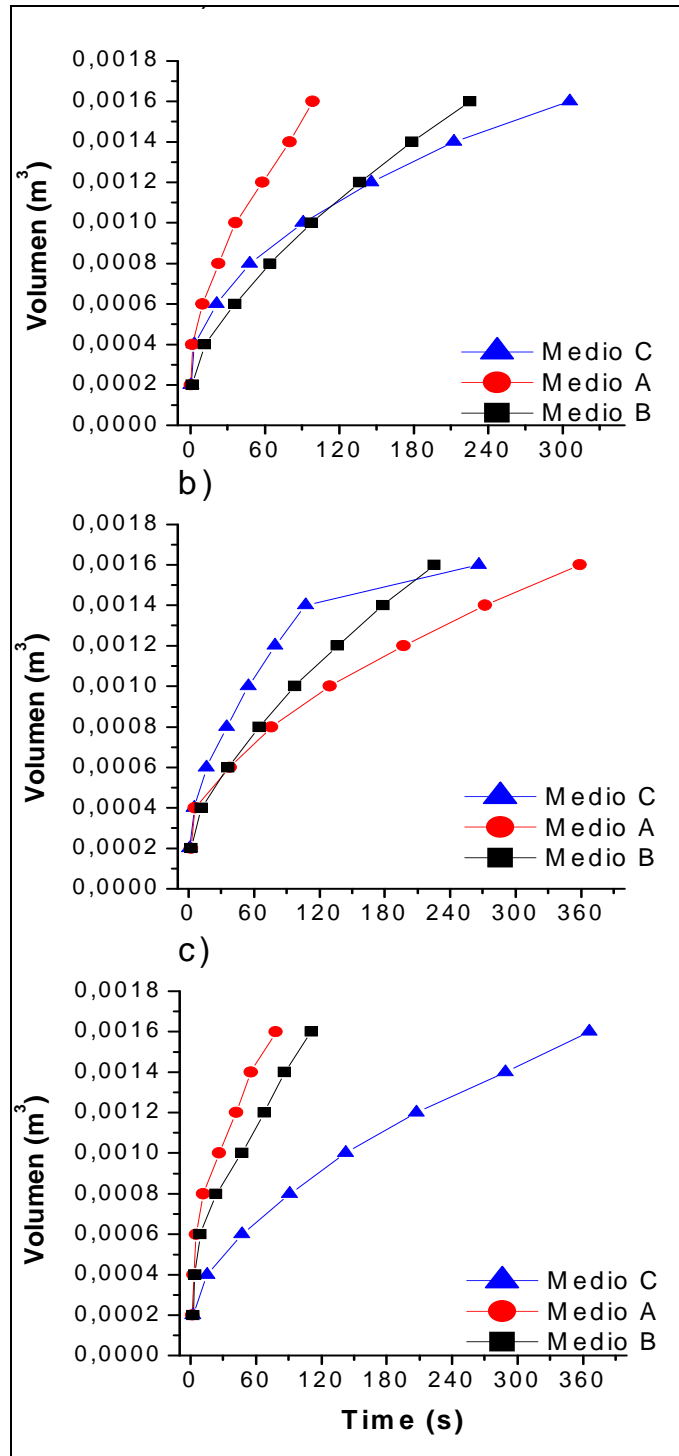


Figura 3.10 Volumen versus tiempo de filtración a presión 0.65 kgf/cm²
a) Dosificación 1:0.25 b) Dosificación 1:0.5 c) Dosificación 1:0.75

