



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN

**Separación de sólidos insolubles de aguas residuales
de nejayote por filtración en lechos empacados**

Tesis

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO EN ALIMENTOS**

Presenta

OMAR SANCHEZ GASPAR

ASESORES:

Dra. Elsa Gutiérrez Cortez

Dra. María de los Ángeles Cornejo Villegas

Cuatitlán Izcalli, Estado de México, 2020.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

*A mi mamá Dolores Gaspar Rosas,
por su gran amor, paciencia y sacrificio*

Agradecimientos



- *A mis padres Olaf y Dolores por todo su esfuerzo para sacarnos adelante a mí y a mis hermanos, por darnos siempre lo mejor que unos padres pueden dar en el corazón, por el apoyo en las buenas y malas decisiones que he tenido en mi vida, en los mejores y en los peores momentos, por cuidarme y amarme más que nadie.*
- *A mi hermana Lorena por ser mi ejemplo a seguir, por darme sus consejos, por apoyarme, por ser como mi segunda mamá y una de las mejores personas que tengo en la vida.*
- *En memoria de mi hermana idalia por siempre darme los mejores consejos, siempre los llevare en mi corazón, y por ser la mujer más luchadora y fuerte, gracias.*
- *A mi hermana Ana porque me sigue cuidando como nadie más lo hace, por todas esas pláticas, por preocuparte ayudarme, y estar siempre pendiente de mí.*
- *A mi hermana Miriam por siempre apoyarme en todo, cuidarme, por las pláticas y por las risas compartidas conmigo.*
- *A mi hermano Alejandro, no puedo más que dar gracias a la vida por ponerte en mí camino y ser mi compañero, gracias por estar siempre, por ser una de las mejores personas en la vida.*
- *A mi hermano Gabriel por luchar cada día y en la distancia siempre estar con nosotros.*

Agradecimientos



- *A Emir, Donovan, Mauricio, y Samuel por enseñarme el verdadero valor de la amistad y la incondicionalidad, por ser mis compañeros y pasar tantas aventuras conmigo.*
- *A Evelyn por motivarme, por su nobleza, por su amor incondicional, ser mi compañera y apoyarme a concluir este proyecto tan importante y muchos más, por confiar en mí más que nadie y por enseñarme tantas cosas cada día juntos.*
- *A las Doctoras. Elsa y Ángeles por haberme dado la oportunidad de trabajar con ellas como su tesista, por estar para mí cada que lo necesite, por compartir sus conocimientos, experiencias y su tiempo conmigo siempre con una sonrisa y una buena platica, por enseñarme tanto en tan poco tiempo, este trabajo no hubiera sido posible sin ustedes, por el apoyo que me brindaron gracias.*
- *A la doctora María de los Ángeles cornejo Villegas por la determinación de la concentración de calcio y su interpretación*
- *A la maestra en química Alicia del Real López por la toma de Micrografías y su interpretación*

	Pagina
Introducción.....	1
Antecedentes	4
1.1 Operación unitaria filtración.....	4
a. Filtración superficial.....	4
b. Filtración de torta.....	5
c. Filtración de profundidad.....	5
1.2 Filtros de lechos empacados.....	6
1.2.1 Mecanismos responsables de la filtración.....	9
a. Cernido.....	9
b. Sedimentación.....	9
c. Intercepción.....	10
d. Impacto inercial.....	10
e. Difusión.....	11
f. Acción hidrodinámica.....	11
1.2.2 Fuerzas adherencia.....	11
a. Fuerzas de Van der Waals.....	11
b. Fuerzas electroestáticas.....	12
c. Puente químico.....	12
1.3 Medio filtrante.....	13
1.4 Tratamiento de aguas residuales por filtración.....	13
1.4.1 Descripción de la filtración de aguas residuales.....	14

1.4.2 Filtros que se utilizan en el tratamiento de aguas residuales	15
1.5 Criterios de diseño	17
1.5.2 Fuerza impulsora.....	17
1.5.3 Tasa de filtración	17
1.6 Modelo matemático	18
1.7 Materiales usados para el tratamiento de aguas residuales	19
a. Arena sílica	19
b. Carbón activado	20
c. Tezontle.....	22
1.8 Análisis granulométrico de materiales granulares	23
1.8.1 Tamizado	24
1.8.2. Características de materiales porosos	24
1.8.3 Parámetros de evaluación de las aguas residuales	26
a. Potenciómetro	26
b. Turbidímetro	26
c. Colorímetro	29
d. Sólidos Totales.....	30
1.7 Proceso de nixtamalización.....	31
1.9.1 Descripción del proceso de nixtamalización tradicional e industrial	33
1.9.2 Transformaciones fisicoquímicas durante la nixtamalización del maíz .	36
1.9.3 Nejayote líquido de la nixtamalización	38
1.10 Principales aplicaciones del nejayote	39
2 metodología experimental	48

2.1 Desarrollo experimental	51
2.2 Descripción de actividades preliminares:.....	51
2.2.1 Recolección de aguas residuales de nejayote.....	51
2.2.2 Elaboración de esferas de carbón activado	52
2.2.3 Turbidez de agua residual <i>nejayote</i>	52
2.2.4 Determinación de pH.....	54
2.2.5 Determinación de contenido de Humedad Método de estufa.....	54
2.2.6 Metodología para la curva patrón de turbidez y pH de aguas residuales	56
2.3 Actividades objetivo 1 y 2	58
2.3.1 Determinación de presión hidrostática	58
2.3.2 Determinación y selección del tamaño de partícula de los materiales ..	60
2.3.3 Configuración de arreglos dentro del lecho empacado	60
2.3.4 Determinación de velocidad de filtrado durante la filtración para cada corrida con diferente arreglo de camas y diferente presión.....	61
2.3.5 Determinación de la turbidez,pH,solidos totales para cada uno de los filtrados obtenidos	63
2.3.6 Determinación de color en filtrados de aguas residuales de nejayote...	63
2.3.7 Determinaciones de eficiencia para cada corrida experimental	64
2.4 análisis estadístico.....	65
2.5 Actividades para el Objetivo 3:.....	65
2.5.1 Determinación de la concentración de calcio	65

2.5.2 Morfología por microscopía electrónica de barrido al alto vacío (MEB-AV)	67
3 Discusión y análisis de resultados	68
3.1 Resultados de actividades preliminares	68
3.2.1 Resultados de la recolección de aguas residuales de nejayote	68
3.2.2 Resultados de la elaboración de esferas de carbón activado	68
3.2.3 Resultados de la determinación de turbidez de agua residual de nejayote	69
3.2.4 Resultados de determinación de pH de agua residual de nejayote sin filtrar	70
3.2.5 Resultados de la determinación de humedad y sólidos totales de aguas residuales de nejayote.	70
3.2.6 Resultados de las curvas patrón de agua residual de nejayote a distintas diluciones sin filtrar turbidez vs solidos totales	71
a. <i>Curva patrón Turbidez vs sólidos totales</i>	71
b. <i>Curva patrón de pH vs Concentración de solidos totales</i>	72
3.3 Resultados objetivo 1 y 2	73
3.3.1 Determinación de presión hidrostática a diferentes alturas	73
3.3.2 Resultados del tamaño de partícula de materiales de las camas del filtro de lechos empacados	74
3.3.3 Resultados de la combinación de materiales para las corridas experimentales	75
3.3.4 Resultados de las velocidades de filtrado obtenidos para cada corrida con diferente arreglo de camas y diferente presión	76

3.3.5 Resultados de cada determinación para el filtrado	79
3.3.6 Determinación de color	80
3.3.7 Resultados de la determinación de eficiencia para cada corrida experimental.....	82
3.4 Analisis estadistico	83
3.5 Resultados del objetivo 3.....	87
3.5.1 Resultados de la determinación del contenido de calcio en cada filtrado de agua residual de nejayote	87
3.5.2 Resultados de la determinación de la morfología en cada filtrado de agua residual de nejayote	87
3.6 Conclusiones	93
Referencias.....	101

Lista de Figuras	Página
Figura 1.1 Filtración superficial.....	4
Figura 1.2 Filtración por torta	5
Figura 1.3 Filtración a profundidad.....	6
Figura 1.4 Filtro de lechos empacados	7

Figura 1.5 Diferentes mecanismos que producen transporte de partículas en un...	9
Figura 1.6 Contacto casual de las partículas en el grano del lecho	10
Figura 1.7 Velocidades diferentes debido al gradiente de velocidades.....	11
Figura 1.8 Esquema de la acción de las suspensión en un medio granular.....	12
Figura 1.9 Diseño y características de un filtro convencional de arena.....	15
Figura 1.10 Sistema de filtración con camas múltiples.....	16
Figura 1.11 Arena de sílice.....	19
Figura 1.12 Carbón activado	22
Figura 1.13 Sólidos granulares de tezontle	23
Figura 1.14 Espectro Electromagnético.	29
Figura 1.15 Proceso de nixtamalización.....	32
Figura 1.16 Diagrama de bloques de nixtamalización industrial y de obtención de agua residual de nejayote	33
Figura 1.17 Aguas residuales de nejayote	35
Figura 1.18 Aguas residuales de nejayote	38
Figura 2.1 Cuadro metodológico del desarrollo experimental.....	50
Figura 2.2 Recolección de agua residual de nejayote.....	51
Figura 2.3 Mezclado de sólidos insolubles de nopal y carbón activado	52
Figura 2.4 Determinación de turbidez de agua residual de nejayote diluido	52
Figura 2.5 Determinación de pH.....	54
Figura 2. 6 Determinación de humedad	55
Figura 2.7 Contenido de solidos totales	56
Figura 2. 8 Preparacion de diluciones	57
Figura 2.9 Determinación de densidad.....	58
Figura 2.10 Medición de alturas en el tanque del filtro de lechos empacados	59
Figura 2.11 Selección de tamaño.....	60
Figura 2.12 Materiales dentro del lecho empacado.....	61
Figura 2.13 Filtro de lechos empacados en operacion.....	62

Figura 2.14 Determinación color en filtrado de agua residual de nejayote	63
Figura 2.15 Círculo de color L* a* b*	64
Figura 2.16 Determinación de calcio en muestras	66
Figura 2.17 Técnica de microscopia.....	67
Figura 3.1 Almacenamiento de aguas residuales de nejayote.....	68
Figura 3.2 Esferas de carbón activado y sólidos insolubles de nopal	69
Figura 3.3 Curva patrón Turbidez vs. % concentración de solidos totales	71
Figura 3.4 Curva patrón pH vs Concentración de solidos totales.....	72
Figura 3.5 Grafica comparativo volumen en función de tiempo a presión alta y baja arena-tezontle-carbón	76
Figura 3.6 Grafico comparativo volumen en función de tiempo a presión baja y alta con arena-tezontle.....	77
Figura 3.7 Grafico comparativo volumen en función de tiempo a presión baja y alta con arena-tezontle-carbón activado y arena-tezontle.....	78
Figura 3.8 Color de cada uno de los filtrados	81
Figura 3.9 Grafico eficiencia vs corridas	82
Figura 3.10 Gráfica de efectos principales para Velocidad (m/s)	83
Figura 3.11 Gráfica de efectos principales para Eficiencia (%)	84
Figura 3.12 Gafica de interacción para la velocidad.....	85
Figura 3.13 Grafica interacción eficiencia	86
Figura 3.14 Micrografía de agua residual de nejayote sin filtrar	88
Figura 3.15 Micrografía de agua residual de nejayote Alta presión sin carbón	89
Figura 3.16 Micrografía de agua residual de nejayote Baja presión sin carbón	90
Figura 3.17 Micrografía de agua residual de nejayote Carbón presión baja	91
Figura 3.18 Micrografía de agua residual de nejayote Carbón presión alta	92



Lista de tablas	Página
Tabla 1.1 Composición fisicoquímica del nejayote	46
Tabla 2.1 Condiciones experimentales de la filtración de aguas residuales de nejayote.....	65
Tabla 3.1 Resultados de turbidez del agua residual de nejayote sin filtrar	69
Tabla 3.2 Resultados de las determinaciones de pH	70
Tabla 3.3 Humedad y sólidos totales de aguas residuales de nejayote	70
Tabla 3.4 Determinación de la densidad de agua residual de nejayote	73
Tabla 3.5 Determinación de alturas del tanque	74
Tabla 3.6 Determinación de presión.....	74
Tabla 3.7 Análisis granulométrico	75
Tabla 3.8 Combinación de camas	75
Tabla 3.9 Resultados de determinaciones para cada filtrado.....	79
Tabla 3.10 Resultados de determinación de color de los filtrados.	80
Tabla 3.11 Resultados de la determinación de calcio	87