En la figura 3.11 se muestra la gráfica de volumen versus tiempo de filtración manteniendo constante la dosificación 1:0.25 a tres diferentes niveles de presión. En la figura se observa que a la dosificación de 1:0.25 al aumentar la presión, disminuye el tiempo de filtración. El comportamiento de los medios filtrantes a los tres niveles de presión es similar para los tres medios filtrantes. La figura 3.11a muestra que la velocidad de filtración obtenida en el medio A es aproximadamente 6 veces mayor que el medio B y 3 veces mayor que el medio C. En la figura 3.11b, correspondiente a la presión de 1 kgf/cm² la velocidad de filtración aumenta 50% aproximadamente en los 3 medios. Sin embargo, a la presión de 1.35 kgf/cm² la velocidad de filtración disminuye en los medios A y C. Tiller y Hyun (1998) mencionan, que para camas altamente compresibles de flóculos frágiles o biosólidos derivados de desechos de agua municipales, cuando la presión excede alrededor de 1 atm, nunca incrementa la velocidad de flujo de filtrado. Esto podría significar que la ley de Darcy es violada y los filtros son inefectivos, ya que el volumen de filtrado obtenido es menor. El medio filtrante A en los tres gráficos, a mayor presión presenta mayor velocidad, así como el medio filtrante B, sin embargo el medio filtrante C, a la presión más baja obtuvo la mayor velocidad. Comparando la figura 3.10b de dosificación 1:0.5 con los de la figura 3.11 de dosificación más baja 1:0.25, presentan un desorden en las velocidades ya que a baja y a alta presión no siguen el mismo comportamiento los tres medios filtrantes. Esta situación puede deberse a que durante la formación de la torta el acomodo de las partículas presenta un comportamiento estocástico, además las relaciones de dosificación pueden ser puntos críticos en los cuales el fenómeno de percolación este presente, originando cambios drásticos en las velocidades de filtración.

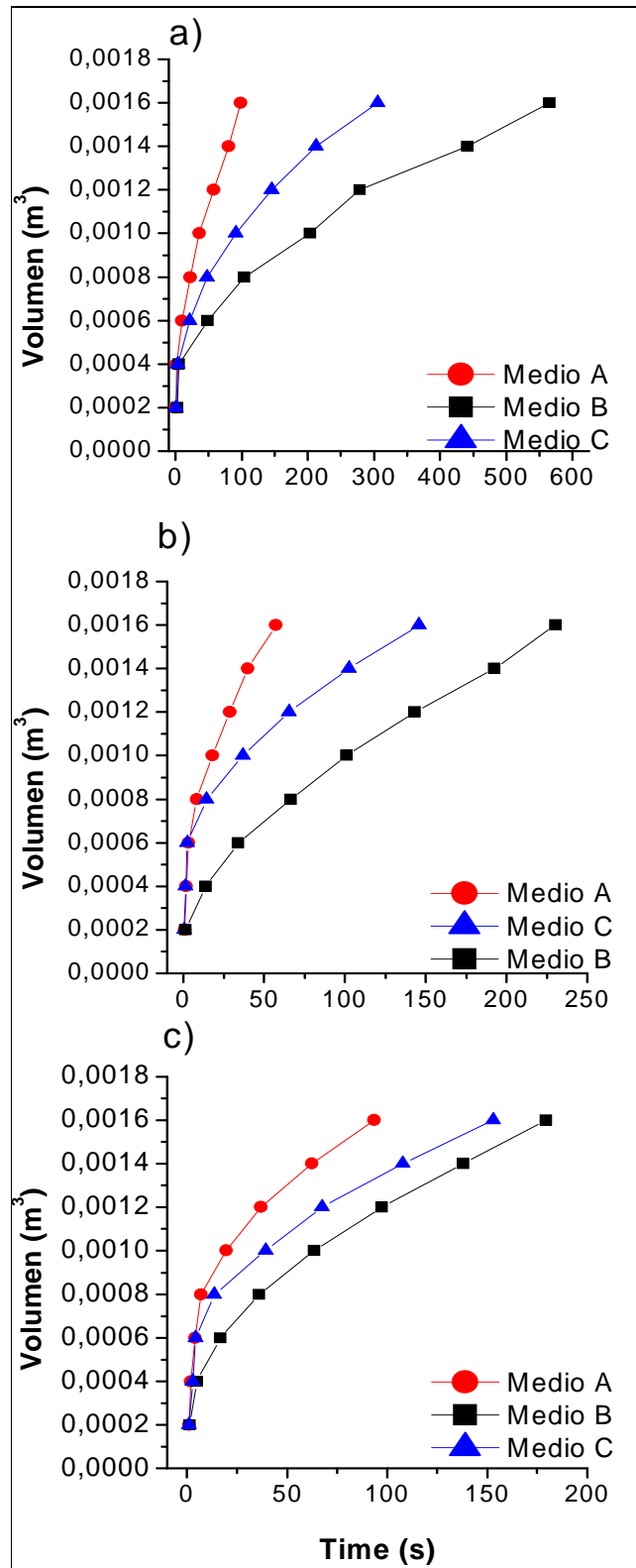


Figura 3.11 Velocidad de filtración a dosificación 1:0.25 a) Presión 0.65 kgf/cm²
 b) Presión 1.0 kgf/cm² c) Presión 1.35 kgf/cm²