La nixtamalización en México es un proceso obligado que se realiza para procesar maíz y producir tortillas, el cual se lleva a cabo a diferentes condiciones de proceso. Sin embargo, produce un volumen muy grande de nejayote. Este es un agua de desecho altamente alcalina, por lo tanto, es considerado un contaminante ambiental, el cual contiene altas concentraciones de sólidos solubles e insolubles. Por esa razón se buscan metodologías de tratamiento de aguas contaminantes de nejayote que estén al alcance de los pequeños procesadores de la masa y la tortilla. El objetivo de este trabajo fue realizar la separación mecánica de filtración de aguas residuales de nejayote en un filtro de lechos empacados. Este equipo es un filtro sencillo y fácil de operar. Las variables independientes utilizadas en este trabajo fueron: los arreglos de camas de arena en dos distintas combinaciones arena-tezontle y tezontle-arena-carbón activado, las camas o lechos son capaces de retener los materiales en suspensión. Se utilizaron dos diferentes presiones hidrostáticas; 1681.04 Pa y 3362.03 Pa. En las diferentes corridas experimentales filtradas a distintas condiciones de operación se pudieron obtener, la velocidad de filtrado, mediante volúmenes y tiempos durante los experimentos. La eficiencia de separación fue obtenida mediante la turbidez y los sólidos totales de la suspensión y de los filtrados finales, Adicionalmente, se determinó, el pH y el color de los filtrados. Así mismo se obtuvo la morfología de los componentes de los filtrados por microscopia electrónica de barrido a bajo vacío y la determinación de calcio por espectrofotometría de absorción atómica. Se realizaron curvas patrón de las aguas residuales de nejayote sin filtrar mediante diluciones, turbidez vs sólidos totales y pH vs sólidos totales, para así corroborar que tanto disminuye la cantidad de sólidos el pH y la turbidez en los posteriores filtrados. Las mejores condiciones de filtrado correspondieron a las menores presiones hidrostáticas y con carbón activado, en esas corridas experimentales los filtrados tuvieron menor velocidad, menor turbidez y sólidos totales, el color tendía a las coordenadas del agua potable. El interés de utilizar la filtración por lecho empacado es separar los sólidos de aguas residuales de nejayote, como una alternativa económica y de bajo costo que permita la adquisición de este equipo en molinos de nixtamal para reutilizar el agua como recurso vital no renovable, para que pueda ser posible que traten sus aguas contaminadas y sus subproductos.

Palabras clave: *Filtración de lechos, nejayote, separación mecánica, velocidad.*

Introducción

La nixtamalización en México es un proceso obligado para procesar maíz y producir tortillas el cual no está estandarizado y se realiza a diferentes condiciones de proceso (Fernández-Muñoz *et al*, 2006). Sin embargo, produce un volumen muy grande de nejayote. Este es un agua de desecho altamente alcalina, por lo tanto, es considerado un contaminante ambiental (Trejo-González *et al.*, 1992). Pflugfelder *et al.* (1988) describe que el nejayote contiene altas concentraciones de sólidos solubles e insolubles, aproximadamente el 50% son sólidos insolubles, de los cuales el 64 % son polisacáridos, 20 % almidón y 1.4 % de proteína. Adicionalmente, el nejayote tiene un alto contenido de cenizas 23.15 %, dentro de los que destaca el calcio con un contenido de 7.13 a 13.06 % en promedio y residuos de fracción de partes del grano de maíz: germen, endospermo y pericarpio (Velazco-Martínez *et al.*, 1997). Salmerón-Alcocer *et al.* (2003) reportó que una producción de 600 Ton de maíz nixtamalizado por día generan entre 1500 a 2000 m³ de nejayote. La estimación mensual que se genera es de un volumen en México de alrededor de 1.2 millones m³. Rosentrater (2006) explicó que los efluentes del proceso de nixtamalización son potencialmente dañinos para el medio ambiente. Esto debido a su composición química y su pH altamente alcalino, su demanda química de oxígeno, sus sólidos totales suspendidos y su alcalinidad. En la nixtamalización típica, el procesado de 50 kg de maíz, utiliza alrededor de 75 litros de agua y genera una cantidad aproximada de 60 litros de desecho líquido alcalino (Niño-Medina *et al.*, 2009). La intención de usar el nejayote se reporta desde hace más de dos décadas. Ramírez-Romero *et al.* (2013) preocupados por el excesivo volumen de la cantidad de agua residual, reciclaron el nejayote para volver a nixtamalizar con él. Sin embargo, las tortillas tuvieron altas concentraciones de aflatoxinas. Con base en las investigaciones señaladas anteriormente y buscando alternativas de tratamiento del desecho de nixtamal se han utilizado algunos métodos para la

separación de sólidos dentro de los que destaca: La sedimentación, que únicamente deja que los sólidos se separen por gravedad del líquido, pero esta operación implica largos períodos. Valderrama-Bravo *et al.* (2013) trabajaron con una celda de filtración a presión a diferentes condiciones experimentales para separar los sólidos de nejayote. Utilizaron tierra diatomea como coadyuvante de la filtración que es de alto costo. Evidentemente requieren tener un compresor o una bomba para generar la fuerza de separación, lo que encarece el proceso. Castro-Muñoz y Yáñez-Fernández (2015) realizaron estudios de filtración por separación por membranas con muy buenos resultados a escala de laboratorio para seleccionar condiciones de trabajo para obtener polifenoles totales y utilizarlos en la industria farmacéutica. Un inconveniente de la filtración por membranas es que son extremadamente costosas. Por otro lado, el nejayote produce costra que se forma en las paredes de los recipientes. Así mismo las separaciones mecánicas aunque logran eliminar la mayor parte de los sólidos insolubles del nejayote, los solubles en menor medida, lo que repercute en que no se presentan cambios significativos en el pH, esto trae como consecuencia que se debe realizar un tratamiento químico a las aguas residuales de nejayote si estas quieren ser utilizadas en otros procesos, pero existen también otras alternativas, como el riego en suelos ácidos o como aguas de uso en inodoros. Sin embargo, se buscan metodologías que estén al alcance de los pequeños procesadores de la masa y la tortilla. En realidad, son muy pocas las propuestas de realizar tratamiento de nejayote para recuperar el agua. En este trabajo se propone el uso de un filtro de lechos empacados, sencillo y fácil de operar, fabricado con camas de tezontle, de arena y carbón activado. La operación unitaria de filtración por lechos empacados permite que el nejayote pase a través de distintas camas porosas, capaces de retener materias en suspensión. Las variables que se utilizaron fueron el número de camas y la presión hidrostática. El interés de utilizar la filtración por lecho empacado es separar los sólidos de aguas residuales de nejayote, como una alternativa económica y de bajo costo que permita ser instalado en molinos de



nixtamal con una baja inversión para tratar sus aguas residuales que obtienen día a día y reutilizar en la mayor medida posible el agua como recurso vital no renovable. Esta pequeña industria de la masa y la tortilla no tiene subsidio gubernamental y no estará dispuesta a realizar una gran inversión para el tratamiento de sus subproductos.

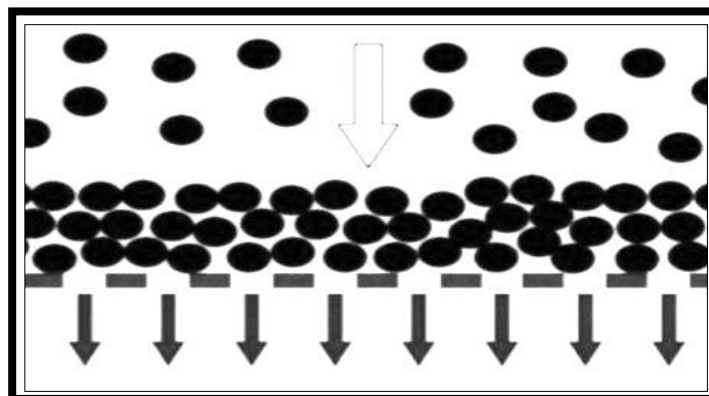
Antecedentes

1.1 Operación unitaria filtración

La separación de sólidos de una suspensión líquida o gas mediante un medio poroso que retiene a los sólidos y permite el paso del líquido se denomina filtración. Los mecanismos del proceso de filtración se clasifican en tres tipos, que se conocen como: filtración superficial, filtración por torta, y filtración a profundidad.

a) *Filtración superficial*

La filtración superficial es conocida esencialmente como un mecanismo de colado, donde las partículas de tamaño mayor al poro del medio filtrante son retenidas. En este sentido el filtro se comporta como un tamiz y se piensa que está relacionado con el cribado de partículas grandes. Sin embargo, se usa para la retención de partículas finas en membranas o tejidos metálicos. En este tipo de filtración la velocidad de flujo disminuye debido al taponamiento del medio filtrante y no se alcanza a formar algún espesor considerable de sólidos acumulados sobre él (Svarowsky, 1979). En la Figura 1.1 se muestra una filtración superficial.

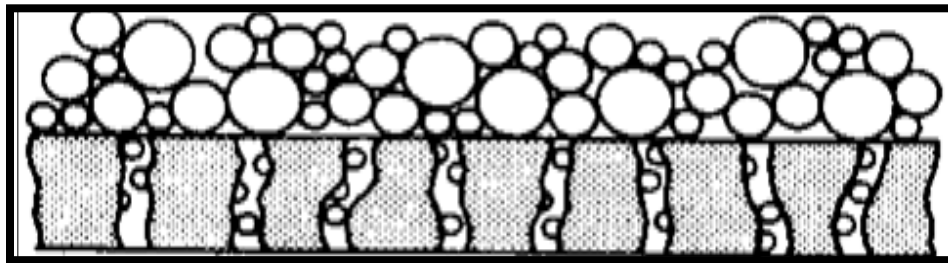


Fuente: Fuente: Svarowsky, (1979)

Figura 1.1 Filtración superficial

b) Filtración de torta

Es el tipo de filtración más común, en él se presenta una acumulación continua de sólidos de cantidad suficiente, de tal manera que se forma una torta de filtración sobre el medio filtrante. La Figura 1.2 muestra una filtración por torta.



Fuente: Svarowsky, (1979)

Figura 1.2 Filtración por torta

La filtración de torta ocurre entonces, cuando un líquido que contiene partículas sólidas es forzado a pasar a través de un medio filtrante poroso, el cual es bastante abierto para permitir el paso del líquido, pero bastante ajustado para retener las partículas sólidas, que forman una torta de filtración a medida que se acumulan sobre el medio filtrante (Svarowsky, 1979).

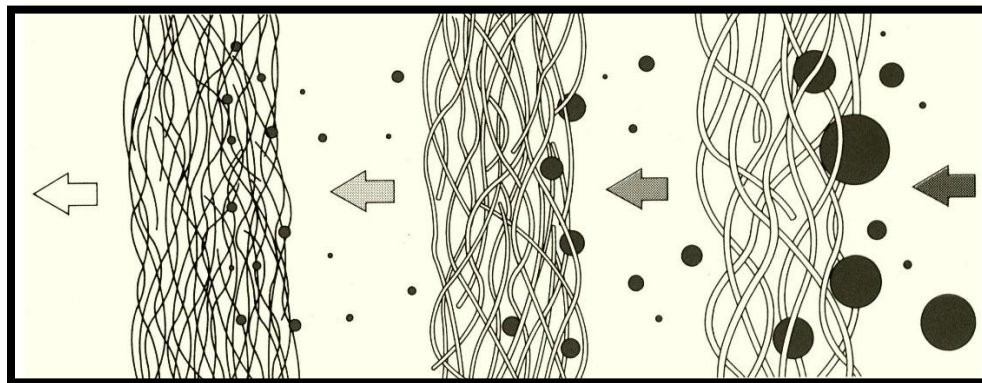
La principal característica de la filtración de torta es que, dicha torta, debe ser lo suficientemente porosa para permitir el flujo del fluido continuo a través de ella a medida que la filtración avanza.

c) Filtración de profundidad

En este mecanismo de filtración, la suspensión a separar es forzada a pasar a través de una cama de material poroso. Aquí las partículas sólidas son atrapadas dentro de los espacios relativamente gruesos de los poros del material poroso (que en este

caso es similar al medio filtrante), permitiendo que el líquido relativamente claro pase a través de él.

En este tipo de filtración las partículas más grandes se recolectan en las primeras capas del medio filtrante y las partículas más pequeñas se depositan en las últimas capas. A medida que las partículas de sólido continúan acumulándose dentro del medio filtrante se incrementa la resistencia al paso del fluido, hasta que la velocidad de éste disminuye por abajo de los límites de velocidad aceptables y entonces el medio filtrante debe ser regenerado o sustituido por otro; marcando así los ciclos de la operación de filtración (Ordoñez, 1996). En la Figura 1.3 muestra la filtración a profundidad.