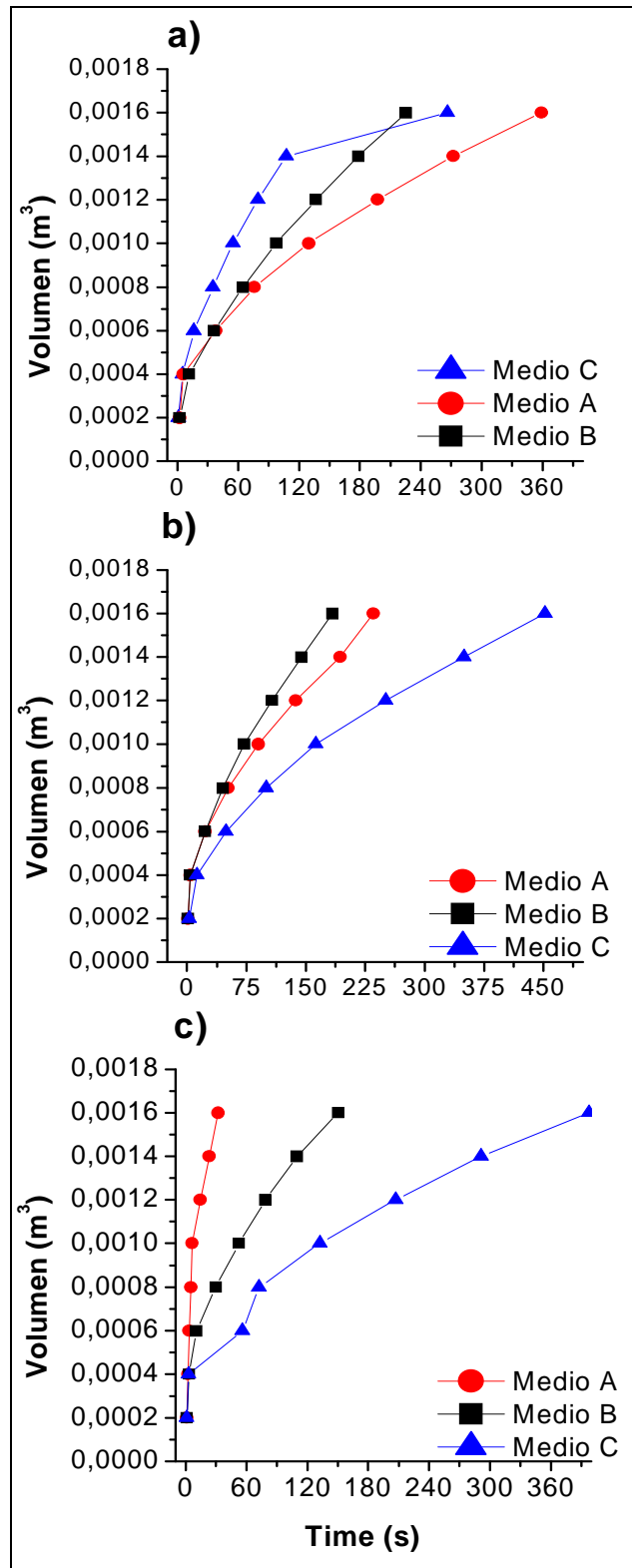


Figura 3.12 Velocidad de filtración a dosificación 1:0.5 a) Presión 0.65 kgf/cm²
 b) Presión 1.0 kgf/cm² c) Presión 1.35 kgf/cm²

De los resultados obtenidos se observó que el medio filtrante A, es el que muestra mayores velocidades de filtración, para dosificaciones de 1:0.25 y 1:0.75. En el caso de la relación de dosificación 1:0.5, ocurren fenómenos en los que otros mecanismos de acomodación de las partículas pudieran estar presente. Esto nos conduce a suponer que podrían existir valores críticos de relación de dosificación.