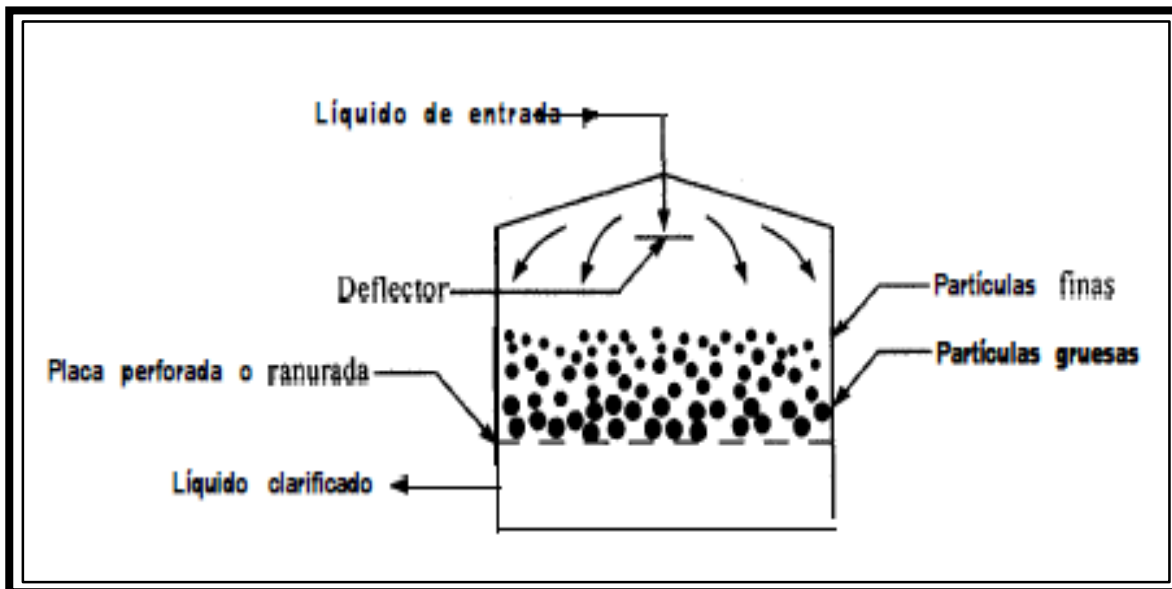
Fuente: (Hellman 1984)

Figura 1.3 Filtración a profundidad

1.2 Filtros de lechos empacados

Utilizado por primera vez y siendo una tecnología exitosa, los filtros de lechos son el tipo más antiguo de filtración de agua. La tecnología de los lechos de arena ha sido utilizada desde comienzos del siglo XIX cuando en 1826, James Simpson construyó un filtro lento de arena que utilizaba agua de río Thames. Un estudio epidemiológico luego del brote de cólera de 1854 en Londres, demostró que

aquellas personas que utilizaban aguas de estos filtros de arena no habían sido afectadas por la epidemia. De ahí en adelante el uso de los filtros lento de arena creció y se difundió a través de toda Europa y eventualmente llegó hasta los Estados Unidos. La sencillez de los filtros de arena en combinación con su ya demostrada capacidad de producir agua potable segura para consumo humano, los hace muy apropiados para ser utilizados en comunidades rurales pequeñas, aisladas de los centros urbanos (Álvarez, 2008). En la Figura 1.4 se muestra un filtro de lechos empacados.



Fuente: (Geankoplis, 2006)

Figura 1.4 Filtro de lechos empacados

Actualmente, se mantiene como un método prometedor para filtrar sistemas pequeños con agua de baja turbiedad. Es un proceso simple y fiable. Son filtros relativamente baratos de construir. El proceso consiste en filtrar el agua lentamente a través de una cama de material poroso, el agua entra a la superficie del filtro y luego drena por el fondo. Construido adecuadamente, el filtro consiste en un tanque,

una cama de arena fina, una capa de grava que soporta la arena, un sistema de drenaje para recoger el filtrado y un regulador de flujo para controlar la velocidad de filtración. Ningún químico es añadido para facilitar el proceso de filtración. No existe otro método que consiga un tratamiento del agua tan efectivo sin aplicar un tratamiento físico, químico o bacteriológico agresivo.

Es un proceso efectivo y económico en ciertos contextos, especialmente para ciertas comunidades. Siendo simple en diseño y construcción, se suma a su atractivo una pasiva operación (Hendricks, 2006).

La filtración con sólo fuerzas de gravedad está limitada a suspensiones que contengan sólidos fáciles de escurrir o de muy bajo contenido de sólidos, se utiliza poco en la industria de los alimentos excepto en el tratamiento de agua y agua residuales. La filtración se identifica por el pasaje del agua a través del manto filtrante o del manto poroso, medida como carga superficial, o sea el cociente entre el caudal Q y el área filtrante (Arboleda, 2000).

1.2.1 Mecanismos responsables de la filtración

La remoción de partículas muchos más pequeñas que los poros del medio filtrante descartó la idea primitiva de que la filtración se realizaba por el simple efecto físico de cernido. Evidentemente los mecanismos que transportan la materia en suspensión dentro del lecho filtrante y lo adhieren con mayor o menor eficiencia a él tienen que ser distintos según sea el tamaño de las partículas, su densidad y las características que posea.

El transporte de partículas es debido a fenómenos físicos e hidráulicos, influenciados por los factores que gobiernan la transferencia de masas. La adherencia es debida a fenómenos de acción superficial que son influenciados por parámetros físicos y químicos.

Los mecanismos que pueden realizar el transporte son:



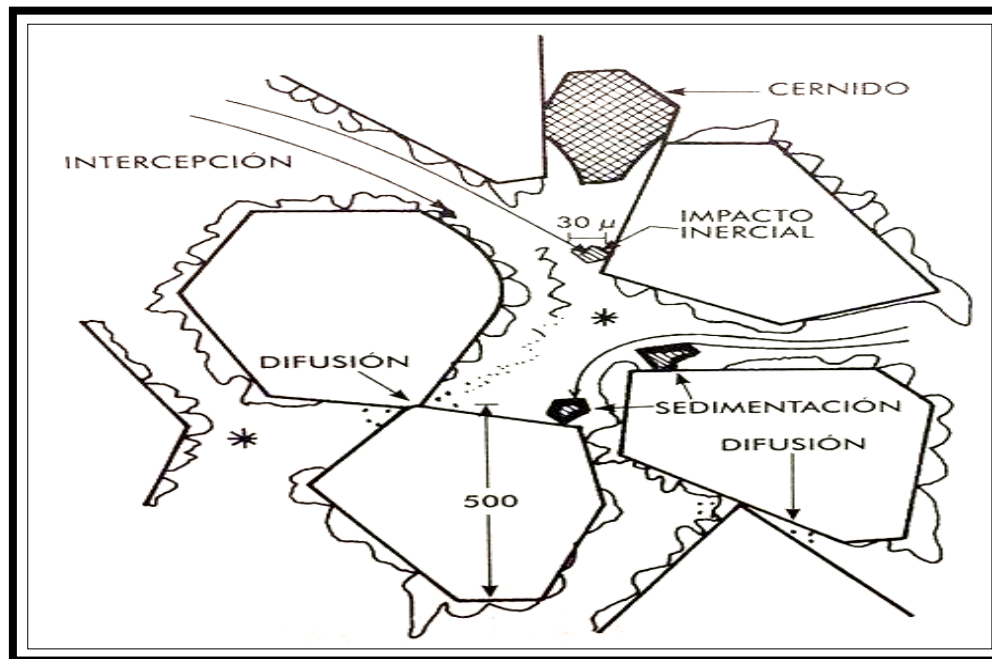
a) Cernido

Cuando la partícula es de tamaño mayor que los poros de lecho filtrante, pueden quedar atrapados en los intersticios. El cernido por lo general actúa sólo en las Capas más superficiales del lecho con partículas relativamente fuertes capaces de resistir los esfuerzos cortantes producidos por el flujo.

b) Sedimentación

La remoción de partículas menores que el tamaño de los poros, puede deberse a la sedimentación de ellas en la superficie de los materiales.

En la Figura 1.5 se muestra una imagen que representa la mayor parte de los mecanismos de filtración que ocurren dentro de un medio filtrante. Nótese que estos mecanismos pueden aparecer en conjunto o bien solo presentarse algunos en la operación.

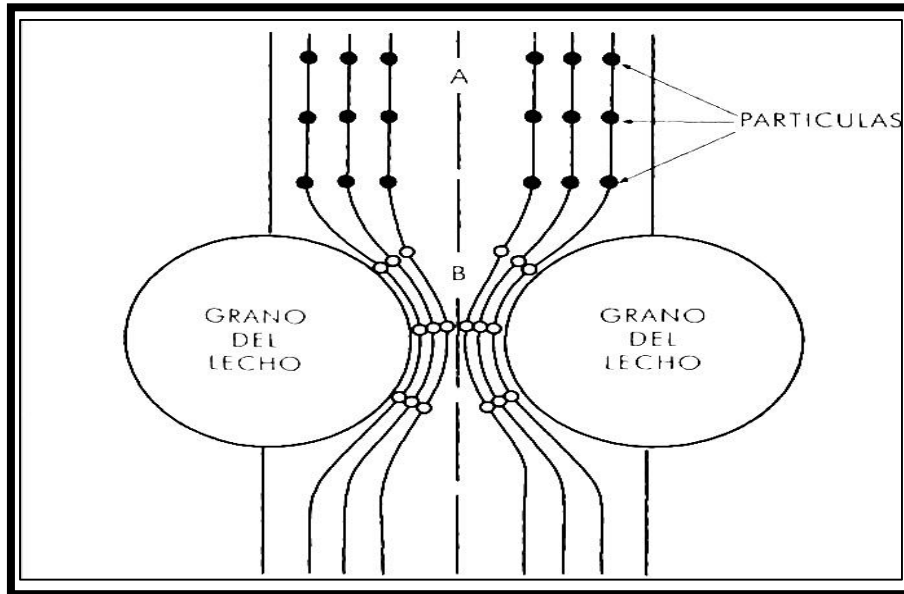


Fuente: Arboleda (2000)

Figura 1.5 Diferentes mecanismos que producen transporte de partículas en un lecho empacado

c) Intercepción

Si suponemos que las partículas viajan con líneas de flujo, para bajas velocidades, como muestra la Figura 1.6.



Fuente: Arboleda, (2000)

Figura 1.6 Contacto casual de las partículas en el grano del lecho

Resulta claro que, al producirse el estrechamiento, lo que ocurre con dichas líneas en la constricción es que están obligadas a ponerse en contacto entre sí, también se ponen en contacto con el medio filtrante, quedando interceptadas por éste.

d) Impacto inercial

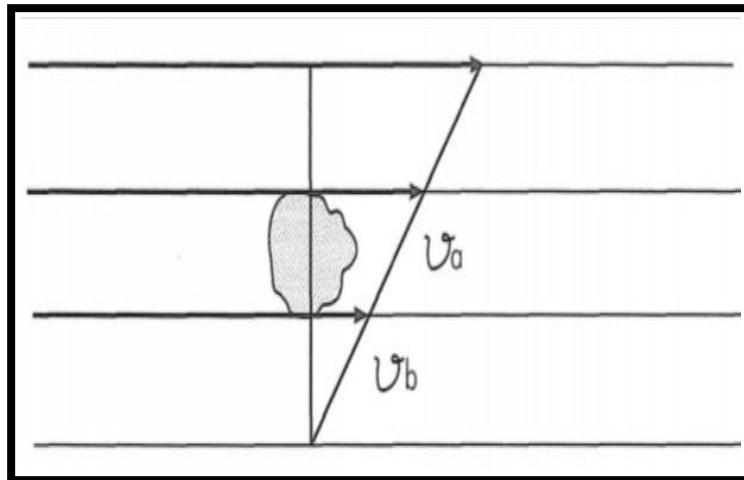
A velocidades altas y con partículas grandes, éstas pueden seguir una trayectoria distinta a la de las líneas de flujo si adquiere suficiente cantidad de movimiento para eso, e impulsadas por las fuerzas de inercia, pueden chocar con el grano del filtro quedando adheridas a él.

e) Difusión

Existe una tendencia de las partículas pequeñas a difundirse desde las áreas de mayor concentración a las áreas de menor concentración, razón por la cual se pueden encontrar sólidos adheridos a los granos del medio en puntos donde el flujo es prácticamente cero.

f) Acción hidrodinámica

Partículas de tamaño relativamente grandes en un medio viscoso en movimiento podrán tener en sus extremos velocidades diferentes, haciendo que la partícula a una región de velocidad más baja de acuerdo a la Figura 1.7.



Fuente: Arboleda, (2000)

Figura 1.7 Velocidades diferentes debido al gradiente de velocidades

1.2.2 Fuerzas adherencia**a) Fuerzas de Van der Waals**

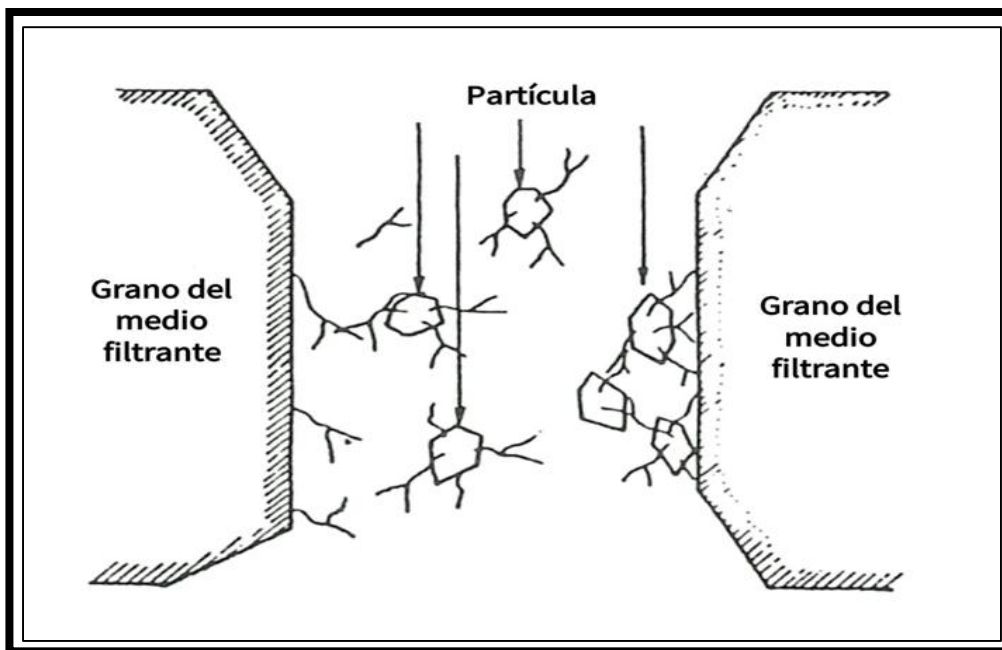
En la superficie de cada grano sobre la cual las fuerzas de adhesión son operativas, hay un volumen alrededor de cada grano que puede designarse como espacio de adhesión y las partículas suspendidas que entran en este espacio serán atraídas para adherirse a la superficie de los granos.

b) Fuerzas electroestáticas

La probabilidad de adhesión o repulsión entre los sólidos granulares del medio filtrante y las partículas debido a las fuerzas electroestáticas que estas presentan.

c) Puente químico

Adhesión de las partículas con sus segmentos líquidos al atravesar constricciones del medio filtrante al enlazarse con segmentos sueltos adsorbidos por los granos o por partículas ya adheridas al lecho filtrante De acuerdo a la Fig. 1.8 (Arboleda, 2000).



Fuente: Arboleda, (2000)

Figura 1.8 Esquema de la acción de las suspensiones en un medio granular empacado

1.3 Medio filtrante

Los materiales para un filtro de lechos empacados son en su mayoría arena y grava, que, para muchas instalaciones, pueden ser obtenidas localmente. Todo esto hace al lecho empacado atractivo económicamente, porque la mayor parte de los fondos de la construcción pueden ser gastados en la comunidad. Algunos accesorios quizá puedan ser obtenidos localmente. Por ejemplo, una placa perforada puede ser usada para la medición de flujo, con la fabricación de un maquinista local. Válvulas y las tuberías de desagüe pueden ser ordenadas desde manufactureros de fuera. La simplicidad de su diseño y operación, así como los requerimientos mínimos de compuestos químicos y energía hacen que el filtro de lechos empacados sea una técnica apropiada para el retiro de materia suspendida orgánica e inorgánica. Los filtros de lechos empacados pueden proveer incluso una excelente calidad de tratamiento en el filtrado. Demuestran constantemente su efectividad en el retiro de partículas suspendidas con turbiedades en los efluentes por debajo de 1.0 unidad de turbiedad nefelométrica (NTU).

Los filtros de lechos empacados presentan ciertas limitaciones. Estos requieren de grandes cantidades de material y de mucha mano de obra para su limpieza. El agua con niveles altos de turbiedad puede tapar rápidamente la arena fina de estos filtros. Los filtros lentos de arena no retiran completamente todos los químicos orgánicos o sustancias inorgánicas disueltas (Hendricks, 2006).

1.4 tratamiento de aguas residuales por filtración

En el tratamiento de aguas residuales, se utiliza la filtración que es, es una operación utilizada para remover sólidos, materiales no sedimentables, turbiedad, fosforo. Demanda bioquímica de oxígeno (DBO), Demanda química de (DQO), metales pesados, virus; es decir para asegurar una calidad superior del efluente secundario. La mayor experiencia en la utilización de la filtración para tratamiento de aguas proviene del diseño y operación de filtros de medio granular para la

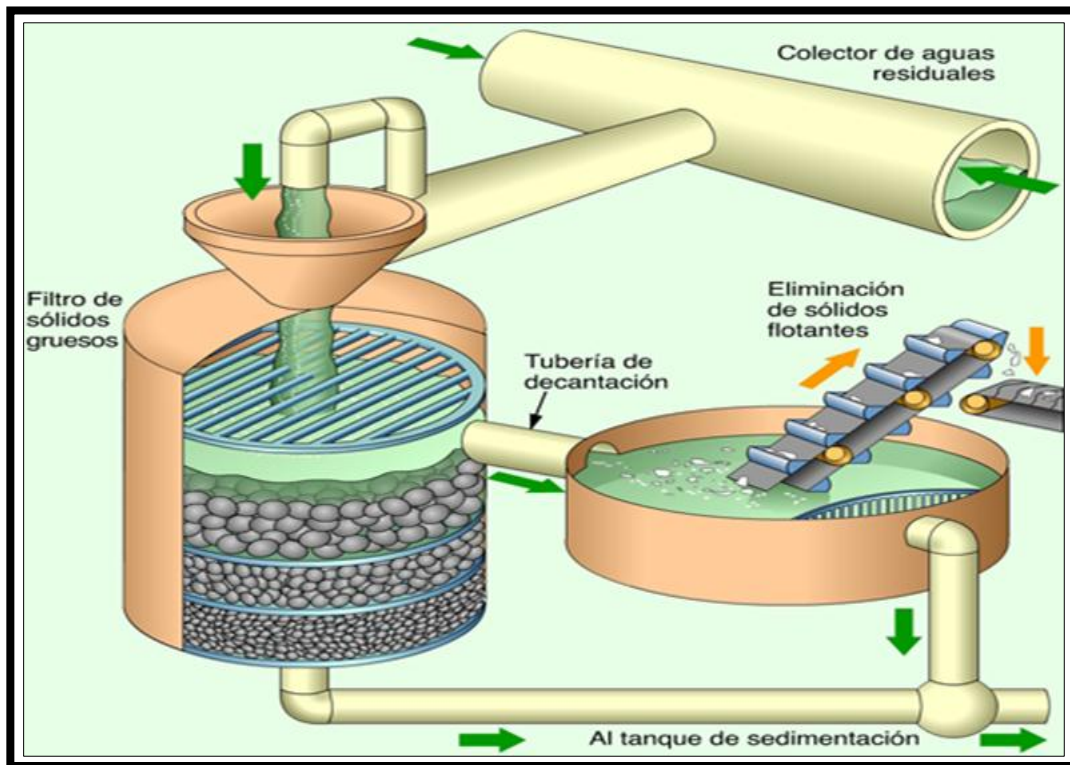
obtención de agua potable. Sin embargo, aunque el diseño, la configuración física y la operación de los filtros tienen los mismos principios básicos en ambas aplicaciones, debe tomarse en cuenta que hay diferencias muy importantes entre la aplicación de la filtración para agua potable y para efluentes secundarios de aguas residuales o, en general, aguas residuales pre tratadas con químicos.

La filtración se puede usar para depurar aguas efluentes secundarios, sin agregar coagulantes; con agregación de coagulantes, antes de la filtración o antes del sedimentador secundario, y para depurar agua residuales crudas previamente coaguladas, floculadas y sedimentadas, en una planta de tratamiento fisicoquímico. La remoción de, los sólidos suspendidos contenidos en el agua residual, dentro del lecho filtrante granular, en todos los casos, es el resultado de un proceso muy complejo que involucra mecanismos de remoción de diferentes como el cribado, la interceptación, la adsorción, floculación y sedimentación. (Tchobanoglous, 1995)

La producción de agua clara y cristalina es prerrequisito para el suministro de agua segura y requiere de la filtración. Aunque cerca del 90% de la turbiedad y el color son removidos por la coagulación y la sedimentación, una cierta cantidad de floculo pasa al tanque de sedimentación y requiere su remoción. Por ello, para lograr la clarificación final se usa la filtración a través de medios porosos; generalmente dichos medios son arena o arena y antracita (Rojas, 1999).

1.4.1 Descripción de la filtración de aguas residuales

El filtro rápido por gravedad es tipo de filtro más usado en tratamiento de aguas. La operación de filtración supone dos etapas: filtración y lavado; las dos etapas se identifican en la Figura 1.9.



Fuente:(Rojas, 1999)

Figura 1.9 Diseño y características de un filtro convencional de arena

1.4.2 filtros que se utilizan en el tratamiento de aguas residuales

Los filtros duales y con medios múltiples constan de dos o más medios. Un filtro con medios múltiples funciona con medios más finos y densos en la parte inferior y medios más gruesos y menos densos en la parte superior. Generalmente se coloca granate en el fondo del lecho, arena en el medio y carbón de antracita en la parte superior. El patrón de flujo de los filtros con medios múltiples es de arriba hacia abajo con flujo por gravedad. También se usan filtros de flujo ascendente, horizontales y de doble flujo. Los filtros con medios múltiples requieren una contracorriente periódica para mantener su eficiencia. Cuando la obstrucción causada por los sólidos atrapados reduce la tasa de movimiento de aguas residuales a través del lecho del filtro, se llega al final de la carrera del filtro y se

debe enjuagar para remover los sólidos suspendidos en el lecho. En la Figura 1.10 se presenta un ejemplo de camas de un filtro de lechos empacado.

Durante el lavado por contracorriente, el flujo a través del filtro se revierte para que los sólidos retenidos en los medios se desprendan y puedan salir del filtro. Asimismo, el lecho puede agitarse con aire para ayudar a remover los sólidos. Luego, el agua del enjuague se recicla y vuelve a la corriente que alimenta las aguas residuales.

El lavado por contracorriente también puede usarse con filtros de arena. La filtración con medios granulares se usa con mayor frecuencia para el tratamiento terciario en plantas municipales de tratamiento de aguas residuales y para la remoción complementaria de sólidos suspendidos del efluente de los procesos de tratamiento químico. Sin embargo, los sistemas de tratamiento biológico en suelos pueden considerarse como una forma de filtración natural con medios granulares. En la tendencia actual se prefieren los diseños con tasas de filtración altas, lechos filtrantes más profundos y medio grueso (Tchobanoglous, 1995).



Fuente: (EPA, 1995)

Figura 1.10 Sistema de filtración con camas múltiples.

1.5 Criterios de Diseño

La diferencia principal entre los filtros para purificación de agua y filtros para tratamiento de aguas residuales radica en el espesor de las camas o lechos.

Los granos de las camas para aguas residuales deben ser más grandes para el filtro que tenga una velocidad apropiada de filtración y pueda almacenar el volumen de filtración. El diseño de un filtro para aguas residuales requiere una selección apropiada del tamaño de los granos y del espesor de la cama de filtración.

Evidentemente la mejor manera de seleccionar dichos parámetros y proveer un diseño de costo mínimo es desarrollar un estudio en planta piloto que permita trabajar como variables independientes; el espesor y altura de las camas, deducir los requisitos del sistema de filtración. Para una operación económica se requiere una tasa de filtración y una duración de la carrera del filtro apropiada. Carreras mayores de 24 horas, a cualquier tasa de filtración, no aumentan la producción neta de agua en forma significativa, mientras que en carreras de filtración menores de 10 horas afectan a la producción neta de agua y tienen incidencia sobre la economía del proceso (Tchobanoglous, 1995).

1.5.2 Fuerza impulsora

De acuerdo con la fuerza impulsora utilizada para vencer la resistencia friccional ofrecida por el lecho filtrante, los filtros se clasifican como filtros de gravedad o de presión. El filtro por gravedad es el filtro más usado en plantas de purificación de agua. El filtro a presión se ha usado principalmente en la filtración de aguas para piscinas y en pequeñas plantas donde su instalación es ventajosa (Rojas, 1999).

1.5.3 Tasa de filtración

Los primeros filtros usados para el tratamiento de agua fueron los filtros lentos, los cuales utilizan una capa de arena fina de 1m soportada sobre un lecho de grava de aproximadamente 0.30 m. estos filtros fueron luego reemplazados por los filtros

rápidos, filtros de arena generalmente con lavado ascensional, con tasas de filtración mucho mayores y por consiguiente, con requerimientos de área mucho menores. Posteriormente, con el uso de medio filtrante (camas) duales o lechos mezclados, se lograron diseños mucho más económicos en área, al usar tasas de filtración todavía mayores que las de los filtros convencionales (Rojas, 1999).

1.6 Modelo matemático

No se ha podido llegar a encontrar un modelo matemático que describa con precisión el comportamiento de los filtros. No existe hasta ahora, ninguna fórmula o conjunto de ecuaciones con las cuales se asuman determinados valores, pero si se puede calcular los diferentes parámetros que inciden en el funcionamiento de un filtro y se pueden utilizar métodos indirectos para hacer evaluaciones a los filtrados obtenidos a diferentes condiciones experimentales.