3.4.2 Determinación de α y R_m

3.4.2.1 Determinación del flujo a través de la precapa (q)

Con los datos obtenidos de volumen versus tiempo, por regresión lineal se obtuvieron las pendientes a las diferentes presiones, como se muestra en la tabla 3.9 y se observó que el valor de q aumenta con la presión, notando un mayor incremento en la presión de 1.35 kg/cm^2 .

Tabla 3.9 Valores de q a diferentes presiones

Presión (kg/cm^2)	q (m^3/s) Medio A	q (m^3/s) Medio B	q (m^3/s) Medio C
0.65	1.4326×10^{-4}	9.2798×10^{-5}	1.4824×10^{-4}
1	1.5877×10^{-4}	1.4474×10^{-4}	2×10^{-4}
1.35	1.6814×10^{-4}	2.0893×10^{-4}	2.4474×10^{-4}

3.4.2.2 Determinación de R_m

En la tabla 3.10, se muestran los resultados de R_m y se observa, que a medida que aumenta la presión la resistencia con el medio filtrante va siendo mayor para los medios A y C. Sin embargo para el medio B (papel) la resistencia del medio filtrante va disminuyendo. Al aumentar la presión puede originar ruptura en las fibras de papel, lo cual permitiría el paso del fluido más rápido y como consecuencia una menor resistencia del medio filtrante.

Es difícil realizar un análisis de R_m porque depende de q , el cual fue evaluado con agua, por lo que sería conveniente en una posterior investigación realizar, un

análisis matemático, en el que R_m pueda ser evaluado con datos experimentales, obtenidos del nejayote que se va a filtrar.

Tabla 3.10 Valores de R_m a diferentes presiones

Presión (kg/cm²)	R_m (1/m) Medio A	R_m (1/m) Medio B	R_m (1/m) Medio C
0.65	3.0371 x 10 ⁹	4.68 x 10 ⁹	2.9345 x 10 ⁹
1	4.2289 x 10 ⁹	4.6400 x 10 ⁹	3.3408 x 10 ⁹
1.35	5.3692 x 10 ⁹	4.3367 x 10 ⁹	3.6968 x 10 ⁹

3.4.2.3 Determinación de α

En la tabla 3.11 se muestra los resultados obtenidos de la resistencia específica de la torta para diferentes presiones y relaciones de dosificación en los tres medios filtrantes.

Tabla 3.11 Valores de α con diferentes presiones y dosificación para medios filtrantes A, B, C

Medio A			
Dosificación/Presión	α (m/kg) 0.65 kg/cm²	α (m/kg) 1 kg/cm²	α (m/kg) 1.35 kg/cm²
1:0.25	2.2808 x 10 ¹⁰	2.6747 x 10 ¹⁰	7.5661 x 10 ¹⁰
1:0.5	6.5547 x 10 ¹⁰	7.3181 x 10 ¹⁰	2.7085 x 10 ¹⁰
1:0.75	1.2555 x 10 ¹⁰	1.5077 x 10 ¹⁰	1.5245 x 10 ¹⁰
Medio B			
1:0.25	1.4101 x 10 ¹¹	7.5583 x 10 ¹⁰	8.2080 x 10 ¹⁰
1:0.5	3.5526 x 10 ¹⁰	5.5043 x 10 ¹⁰	6.0893 x 10 ¹⁰
1:0.75	2.1762 x 10 ¹⁰	1.6456 x 10 ¹⁰	2.1645 x 10 ¹⁰
Medio C			
1:0.25	8.1791 x 10 ¹⁰	7.9942 x 10 ¹⁰	7.5718 x 10 ¹⁰
1:0.5	4.3259 x 10 ¹⁰	1.2670 x 10 ¹¹	1.6155 x 10 ¹⁰
1:0.75	5.5654 x 10 ¹⁰	5.7097 x 10 ¹⁰	1.5461 x 10 ¹⁰

El análisis estadístico mostró diferencia significativa en la resistencia específica de la torta para la dosificación ($\alpha= 0.0001$), el medio filtrante ($\alpha= 0.0002$) y la presión ($\alpha= 0.001$). El análisis de medias, realizado a la relación de dosificación, mostró que la dosificación de 1:0.75, fue en la que se obtuvieron los valores de resistencia específica de la torta más bajos. Respecto a los medios filtrantes, el medio filtrante A fue en el que se obtuvo valores más bajos de resistencia específica de la torta. Con respecto a la presión la que obtuvo mayor significancia fue la presión de 1.35 kg/cm², al mostrar el valor más alto de resistencia específica de la torta, lo cual no es conveniente para la selección de las condiciones de proceso.