Parece que el intento por llegar a una descripción matemática exacta, con constantes teóricas del proceso de filtración, está condenada al fracaso. Obviamente siempre será necesario obtener los parámetros del proceso, experimentalmente.

Actualmente no es posible predecir el funcionamiento de un filtro de lecho empacados para una calidad específica de agua sin tratar. Se debe recordar que después de que un diseñador establece los parámetros, como la velocidad de filtración de la planta, profundidad de la cama y la granulometría de la arena, es poco lo que puede hacer el operador de la planta para mejorar el funcionamiento del filtro de lechos empacados que no produzca una filtración satisfactoria.

Es conveniente adelantar estudios prácticos con filtros pilotos, cuando se quiera conocer el comportamiento de un determinado filtro, operando con una cierta suspensión, ya que cualquier alteración en la calidad de esta o del medio granular, significará un cambio del problema (Arboleda, 2000).

1.7 Materiales usados para el tratamiento de aguas residuales

a) Arena sílica

El cuarzo SiO_2 es el principal constituyente de las arenas de sílice. El cuarzo procede de rocas ricas en sílice, tanto intrusivas como extrusivas y de sedimentarias como las areniscas. Es por causa de su estabilidad química y física el mineral detrítico más abundante, y entre todos los minerales casi el único que constituye un compuesto químico puro, ya que su composición suele ser 100% de SiO_2 (46.7% de Si y 53.3% de O_2). Sus usos son en la industria del vidrio y cerámica, metalúrgica y fundición, construcción, abrasivos, arena de filtración, entre otros. En la Figura 1.11 se presenta la arena sílica.



Figura 1.11 Arena de sílice

La arena sílica tiene muchas aplicaciones industriales. Este mineral es útil debido a sus propiedades inherentes, entre las cuales se pueden citar las siguientes: es químicamente inerte en un rango muy amplio de pH, lo que permite su aglutinamiento sin dejar residuos ajenos a la mezcla, conservando sus características físicas, aún en condiciones de carga y temperatura refractaria; molida se emplea como material de relleno en pastas de pulir, así como filtro de líquidos y para tratamientos abrasivos en la forma de chorros de arena.

La arena sílica es utilizada como un medio de filtración en los lechos o camas, la cual debe estar relativamente libre de arcilla, polvo y materia orgánica y micéica. Además tiene un color blanco que la hace ser favorable (Perfil del Mercado del Sílice, 2013).

b) Carbón activado

La adsorción es un fenómeno por el que las moléculas de un fluido que inciden sobre una superficie sólida quedan retenidas cierto tiempo sobre ella por acción física y química. Con la adsorción se pueden separar componente o mezclas líquidas o gaseosas por contacto con el adsorbente apropiado.

Llamemos carbones activados a unos carbones con propiedades notables de adsorción como consecuencia de su gran porosidad. Existen dos tipos de carbón activo. El carbón activo en polvo, que se utiliza fundamentalmente en depuración de líquidos y el carbón activo granular, que se suele aplicar con frecuencia para la adsorción de impurezas de gases y vapores.

Las materias primas de las que se puede obtener el carbón activo pueden ser muy diversas, siendo las más frecuentes las siguientes: cok, hulla, madera, cáscara de coco, cáscara de almendra, aserrín de madera, entre otras.

Para que estos carbones sean eficaces, es decir para que aumenten considerablemente su superficie específica, deben ser activados, lo que puede hacerse por dos vías:

- **Por activación química**

Que se realiza mediante la carbonización de las materias primas en presencia de agentes químicos.

- **Por activación gaseosa oxidante sobre carbón**

Se trituran las mezclas de carbones hasta granulometrías predeterminadas y se carbonizan seguidamente en horno para conseguir la porosidad. Después se activan en un horno en presencia de vapor de agua o mediante la activación al oxígeno. En la Figura 1.12 se presenta el carbón activado.

El fenómeno de adsorción, es una transferencia de una fase líquida, el adsorbato, hacia una fase sólida, que es el carbón activo, con retención de moléculas de los contaminantes del agua residual en la superficie del carbón activado, en el proceso distribuido en varias etapas:

- **Etapa 1:** Transferencia muy rápida de la particular de la capa externa de hidratación hacia la interna.
- **Etapa 2:** Desplazamiento rápido del agua ligada hasta contactar con el carbón activado.
- **Etapa 3:** Difusión lenta dentro del carbón activo bajo la influencia del gradiente de concentración.
- **Etapa 4:** Adsorción muy rápida en los microporos.

En la segunda etapa el coeficiente de transferencia depende de las características del carbón activo, entre otros factores. En la tercera etapa interviene el coeficiente de difusión para las macromoléculas.

La adsorción no específica la provocan las fuerzas de atracción de Van der Waals que genera unos enlaces con poca energía. Se crean entre el soluto y la estructura cristalina hidrófoba del carbón activado. El fenómeno es reversible, y en ciertas condiciones se pueden desprender las moléculas que se han adherido al carbón

activo. Por otra parte, la adsorción no específica es poco selectiva respecto a los solutos, y hace que se puedan formar enlaces químicos con mucha más energía entre los compuestos ionizables y los grupos funcionales presentes en los bordes del carbón (Seoanez, 2004).

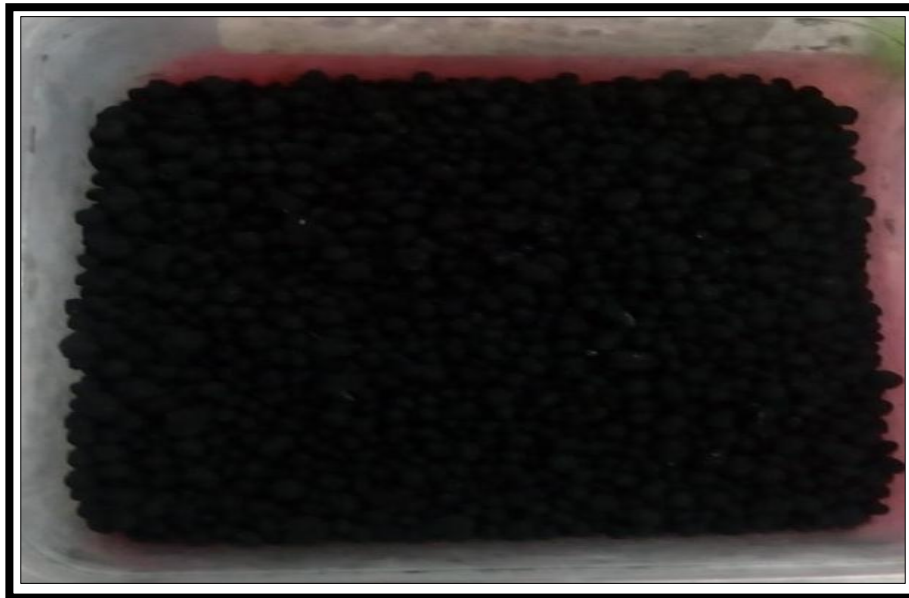


Figura 1.12 Carbón activado

c) Tezontle

Existen otras tecnologías para enfrentar el problema de las aguas residuales, como el uso del tezontle es un material considerado inerte, con valores de pH cercanos a la neutralidad y con capacidad de retención de humedad que es dependiente del diámetro de la partícula; adicionalmente no contiene sustancias tóxicas y tiene estabilidad física. Y debido a su poder adsorbente tiene la capacidad de retener partículas en las porosidades de su estructura física, lo que lo hace ideal para su uso en procesos de filtración como se muestra en la Figura 1.13.

Ha demostrado brindar buenos resultados, ya que, gracias a su elevada área superficial específica y la afinidad de las bacterias por el tezontle, tiene una alta

velocidad de colonización y al ser un material inorgánico es resistente al ataque microbiano, exhibe alta termo estabilidad y tiene buenas propiedades de flujo. Bajo las diferentes condiciones de trabajo que diversos autores han usado, el tezontle ha demostrado ser un medio de soporte adecuado para el tratamiento de aguas residuales (González, 2012).



Figura 1.13 Sólidos granulares de tezontle

1.8 Análisis granulométrico de materiales granulares

El material granular para los filtros se selecciona por medio del cernido en tamices. Para analizar la muestra, se pesa una cantidad de ella, se cierna en tamices consecutivos y se va obteniendo el tanto por ciento del peso retenido o pasado en cada tamiz con relación al total (Arboleda, 2000).

1.8.1 Tamizado

La tamización o tamizar es un método físico para separar mezclas en el cual se separan dos sólidos formados por partículas de tamaño diferente.

Consiste en hacer pasar una mezcla de partículas de diferentes tamaños por un tamiz o cualquier cosa con la que se pueda colar. Las partículas de menor tamaño pasan por los poros del tamiz o colador atravesándolo y las grandes quedan atrapadas por el mismo.

Es un método muy sencillo utilizado generalmente en mezclas de sólidos heterogéneos. Los orificios del tamiz suelen ser de diferentes tamaños y se utilizan de acuerdo al tamaño de las partículas necesarias y homogéneas, que por lo general tiene un color, el cual se diferencia de lo que contenga la mezcla. Características de un tejido de tamiz: según la naturaleza del tamiz que es el material del que están hechos los hilos, pueden ser de acero, bronce o nailon (NMX-046-S-1980; Zeki-Berd, 2009).

1.8.2. Características de materiales porosos

a) La densidad de los materiales porosos

La densidad de un material es la masa por unidad de volumen que ocupa. Son unidades habituales de densidad el g/cm^3 , kg/m^3 o mg/m^3 . Sin embargo, los materiales porosos no rellenan todo el espacio. En el volumen que ocupan dejan unos espacios vacíos o huecos que se denominan poros. Normalmente los poros se encuentran llenos de gas o de líquido y van a dificultar la determinación del volumen y de la masa real de sólido a la hora de medir su densidad.

Por muy pequeña que sea una partícula sólida puede contener poros. Al igual que el tamaño de partícula, el tamaño de poro es muy variado: desde los macroporos que se observan a simple vista ($> \text{mm}$) hasta los micro y nanoporos de unos pocos nanómetros. La porosidad es una característica del material que tiene un gran efecto

en las propiedades del objeto final. El material va a tener poros cerrados, aquellos que no están abiertos a la superficie externa del sólido, y poros abiertos, los que son accesibles desde la superficie. En un sólido poroso se pueden definir tres tipos de volúmenes:

- El volumen total (**V_t**):

Se determina utilizando instrumentos como un calibre o un micrómetro para medir las dimensiones principales del objeto, y corresponde al volumen que ocupa el sólido con todos sus poros.

- El volumen aparente (**V_a**):

Es el volumen que desplaza el sólido cuando se sumerge en un líquido, el cual será el volumen de sólido y el volumen de poro cerrado ya que el líquido penetra en los poros abiertos. El volumen último del sólido (**V_u**) es el volumen real de sólido, y su determinación experimental es bastante más laboriosa.

- La porosidad:

Es el porcentaje de volumen total de poro ($V_{\text{Poro cerrado}} + V_{\text{Poro abierto}}$) respecto del volumen total (V_t). Asociados a estos tres volúmenes se definen tres tipos de densidades en los materiales porosos: Densidad volumétrica: es la densidad calculada cuando se ha medido el volumen total.

Densidad última del sólido: es la densidad real del sólido. Para sólidos cristalinos se puede determinar una vez conocida la composición química exacta y la estructura cristalina, esto es, conociendo la masa y las dimensiones que tiene la celda unidad del compuesto (Santos, 2013).

- Porosidad de la partícula (ϵ_p):

La porosidad de la partícula representa la fracción del volumen total de la partícula que ocupan los poros. La porosidad de la partícula tiene unidades de cm^3 vacíos / cm^3 partícula. Desde el punto de vista cualitativo la porosidad es la capacidad de una partícula de tener poros, entendiendo por poro cualquier espacio de una masa rocosa que no esté ocupado por un material sólido, sino por un fluido (agua, aire, petróleo). Cuantitativamente, la porosidad se define como el espacio total ocupado por poros (Zeki-BerK, 2009).

1.8.3 Parámetros de evaluación de las aguas residuales

a) Potenciómetro

El potenciómetro es un sensor utilizado en el método electroquímico para medir el pH de una disolución. La determinación de pH consiste en medir el potencial que se desarrolla a través de una fina membrana de vidrio que separa dos soluciones con diferente concentración de protones. En consecuencia se conoce muy bien la sensibilidad y la selectividad de las membranas del pH. El voltaje en el interior del bulbo es cte., porque se mantiene su pH constante (pH 7) de manera que la diferencia de potencial solo depende del pH del medio externo (NMX-F-317-S-1978).

b) Turbidímetro

La turbidez, una nubosidad en el agua, puede ser interpretada como la ausencia de la claridad o brillantez. Es causada por materia suspendida tal como arcilla, limo, materia orgánica e inorgánica y organismos microscópicos. La turbidez no debe ser confundida con el color, una coloración oscura puede estar limpia y no turbia.

La turbidez del agua es a menudo un indicador de condiciones que podrían causar daño a un equipo de manufactura. La claridad en el agua es de especial importancia

para los fabricantes de productos de consumo, como los productores de bebidas, procesadores de alimentos y plantas de tratamiento de agua. Las partículas que causan la turbidez no siempre son perjudiciales para la salud humana. Pero son considerados una característica indeseable. La claridad del agua se mejora con procesos de separación como la sedimentación, coagulación y la filtración. En aguas naturales la turbidez es un indicador de calidad y productividad.

La luz que pasa a través del agua limpia viaja en línea recta. Las partículas en agua turbia pueden causar que la luz se disperse dándole un aspecto turbio. La turbidez de una muestra es determinada por la medición de la cantidad de dispersión cuando una luz pasa a través de la muestra. Cuanto mayor sea la turbidez, más grande será la cantidad de dispersión. La turbidez se puede medir de muchas maneras. Métodos visuales incluyen, los métodos comparativos, el método de disco de Secchi y el método de la vela de Jackson.

Métodos comparativos se utilizan en aguas poco profundas y determinar la turbidez, haciendo coincidir la turbidez de una muestra de agua a un nivel de turbidez conocida, ya sea con un "blanco" en la parte inferior de un tubo o con un comparador de turbidez. En las aguas profundas de los lagos, lagunas, ríos y estuarios del disco Secchi se usa a menudo para medir la turbidez. El disco de Secchi es un disco sobre ocho pulgadas de diámetro que es blanco o está marcado con cuadrantes en blanco y negro. El disco se baja en el agua en una línea de calibrado y la profundidad donde se observa el disco sólo desaparece de la vista. El disco se eleva entonces hasta que es visible. El promedio de estas dos distancias se conoce como la "profundidad de Secchi".

En las plantas de abastecimiento de agua y tratamiento de aguas residuales, el aparato de la vela de Jackson era un instrumento estándar para medir la turbidez de las aguas primas y los efluentes de aguas residuales tratadas por muchos años. El equipo se ha modificado con el tiempo, pero originalmente consistía en un tubo de vidrio largo apoyado sobre una "candela estándar." El agua se añadía o se

retiraba del tubo hasta que la imagen de la llama de la vela se hacía indistinta. La profundidad del agua en el tubo se leía en una escala calibrada grabada en un lado del tubo, y los resultados se informaban numéricamente como unidades de turbidez Jackson (JTU). La turbidez más baja que se puede determinar con este método es de 25 unidades nefelométricas de turbidez (NTU). Como los requisitos de tratamiento de agua superficial de la EPA afirman que, acabado el tratamiento de agua en las plantas municipales, estas tendrán una turbidez inferior a 1 NTU, métodos indirectos fueron desarrollados para medir la turbidez. Los turbidímetros son el método preferido. Los nefelómetros, tales como el 2020, son turbidímetros que miden la luz dispersada a 90 grados de la fuente de luz. Un haz de referencia pasa a través de la muestra y se mide a 180 grados. La relación de estas dos lecturas se convierte electrónicamente a una medición de la turbidez en NTU (Manual de operaciones del Turbidímetro Fotométrico Nefelométrico Minolta CR-300).

En la actualidad existen multitud de aparatos que pueden medir la turbiedad del agua. Básicamente se dividen en dos grandes grupos: los fotómetros de transmitancia y los fotómetros nefelométricos, según sea el ángulo y la forma como se mida la luz que atraviesa la muestra que se quiere analizar.

Los fotómetros nefelométricos miden la cantidad de luz diseminada por la muestra de agua, y la comparan con la de una concentración conocida. Es generalmente, un sistema más confiable y preciso. Como al medir bajas turbidimetrías las intensidades luminosas que se observan son muy pequeñas se recurre, por lo general, a sistemas electrónicos para evaluarlas, lo que resulta mucho más exacto que la comparación visual. Este tipo de turbidímetro consta básicamente de cinco partes:

1. Fuente de luz.
2. Concentrador de luz.
3. Muestra de agua.

4. Celda fotoeléctrica.
5. Medidor de turbiedad.

La celda fotoeléctrica está colocada a diferentes ángulos, según el equipo y es la que acciona el aparato a la lectura de la turbiedad calibrado en Unidades Nefelométricas directamente.

La ventaja de los fotómetros con fotocelda es que las determinaciones no se basan en el criterio del observador. Pueden, además, detectar bajos valores, algunos hasta de 0.001 NTU lo que resulta muy útil para evaluar la eficiencia del proceso de filtración (Arboleda, 2000)

c) Colorímetro

El color se define como la sensación visual que se origina por la estimulación de la retina del ojo. El ojo humano solo puede detectar longitudes de onda de la región.

La figura 1.14 muestra el espectro electromagnético

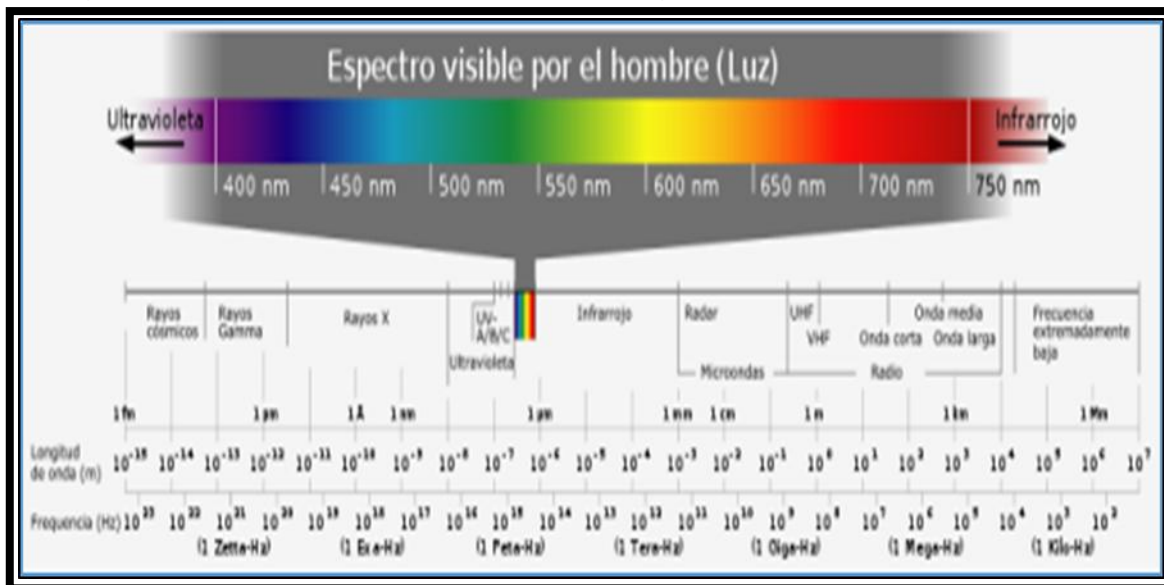


Figura 1.14 Espectro electromagnético. Konica Minolta, (2014)

Como solución a los problemas de evaluación del color se crearon sistemas de medición para poder cuantificarlo y expresarlo numéricamente, cuyo principio está basado en la cantidad de luz reflejada por el objeto. El primer sistema fue creado en 1931, se refiere a los valores tri-estímulo (x y z) y el sistema creado en 1976 referido a los espacios de color (L^*a^*b), siendo estos sistemas los más utilizados en la actualidad por los instrumentos de medición de color. El concepto de los valores tri-estímulo está basado en la teoría de los tres componentes de color que establecen que el ojo humano posee receptores de los tres colores primarios: rojo, azul y verde; y todos los colores son mezclas que se derivan de ellos. El colorímetro está diseñado con tres filtros de color rojo, verde y azul para seleccionar la longitud de onda del haz de luz (Konica Minolta, 2014).

d) Sólidos Totales

Se basa en el principio fisicoquímico que relaciona la presión de vapor con la presión del sistema a una temperatura dada. Si se abate la presión del sistema, se abate la presión de vapor y necesariamente se reduce su punto de ebullición. Estos sólidos también se pueden obtener por el método indirecto de humedad. Y su diferencia corresponde a los sólidos (Nollet, 1996).

e) Espectrofotómetro

La espectrofotometría de absorción atómica es una de las técnicas analíticas más utilizadas para la determinación de trazas de elementos inorgánicos como Ca, Cu, Fe y Pb debido a su alta selectividad, sensibilidad y la posibilidad de ser ajustada al análisis directo con una mínima preparación de muestra (Lorenzo, *et. al.*; 2010).

En este método la solución muestra es directamente aspirada a una llama de flujo laminar. La llama tiene como función generar átomos en su estado fundamental, de los elementos presentes en la solución muestra. Temperaturas cercanas a los

1,500–3,000 °C son suficientes para producir la atomización de un gran número de elementos, los que absorberán parte de la radiación proveniente de la fuente luminosa (Van Loon, 1980).

f) Microscopía electrónica de barrido (MEB).

Principios generales de la Microscopía Electrónica de Barrido (Scanning Electron Microscope, MEB). El microscopio electrónico de barrido, conocido por sus siglas inglesas MEB, utiliza electrones en lugar de luz para formar una imagen. Para lograrlo, el equipo cuenta con un dispositivo (filamento) que genera un haz de electrones para iluminar la muestra y con diferentes detectores se recogen después los electrones generados de la interacción con la superficie de la misma para crear una imagen que refleja las 20 características superficiales de la misma, pudiendo proporcionar información de las formas, texturas y composición química de sus constituyentes (Rincón-Londoño *et al.*, 2016).

1.7 Proceso de nixtamalización

El maíz es el cereal con mayor demanda de consumo en México, aproximadamente 23,200 millones de toneladas. Se estima que para el 2020 las cifras aumenten a 24,600 Mt (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación [SAGARPA], 2011); esto debido a la gran cantidad de productos que se derivan del mismo, tales como tortillas, totopos, tostadas, tacos, harinas (Valderrama-Bravo *et al.*, 2012) y demás derivados del grano.

La nixtamalización es el proceso más antiguo de la industria alimentaria en México, representativo de la cultura nacional y de suma importancia, porque proporciona una gran variedad de alimentos básicos para la dieta de la población mexicana. Estos productos, están presentes todos los días en su mesa, en cualquier horario del día y en formas tan diversas como variadas dependiendo de la localidad y de la zona geográfica (Trejo-González *et al.*, 1992).

El proceso de nixtamalización artesanal se realiza en recipientes de cocción. Consiste en un tratamiento térmico-alkalino que se lleva a cabo en dos etapas. La primera etapa inicia con la cocción de granos de maíz en un contenedor utilizando una solución saturada de hidróxido de calcio, cuya concentración puede variar de 0.5 a 2 % como muestra la Figura 1.15 a. La segunda etapa consiste en el reposo del grano en el líquido de cocción (nejayote) e inmediatamente después, el líquido es drenado de los granos hidratados (nixtamal) de acuerdo con la Figura 1.15 b.

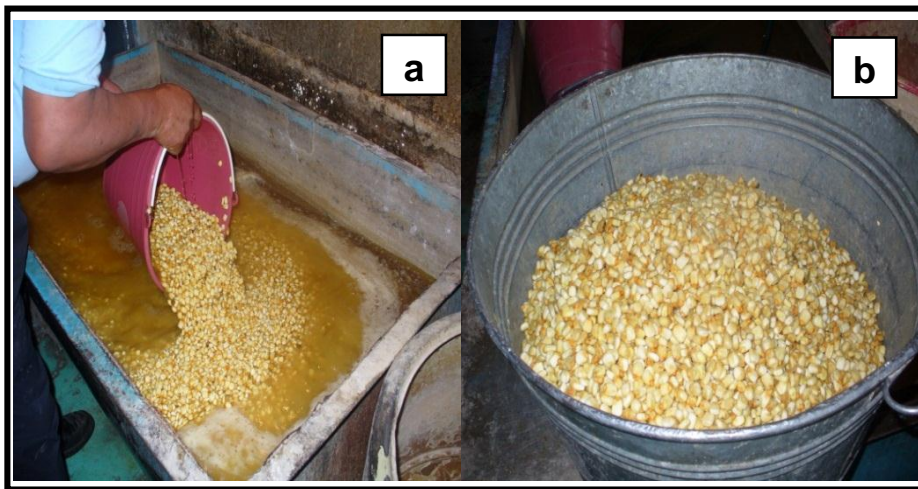


Figura 1.15 proceso de nixtamalización, a) cocción y reposo de maíz nixtamalizado b) nixtamal

Durante estas etapas está inmersa una combinación de fenómenos de transporte; transferencia de calor, de momentum y de masa (Gutiérrez-Cortez *et al.*, 2010).

El proceso continuo con una secuencia de operaciones unitarias para obtener un granulado que al hidratarse produce masa para elaborar tortillas. Las tortillas son un alimento básico de la dieta diaria en México, su consumo per-cápita es de 234 g diarios (Cornejo-Villegas *et al.*, 2010).