3.4.3 Color

En la tabla 3.12 se muestran los valores de ΔE para diferentes presiones y relación de dosificación en los tres medios filtrantes.

Tabla 3.12 Valores de ΔE a diferentes presiones y dosificación para medios filtrantes A, B y C.

Medio A			
Dosificación/Presión	0.65 kg/cm²	1 kg/cm²	1.35 kg/cm²
1:0.25	11.3777	11.6466	6.8219
1:0.5	10.8857	12.3015	10.1240
1:0.75	13.6739	8.3283	11.7813
Medio B			
1:0.25	11.6997	12.1144	12.5241
1:0.5	11.0399	9.4434	11.2682
1:0.75	11.0132	10.0962	12.3739
Medio C			
1:0.25	11.2611	12.6050	6.6492
1:0.5	10.7805	7.2698	7.0821
1:0.75	7.1723	7.3564	9.1875

El análisis de ANOVA mostró que ΔE es significativo ($\alpha=0.003$) para los tres medios filtrantes, no siendo así para la presión y relación de dosificación.

El análisis de medias mostró, que el medio filtrante C es el que marca la diferencia significativa, obteniendo valores más bajos, en comparación con el medio A y B. Stark *et al.* (1996) reportaron que el ojo humano puede percibir una diferencia de color cuando $\Delta E > 1.5$. Los resultados de la tabla 3.12 mostraron que al filtrar el nejayote en el medio C, el cambio en color es menor. Estos resultados se compararon visualmente con los filtrados obtenidos. En los medios A y B los filtrados presentaron una mayor clarificación, respecto a los filtrados del medio C. Esto nos hace suponer que la eficiencia del medio C respecto a retener la mayor cantidad de sólidos fue menor, debido a la estructura del medio.

3.4.4 Calcio

En la tabla 3.13 se muestran los resultados de Ca en mg/L de los filtrados obtenidos.

Tabla 3.13 Valores de calcio en mg/L a diferentes presiones y dosificación para medios filtrantes A, B y C.

Medio A			
Dosificación/Presión	0.65 kg/cm²	1 kg/cm²	1.35 kg/cm²
1:0.25	847.5	828	712
1:0.5	913.5	889	920
1:0.75	921.5	848.5	842
Medio B			
1:0.25	924.5	739.5	705
1:0.5	982.5	951	1005.5
1:0.75	731	721.5	755.5
Medio C			
1:0.25	668	699	1287.5
1:0.5	966.5	1339.5	1273
1:0.75	1383.5	1354.5	1002.5

El análisis estadístico mostró diferencia significativa en los contenidos de calcio para la dosificación ($\alpha= 0.0018$) y el medio filtrante ($\alpha= 0.00001$). La presión no fue significativa en los niveles de calcio. El análisis de medias, realizado a la relación de dosificación, mostró que la dosificación de 1:0.25 fue en la que se obtuvo los niveles más bajos de calcio. Respecto a los medios filtrantes, los medios A y B fueron en los que se obtuvo más bajos contenidos de calcio.

Considerando, que el contenido de calcio inicial en el nejayote fue de 1525 mg/L, se logró eliminar aproximadamente el 50 % de calcio en forma de CaCO_3 en los medios filtrantes A y B. Sin embargo no se logra eliminar la cantidad de calcio soluble por filtración ya que la concentración de Ca sigue siendo muy alta y es necesario realizar tratamientos químicos, como el empleo de sulfatos y fosfatos para precipitar el calcio presente y eliminarlo por filtración.

CONCLUSIONES

El emplear equipos prototipos, para obtener parámetros de interés en el diseño de equipos a gran escala, son de gran utilidad porque disminuyen costos de operación. Holdich (2003), menciona que para la selección de equipo, es importante conocer propiedades del material que se va a filtrar, como concentración de la suspensión, resistencia del filtrado, presión de operación, entre otras. Tien y Bai (2003), han obtenido resultados de la variación del espesor de la torta, sobre la velocidad de filtración, considerando diferentes resistencias del medio filtrante. Ellos demostraron, que cuando la resistencia del medio filtrante es baja, el espesor de la torta no influye en los perfiles de velocidad de filtración. De ahí, que la selección del medio filtrante, debe ser un parámetro de interés para ser considerado en las condiciones de operación de filtración.

Para establecer las condiciones de filtración de nejayote en un equipo prototipo al realizar las filtraciones en el embudo Buchner, la precapa seleccionada por el análisis estadístico es la de espesor de 2/16". En cuanto a las velocidades de filtración se puede concluir que el medio filtrante de tela es el que obtiene los mayores valores. En lo que respecta a la resistencia específica de la torta los valores más bajos se obtiene con el medio filtrante de tela.

Los resultados de la evaluación de color mostraron que al filtrar el nejayote con los medios de tela y papel son los que presentaron mayor clarificación del nejayote, por lo que se concluye que los dos presentaron eficiencia para este parámetro.

Respecto a los valores obtenidos de calcio, el medio filtrante de tela fue en el que se eliminó mayor contenido en forma de CaCO_3 .

Analizando los resultados obtenidos, se tomo la decisión de seleccionar el medio filtrante A (Tela), porque fue en el que se obtuvieron las mayores

velocidades de filtración, menor resistencia específica de la torta, mayor claridad y menor contenido de calcio.

Se estableció que el medio filtrante a emplear es tela y las condiciones de operación fueron a dosificación 1:0.25, presión de 1 kgf/cm² y a 1:0.5, presión de 1.35 kgf/cm².

La operación de filtración en esta primera etapa es sólo un pretratamiento del nejayote en el cual se eliminan los sólidos, que bajo un tratamiento adecuado pueden ser empleados como alimento para ganado. También puede ser empleado para obtener una goma similar a la goma arábica a partir de los arabinosidos, que se encuentran presentes en el nejayote.

El emplear equipos prototipos para obtener parámetros de interés en el diseño de equipos a gran escala, son de gran utilidad porque disminuyen costos de operación. Para la selección de equipo es importante conocer propiedades del material que se va a filtrar, como concentración de la suspensión, resistencia del filtrado, presión de operación, entre otras.

RECOMENDACIONES

Es recomendable realizar un análisis entre dosificaciones por debajo de 1:0.5 para determinar los valores óptimos en los cuales ocurren cambios drásticos, suponiendo que en estas concentraciones existe un umbral de percolación. Esto con la finalidad de hacer más eficiente la operación de filtración.

Es necesario realizar un estudio matemático más completo para determinar la permeabilidad de la torta porque algunos autores resolvieron numéricamente la ecuación de Navier-Stokes para redes de poros aleatorios y mostraron que cerca del umbral de percolación diferentes leyes de escalamiento se aplican para distintas condiciones de flujo. Este implicó desviaciones en la ley

de Darcy, por lo que la ecuación general de filtración presenta limitaciones en su aplicación.

REFERENCIAS

1. Adams, E. Q. (1942). x-z planes in the 1931 I.C.I. system of colorimetry.
2. AOAC. (1998). Official Methods of Analysis. 16th edn. Maryland USA, Official Method 968.08: Association of Official Analytical Chemists.
3. AOAC. (2000). Official Methods of Analysis. 17th edn. Maryland USA, Official Method 925.10: Association of Official Analytical Chemists.
4. Arámbula-Villa, et al. (2001). Physicochemical, structural and textural properties of tortillas from extruded instant corn flour supplemented with various types of corn lipids. *Journal of Cereal Science* 33, 245-252.
5. Badui, S. 2006. Química de los alimentos.4th edn. Pearson Educación: México.
6. Boucher, F. y Muchnik, J., 1995. Agroindustria Rural-Recursos Técnicos y Alimentación. Cirad, CIID, IICA, Costa Rica.
7. Bourgeois, F., Lyman, G. (1997). Morphological analysis and modeling of fine coal filter cake microstructure. *Chemical Engineering Science*, 52:1151-1162.
8. Carman PC. 1956. Flow of gases through porous media. London: Butterworth.
9. Carvajal-Millán, E. (2007). Una alternativa para convertir un residuo del proceso de nixtamalización del maíz en un producto de alto valor agregado. *Tecnociencia* 2.
10. Chavarría, E., (2007). Dímeros de ácido Ferúlico de nejayote de maíz: Evaluación de la actividad antioxidante de extractos enriquecidos en dímeros/hidrodímeros de ácido ferúlico. Facultad de Química. UNAM.
11. Fernández-Muñoz, J.L., Rojas-Molina, I., González-Dávalos, M.L., Leal, M., Valtierra, M.E., San Martín-Martínez, E. & Rodríguez, M.E. (2004). Study of calcium ion diffusion in components of maize kernels during traditional nixtamalization process. *Cereal Chemistry*, 81 (1), 65–69.
12. Fernández-Muñoz, J.L., San Martín-Martínez, E., Díaz-Góngora, J. A. I., Calderón, A., Alvarado-Escobar, A., Ortiz-Cárdenas, H. & Leal-Pérez, M. (2006). Steeping time and cooking temperature dependence of calcium