En la cocción y reposo de la nixtamalización ocurren cambios al cereal procesado por efecto del tiempo, la temperatura y la concentración de calcio utilizada. La

magnitud de las transformaciones dependerá de las condiciones de proceso establecidas (Fernández-Muñoz *et al.*, 2011).

1.9.1 Descripción del proceso de nixtamalización tradicional e industrial

El proceso de nixtamalización tradicional y obtención de nejayote se presenta en el diagrama de bloques en la Figura 1.16 y se describe etapa por etapa:

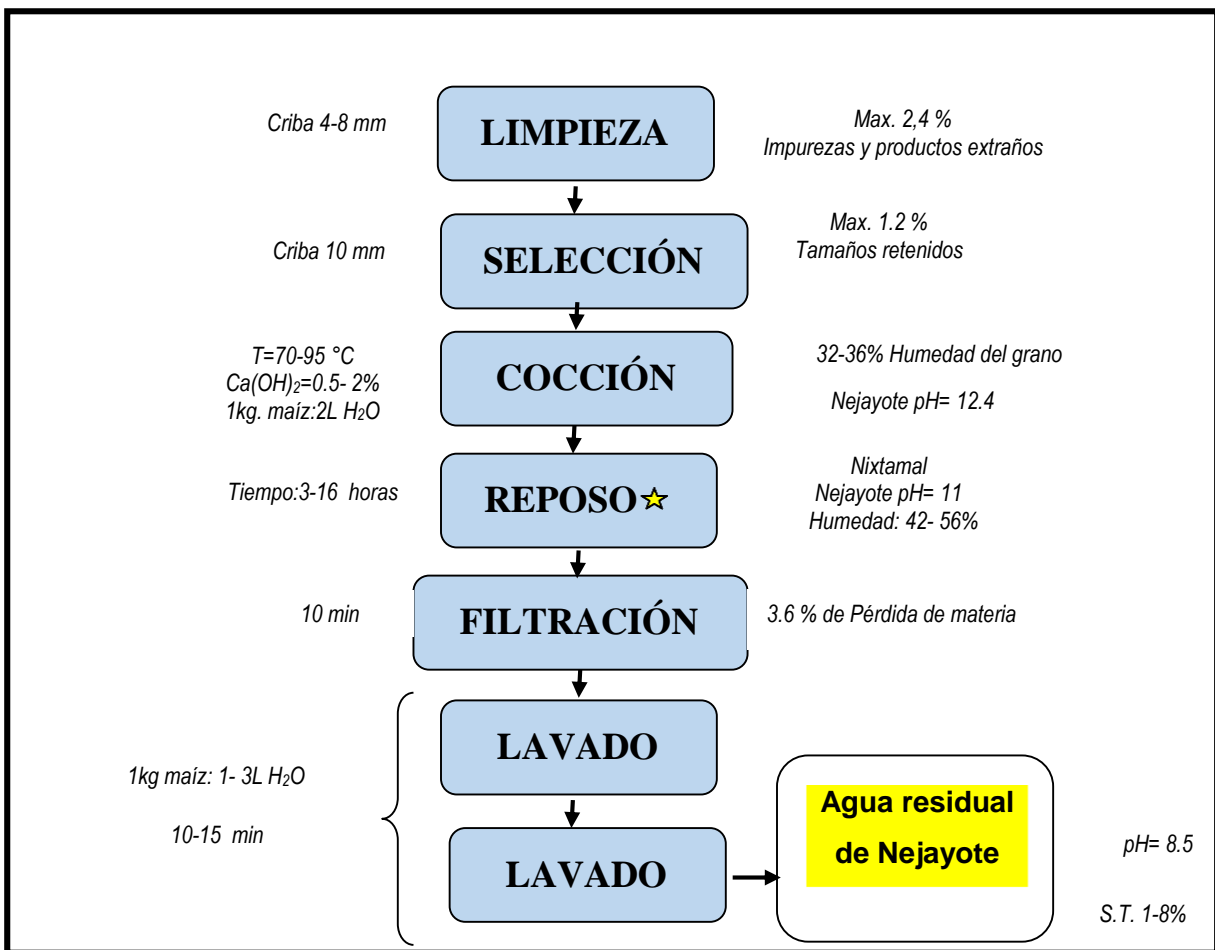


Figura 1. 16 Diagrama de bloques de nixtamalización industrial y de obtención de agua residual de nejayote

Limpieza: la limpieza de los granos de maíz se realiza haciéndolos pasar, a través de cribas móviles metálicas con aberturas de 4.0mm a 8.0mm de diámetro interno

para eliminar basura, productos extraños y fragmentos de granos. Después se continúa con una selección por tamaño, utilizando una criba de 10.0 mm, y los granos retenidos se recolectan.

Cocción: Los granos de maíz se exponen a tratamiento térmico-alcalino, con temperaturas que van desde 70 a 95 °C (en algunos lugares se realiza hasta temperatura de ebullición). Las características químicas de la solución alcalina durante la cocción deben ser tales que la concentración de cal en agua siempre exceda el punto de saturación del hidróxido de calcio. Las concentraciones empleadas durante el proceso son dentro del intervalo de 0.5 a 2.0 % con un pH inicial de 12.4.

El grano de maíz se considera cocido cuando el pericarpio se desprende con facilidad del grano frotándolo con los dedos del operario. Se suspende el calentamiento y concluye la etapa de cocción. En la industria se interrumpe el calentamiento cuando la humedad del grano fue de 32 % dado que su destino es elaboración de harinas. El pH residual del líquido de cocción (nejayote) es de 11. Durante la etapa de cocimiento el maíz se mezcla durante un periodo de 20 segundos cada 10 minutos, para homogenizar el líquido de cocimiento y los sólidos que tienden a sedimentarse (Trejo-González *et al.*, 1982). Las cantidades de maíz-agua son variables, pero generalmente por cada kg de maíz se utiliza un litro de agua y se vierten en el tanque de cocción junto con el hidróxido de calcio. El tiempo de cocción depende de las características del pericarpio de la variedad de maíz utilizada (Gutiérrez-Cortez *et al.*, 2010).

Reposo: En esta etapa, ya sin el calentamiento, se deja reposar el grano en su medio de cocción (nejayote), en el mismo tanque con la solución caliente, por un tiempo que puede variar desde 3-16 horas. Aquí ya no se mezcla el nejayote con los granos, la temperatura va descendiendo poco a poco. Al conjunto de granos hidratados y reposados se le conoce como nixtamal. La mayoría de los investigadores coinciden en que en esta etapa se promueven los principales

cambios al maíz, porque el agua y los iones de calcio han penetrado al interior del grano y hay una importante pérdida de estructuras como son el endospermo, el germen y el pericarpio (Fernández-Muñoz *et al.*, 2002). La humedad de los granos de maíz se establece en un rango de 54-56 % para la industria nixtamalera al concluir el reposo y para la industria harinera 36-42% (Salinas y Vázquez, 2003).

Drenado de nejayote: Esta etapa de eliminación del nejayote se realiza utilizando una criba de 2mm durante 10 minutos para eliminar el líquido sobrenadante o nejayote, que tiene un pH aproximado de 11 (Pflugfelder *et al.* 1988).

Lavado: Generalmente se realizan dos lavados con un volumen de agua que también es muy variable, y va a depender del lugar de donde se procese. Su función es eliminar el exceso de calcio y disminuir el pH del grano. El agua del último lavado deberá tener un pH aproximado de 8.5. La cantidad de agua regularmente utilizada va desde 2 litros por kg de maíz (ver Figura 1.17) (Gutiérrez-Cortez *et al.*, 2010).



Figura 1. 17 Aguas residuales de nejayote

1.9.2 Transformaciones fisicoquímicas durante la nixtamalización del maíz

Cada una de las estructuras mayoritarias del maíz es afectada de distinta forma, puesto que sus componentes químicos interactúan por mecanismos diferentes con el calcio: durante la cocción y el reposo en el pericarpio hay absorción de agua, suavizando y ablandando tejidos celulares, provocando el hinchamiento y por tanto un cambio de volumen del grano (Bakshi y Singh, 1980). Gutiérrez *et al.* (2010) reportaron que al principio del proceso de nixtamalización el pericarpio es impermeable a la solución alcalina y que se presentan cambios morfológicos y estructurales por la combinación de temperatura, solución alcalina y tiempo de reposo, lo que permite la entrada de agua y calcio a las estructuras del grano, ya que el pericarpio gobierna la difusión. El álcali actúa sobre los componentes de la pared celular modificándola y degradándola, a su vez cambia la permeabilidad del pericarpio. Cuando se degrada el pericarpio, primero se presenta la disolución de sólidos solubles como son las gomas de la capa más externa del pericarpio o pectinas, después las fracciones de hemicelulosa y lignina se desprenden, estos sólidos insolubles se depositan en el nejayote, modificando su viscosidad al formarse una suspensión, que con el tiempo sedimenta fracciones de calcio y de otros componentes del grano. Los grupos ácidos urónicos de la hemicelulosa son neutralizados por el hidróxido de calcio, se retiene calcio en forma de sales con el ácido poliurónico enlazado con grupos fenólicos derivados de la lignina, los cuales se oxidan en el medio básico, otorgándole un color no deseable a los productos tratados (González *et al.*, 2004). Al hincharse el grano y procesarse se afecta a la matriz fibrosa formada de hemicelulosa-lignina. Por último, hay una lixiviación parcial del pericarpio en el nejayote, líquido donde se llevó a cabo la cocción, por lo tanto, existe una pérdida importante de materia que incluye fracciones de componentes estructurales del maíz como son: pericarpio, germen, endospermo, fibra dietética, carotenoides y fósforo y calcio.

Las pérdidas de materia pueden variar de 1.08 hasta 6.55 % en peso en el grano, dependiendo de la temperatura de cocimiento del grano, de la concentración inicial de hidróxido de calcio, del tiempo en que reposa el grano en su solución, de la variedad de maíz y de la técnica de (Rojas-Molina *et al.*, 2009). Se ha reportado que el pericarpio es la estructura que retiene la mayor cantidad de calcio. Sin embargo, representa una fracción muy pequeña del total del grano. Una parte de esta estructura, junto con el calcio quedan en el nejayote durante la etapa de reposo. Durante la nixtamalización las proteínas de más bajo peso molecular, localizadas en el germen, alteran los patrones de solubilidad y parcialmente pasan una parte también al nejayote. Otro de los componentes del germen más susceptibles a sufrir transformaciones durante el proceso de nixtamalización y que al mismo tiempo fija calcio, son los lípidos. En un medio alcalino como en la nixtamalización ocurre la hidrólisis de las grasas a través del mecanismo conocido como saponificación, es decir la formación de sales de ácidos grasos y glicerina. Se ha reportado que el germen retiene cuatro veces más calcio que el endospermo, la razón calcio-fósforo se incrementa significativamente, lo cual favorece el valor nutricional de la tortilla y se acerca a la proporción de estos macro-elementos (Gutiérrez *et al.*, 2007). Así como el proceso de nixtamalización provoca importantes cambios fisicoquímicos al maíz que mejoran sus características nutrimentales y funcionales, también genera una cantidad considerable de desechos muy contaminantes o aguas residuales conocidos como nejayote. Este nejayote es un líquido muy contaminado, que forma costras en los recipientes donde es cocido y reposado el maíz. Dicho líquido es eliminado durante el drenado y es depositado en el drenaje local generalmente, por falta de una planta de tratamiento de aguas residuales de los molinos y las plantas procesadoras.

1.9.3 Nejayote líquido de la nixtamalización

Durante el proceso de nixtamalización, el maíz es cocido en una solución saturada de hidróxido de calcio. Posteriormente, se suspende el calentamiento y los granos permanecen en remojo en el mismo líquido por algunas horas en un intervalo de 3-12 horas, esta etapa se conoce como reposo de nixtamal (Fernández-Muñoz *et al.*, 2006). La etapa de cocimiento y reposo se realiza en recipientes que permiten la remoción del pericarpio, mediante la combinación de temperatura y tiempo. Fracciones de pericarpio se desprenden del grano y se depositan en el líquido de cocimiento, esto permite que se presente mayor difusión de agua y calcio al interior del maíz debido a que hay un gradiente de concentración de calcio, lo que promueve cambios fisicoquímicos en las estructuras internas del grano, las cuales son determinantes para que los gránulos de almidón localizados en el endospermo inicien la gelatinización (Gutiérrez-Cortez *et al.*, 2010). El calcio facilita la remoción del pericarpio, controla la actividad microbiana, disminuye la gelatinización de los gránulos de almidón, aumenta el valor nutrimental, imparte sabor y alarga la vida útil a la tortilla (Hallaver, 1987). En la Figura 1.18 se muestran las aguas residuales.



Figura 1.18 Aguas residuales de nejayote

Rojas-Molina *et al.* (2009) Reportaron que la cantidad de sólidos presentes en el nejayote dependen del tiempo de reposo y de la temperatura utilizada. Así mismo la pérdida de materia seca aumenta al aumentar la temperatura de proceso y la concentración de sólidos en el nejayote es mayor.