- ion diffusion during microwave nixtamalization of corn. *Journal of Food Engineering*, 76, 568-572.
13. Geankoplis, Ch., 2006. Procesos de transporte y principios de procesos de separación. Continental, México.
 14. Gutiérrez, E., Rojas-Molina, I., Pons-Hernández, J. L., Guzmán, H., Aguas-Ángel, B., Arenas, J., Fernández, P., Palacios-Fonseca, A., Herrera, G. & Rodríguez, M. E. (2007). Study of calcium ion diffusion in nixtamalized quality protein maize as a function of cooking temperature. *Cereal Chemistry*, 84 (2), 186–194.
 15. Hallaver, A., 1987. Specialty Corns, 2nd edn (312-319). New York Washington D.C.
 16. Hande, Y., Tosun, I., Yetis, U. (2007). A new approach in assessing slurry filtrability. *Journal of Membrana Science*. 303: 72-79.
 17. Helman, J., 1984. Farmacotecnia teórica y práctica. Tomo III. Continental, México.
 18. Holdich, R. G, (2003). Solid-liquid separation equipment selection and modellig. *Minerals Engineering* 16, 75-83.
 19. Hosten, C. (1993). Cake filtration rate equations a review of classical and modern approaches. *Mineral Engineering*, 6: 775-783.
 20. Ibarz, A., y Barbosa-Cánovas, G., 2005. Operaciones unitarias en la ingeniería de alimentos. Mundiprensa, España.
 21. Kakwani, R., Gala, H., Chiang, S., Klinzing, G., Tierney, J. (1985). Dewatering of fine coal micrographic analysis of filter cake structure. *Powder Technology*, 41:239-250.
 22. Klaus, J. L. & Karel, K., 1991. Handbook of cereal science and Technology. 23 (2): 321-325.
 23. Kozeny, J. 1927. Ueber kapillare Leitung des wassers im Boden. *Stizungsber Akad Wiss Wien*. 136:271-306.
 24. Laria, J., Meza, E. & Peña, J.L., (2007). Water and calcium uptake by corn kernel during alkaline treatment with different temperature profiles. *Journal of Food Engineering* 78, 288-295
 25. Lewis, M. 1993. Propiedades físicas de los alimentos. Acribia, España.

26. Lin, C. & Miller, J. (2000). Poro structure and network analysis of filter cake. *Chemical Engineering Journal*, 80:221-231.
27. Meléndez-Martínez, A., Vicario, I. & Heredia, F. (2005). Correlation between visual and instrumental colour measurements of orange juice dilutions: effect of the background. *Food Quality and Preference* 16 (2005) 471-478.
28. Méndez-Montalvo, G., García, S., Paredes- López, O. & Bello- Pérez, L. A. (2007). Effect of nixtamalization on morphological and rheological characteristics of maize starch. *Journal of Food Science*, 48, 420-425.
29. Molina, R., 1991. Técnicas de Filtración en la Industria Enológica (pp95-111). Universidad Politécnica de Madrid, A. Madrid Ediciones, Madrid.
30. Niño-Medina, G., Carvajal-Millán, E., Lizardi, J., Rascon-Chu, A., Marquez-Escalante, J., Gardea, A., Martínez-López, A. & Guerrero, V. (2009). Maize processing waste water arabinoxylans: Gelling capability and cross-linking content. *Food Chemistry*, 115, 1286-1290.
31. Peng, X. & Boming Y., (2008). Developing a new form of permeability and kozeny-Carman constant for homogeneous porous media by means of fractal geometry. *Advances in Water Resources* 31, 74-81.
32. Peña, A. y Céspedes, J., 2007. Físicoquímica, Manual de laboratorio. Lorenza Correa Rastro, Medellin.
33. Perry, R.; Green, D. y Maloney, J., 2001. Manual del Ingeniero Químico. 7 th edn ,Tomo V. McGraw-Hill, México.
34. Ramírez, G., 2006. Tratamiento de agua de nejayote y evaluación de rentabilidad de producto fermentado a base de maíz. Departamento de Biotecnología. IPH, CBI.
35. Reyes, P., 1990. El maíz y su cultivo (pp 23-66). AGT, Editor. S.A. México.
36. Richardson, J. & Metcalfe, J. (1981). Ingeniería Química: Operaciones Básicas. Vol. 2. Reverte, Barcelona.
37. Ruth, B. 1935. Studies in filtration: III. Derivation of general filtration equations. *Industrial Engineering Chemical*. 27,708-723

38. Ruth, B., Montillon, G. & Montonna, R. (1933). Studies in filtration I. Critical analysis of filtration theory. *Industrial Engineering Chemical*, 25:76.
39. Sánchez, M., 2008. Recuperación de ácido ferulico a partir de residuos de la industria de la tortilla. UANL.
40. Sans, R. y Ribas, J., 1989. Ingeniería ambiental: Contaminación y tratamientos. Marcombo, España.
41. Saulnier, L., Mestres, C., Duoblier, J.L., Roger, P. & Thibault, J.F. 1993. Estudio de polisacáridos solubilizados durante la cocción alcalina de granos de maíz. *Journal of Cereal Science*. Vol. 17, 267-276.
42. Stark, G., Fawcett, J., tucker, I. & Weatherall, I., 1996. Instrumental evaluation of colour of solid dosage forms during stability testing. *International Journal Pharmaceutics*. 143, 93-100.
43. Tien, C. & Bai, R., (2003). An assessment of the conventional cake filtration theory. *Chemical Engineering Science* 58, 1323-1336.
44. Tiller, F.M. & Hyun, J., (1998). Role of porosity in filtration: XIII. Behavior of highly compactible cakes. *Chemical Engineering* Vol. 44. No. 10.
45. Tiller, F.M., Cooper, H., (1962). The role of porosity in filtration .Part V. Porosity variation in filter cakes. *AIChE Journal*, 445-449.
46. Toledo. R., 2007. Fundamentals of food process engineering, 3rd edn. USA, New York.
47. Trejo-González, A., Feria-Morales, A. & Wild-Altamirano, C., (1982). The role of lime in the alkaline treatment of corn for tortilla preparation. *American Chemical Society*.
48. Valderrama-Bravo, C., Rojas-Molina, A., Gutiérrez-Cortez, E., Rojas-Molina, I., Oaxaca-Luna, A., De la Rosa-Rincón, E. & Rodríguez-García, M.E., 2010. Mechanism of calcium uptake in corn kernels during the traditional nixamalization process: Difusion, accumulation and percolation. *Journal of Food Engineering* 98, 126-132.
49. Valdes-Pareda, F., Ochoa-Tapia, J. & Alvarez-Ramirez, J., (2009). Validity of the permeability Carman-Kozeny equation: A volumen averaging approach. *Physica A* 388, 789-798.

50. Velasco-Martínez, M., Angulo, O., Vazquez-Couturier, D.L., Arroyo-Lara, A., & Monroy J.A., 1997. Efecto de sólidos secos de nejayote en pollos de crecimiento. *Metabolismo y Nutrición* 76, 1531-1534.
51. Warren, L. M. (2002). Operaciones Unitarias. McGraw.Hill, México.
52. Weber, J., (1979). Control de calidad del agua. Procesos fisicoquímicos. (pp. 175-179). Reverte, España.
53. Wolf, M.J., Khoo, V. & Seckinger, H.L. 1969. Distribution and subcellular structure of endosperm protein in varieties of ordinary and high-lysine maize. *Cereal Chemistry*, 46: 253-263.