Pflugfelder *et al.* (1988) describió al nejayote como un agua de desecho altamente contaminante, la cual contiene altas concentraciones de sólidos solubles e insolubles, aproximadamente el 50% son sólidos insolubles, de los cuales el 64% son polisacáridos, 20% almidón y 1.4% de proteína. Adicionalmente, el nejayote tiene un alto contenido de cenizas de un 23.15%, dentro de los que destaca el calcio con un contenido de 7.13 a 13.06% en promedio de fracción de partes del grano de maíz; germen, endospermo y pericarpio (Velazco-Martínez *et al.*, 1997).

Rosentrater. (2006), explicó que se considera como un agua de desecho por que los efluentes generados durante el proceso de nixtamalización son potencialmente dañinos para el medio ambiente. Esto debido a su composición química y un pH altamente alcalino, su demanda química de oxígeno de 1670-21280 mgO₂/L, total de sólidos suspendidos de 2540mg/L, demanda biológica de oxígeno 190-7875mgO₂/L, y alcalinidad total de 180-3260 mg CaCO₃.

Niño-Medina *et al.* (2009) Reportó que en una nixtamalización tradicional, para procesar 50 kg de maíz se requieren 75 litros de agua, lo cual genera una cantidad equivalente de agua contaminada, mientras que Salmerón-Alcocer *et al.* (2003) calcularon que para 600 ton de maíz/día, la cual es la capacidad de una planta, se generan de 1500 a 2000 m³ de nejayote.

1.10 Principales aplicaciones del nejayote

La intención de usar el nejayote se reporta desde hace más de dos décadas. Velasco-Martínez *et al.* (1997) utilizaron los sólidos del extracto, obtenidos por sedimentación-centrifugación, en combinación con soya y sorgo como base de la alimentación de ganado avícola. Esto con la finalidad de evaluar el crecimiento de

los animales durante siete semanas, para lo cual se les suministraron 3,200 kcal·kg⁻¹ con base en formulaciones de diferentes proporciones de sólidos (2, 4 y 6 %, más un alimento comercial como control).

Velasco-Martínez *et al.* (1997) reportaron que el ganado que consumió el alimento comercial pesó en promedio 2.686 kg; mientras que el que se alimentó con las formulaciones pesó 2.696, 2.595 y 2.835 kg, respectivamente. Lo anterior demostró que la proteína y el calcio proporcionados por los sólidos juegan un papel importante en la nutrición, crecimiento y desarrollo del ganado. De igual manera, se reportó que los animales no tuvieron cambios físicos, ni la mortalidad se vio afectada en el periodo de tratamiento. El estudio deja evidencia de que los sólidos pueden ser utilizados como forraje en la alimentación de este tipo de ganado con beneficios no sólo ambientales sino de rendimiento debido a la ganancia de peso de los animales durante la crianza.

Ramírez-Romero (2009) Preocupado por el excesivo volumen y de la cantidad de agua residual, ha reciclado el nejayote para volver a nixtamalizar con él. Un primer ejercicio para dar tratamiento al nejayote fue sedimentarlo para separar la parte de sólidos formada por almidones, proteína, el excedente de cal y la cubierta del grano, e introducirla en la molienda. El análisis sensorial de las tortillas obtenidas con esa masa fue bueno, no cambió su sabor, aumentó el rendimiento de la masa.

Acosta-Estrada *et al.* (2014) emplearon los sólidos contenidos en el efluente (11.68 g·L⁻¹) y gluten de trigo (relación 4:1) para elaborar productos de panificación. Observaron que las características sensoriales y nutritivas mejoraron en comparación con el pan sin aditivo. Lo anterior sugiere que los sólidos del nejayote pueden incorporarse al pan sin afectar su aceptabilidad y añadiendo una fuente importante de fibra dietética, calcio y antioxidantes. En este sentido, es relevante el uso de los sólidos como aditivo en la industria alimentaria; no sólo en la panificación, sino en productos que deseen elevar su contenido en fibra. En medicina pueden

ayudar a reducir enfermedades cardiovasculares y prevenir varios tipos de cáncer gracias a la capacidad antioxidante del ácido ferúlico (Abbas *et al.*, 2014).

Sánchez-González *et al.* (2011) aislaron dos microorganismos del nejayote (NJY2 y NJY4), mismos que por su morfología y características fisiológicas resultaron ser una especie de *Bacillus*. Al comparar su genoma con varias especies tuvieron similitud de casi 100 % con *Bacillus flexus*, microorganismos alcalófilos facultativos y halotolerantes. Posteriormente, estudiaron la cepa NJY2 y encontraron que poseía capacidad xilanolítica, ya que al secuenciar 10 familias de glicohidrolasas se identificaron enzimas endo-1,4- β -xilanasas, y esterases; estas últimas sólo actuaban a pH por arriba de la neutralidad, específicamente en el ácido ferúlico o algunos otros ésteres. Además, determinaron que el calcio proveniente del proceso de nixtamalización aumentaba la producción de esterases cepa NJY2.

Tanto la endo-1,4- β -xilanasas como la esterasa son importantes en la industria del papel ya que en conjunto remueven hasta 95 % de la lignina de la madera, lo que provee las características físicas finales al papel. Asimismo, en la industria alimentaria participan en la clarificación de jugos y vinos (Ponce-Noyola y Pérez-Avalos, 2002), en la obtención de saborizantes (vainillina) a partir del ácido ferúlico (Sánchez-González *et al.*, 2011), mejoran textura y sabor de productos de pan (Ponce-Noyola y Pérez-Avalos, 2002).

Blanco-Gámez *et al.* (2008) aislaron y caracterizaron bacterias de un medio de cultivo compuesto de nejayote. Demostraron que los microorganismos presentes eran bacilos gram positivos y tenían actividad catalítica. Aunado a ello, los resultados mostraron que las bacterias aisladas eran de 96 a 99 % similares a *Bacillus megaterium*; la cual es de importancia farmacéutica debido a que es productora de la enzima penicilina G acilasa con capacidad biocatalizadora en la producción de β -lactámicos semisintéticos (Nucci, *et al.*, 2005). Éstos son utilizados como antibióticos para eliminar bacterias gram positivas, interfiriendo con los peptidoglucanos que forman la pared celular y provocando la inhibición de la

biosíntesis de la misma (Voet y Voet, 2006; Tortora-Gerard *et al.*, 2007); combatiendo así diversas infecciones. Además, los costos generados por el insumo, en la implementación sintética, podrían minimizarse al utilizar nejayote.

Ramírez-Romero *et al.* (2013) emplearon nejayote de tres diferentes molinos de maíz como medio de cultivo de bacterias ácido lácticas (*Lactobacillus rhamnosus*, *Lactobacillus casei* y *Lactobacillus helveticus*) para generar probióticos con producción de bacteriocinas. Fermentaron 50 mL del sobrenadante de cada extracto durante 48 h a 37 °C. Evaluaron la actividad bactericida con *Echerichia coli* y *Listeria innocua*; las cuales se cultivaron individualmente en el sobrenadante de la fermentación por 3 h, 37 °C y 150 rpm. Observaron que las cepas crecieron principalmente en nejayote con azúcares reductores, proteína y carbohidratos (1.12, 17.6 y 81.25 %, respectivamente). La bacteria con mayor inhibición *ante E. coli* (10 %) y *L. innocua* (13 %) fue *L. helveticus*, lo que atribuyeron a las bacteriocinas desarrolladas en las cepas. Con ello, el estudio generó una alternativa de uso del nejayote como medio de crecimiento y desarrollo de microorganismos con capacidad biológica como barrera antimicrobiana a nivel tracto digestivo.

González *et al.* (2003) utilizaron el nejayote como medio aglutinante para formar aglomerados de carbón negro (CB). Analizaron las propiedades que presentaba el CB usando el efluente y otros aditivos (agua, alcohol furfuril [FA] y lignosulfonato de potasio [LSP]). Sus resultados mostraron que los pellets de nejayote tienen resistencia al agrietamiento similar a los generados con aditivos comerciales, además de conductividad eléctrica superior a los pellets fabricados con FA y muy similar a los de LSP. Lo anterior demuestra que a pesar de ser un material de desecho, el nejayote puede utilizarse como aglutinante no solo del CB, sino también de otros materiales con aplicaciones en industrias de cableado o aislantes. En este sentido, su uso como insumo representa una aplicación interesante en la industria de polímeros.

Ayala-Soto *et al.*, (2014) evaluaron el contenido de ácidos hidroxinámicos, composición de azúcares y capacidad antioxidante de los AX al ser extraídos del maíz: grano completo, pericarpio de dos tipos de maíz (resistente y susceptible a plagas) y nejayote. El mayor rendimiento de AX fue con el grano completo (20.9 %), con 2 % más que el nejayote. Con respecto al contenido de azúcares, el nejayote mostró concentración mayor de glucosa y galactosa (3.79 y 4.97 g·100 g⁻¹ AX, respectivamente). El pericarpio de maíz resistente presentó mayor contenido total de polifenoles (350 mg GAE·100 g⁻¹), 42 % más que el nejayote, concentración de ácidos hidroxicinámicos identificados (1.89 µg·mg⁻¹ AX) y capacidad antioxidante (6 mM TE·100 g⁻¹); este último 50 % superior al nejayote. Lo anterior indica una relación directa entre estos compuestos.

La investigación anterior muestra el potencial que tiene el desecho, ya que diversas fuentes de AX son utilizadas para la elaboración de productos alimenticios a base de maíz. Sin embargo, el nejayote resulta ser un subproducto no valorado, sin tratamiento y sin valor comercial aparente. No obstante, los componentes fenólicos se consideran sustancias de valor agregado alto y parte de la fibra dietética, además son valorados por su propiedad prebiótica y su participación como inmunomoduladores ante enfermedades degenerativas como el cáncer (Mendis y Simsek, 2014).

Ferreira-Rolón *et al.* (2014) emplearon un reactor UASB de 1.9 L para tratar el agua residual proveniente de distintos molinos de maíz con el fin de producir metano a través de siete etapas. La mezcla se sometió a una sedimentación mecánica para retirar más de 50 % de sólidos iniciales; posteriormente se generaron dos sistemas para evaluar el efecto de burbujeo (CO₂) en la precipitación del carbonato de calcio (propio del proceso de nixtamalización). El primero fue mediante el burbujeo directo en el sobrenadante obtenido de la sedimentación, y el segundo fue con el burbujeo en una mezcla de sobrenadante con lodos residuales (provenientes de una industria de alimentos), los cuales contenían 28.8 g de sólidos volátiles por litro.

En ambos sistemas, la mayor eficiencia se mostró a los 35 min de burbujeo, siendo 15 % mayor el de lodos residuales (52.3 % de eficiencia). Posteriormente, los extractos se pasaron al reactor para la degradación anaerobia con lodos residuales (relación 1:0.4 v/v); en donde las primeras cuatro etapas del proceso, la alimentación se ajustó a diferentes cargas orgánicas volumétricas (COV) (1.8, 2.7, 1.5 y 0.9 g DQO·L⁻¹·d⁻¹, respectivamente). En las últimas tres etapas el reactor se alimentó con el sobrenadante de nejayote. La generación de metano en cada etapa fue diferente (1.54, 3.42, <1.05, 1.25, 1.96, >1.52 y >1.52 L·L⁻¹·d⁻¹, respectivamente), dependiendo directamente de la COV inicial.

Finalmente, el proceso logró la remoción de más de 90 % de la materia orgánica total, mostrando que cuando el nejayote se somete a un burbujeo previo con CO₂ hasta 90 % del biogás producido es metanol. Con base en lo anterior, Ferreira-Rolón *et al.* (2014) proponen un sistema a escala que trate 3 m³ de nejayote por día, el cual promete 50 % de recuperación de sólidos y sedimentación del calcio, así como la generación de metano del 90 % del biogás total.

Ante los resultados, los últimos dos estudios exhiben utilidad para las empresas que pueden aprovechar los subproductos generados por el tratamiento, cuyos beneficios pueden ser: 1) tratamiento al residuo mediante la disposición del efluente y 2) remuneración por la generación de productos de uso potencial.

Carvajal-Millán *et al.*, (2005) patentaron la obtención de goma de maíz a partir del residuo de la nixtamalización. El proceso consta de ocho etapas generales: 1) obtención del nejayote, 2) filtración del extracto, 3) centrifugación del filtrado, 4) acidificación del sobrenadante, 5) precipitación por reposo, 6) filtración de la goma, 7) lavado de la goma y 8) secado de la goma. La investigación sugiere el uso del residuo dentro de las 4 h después de realizado el proceso de nixtamalización. Con base en esta metodología, Niño-Medina *et al.*, (2007) caracterizaron goma obtenida a partir del efluente alcalino. De acuerdo con el estudio, obtuvieron AX con 75 % de pureza (p/p); de los cuales, 47 % se identificó como xilosa y 28 % como arabinosa.

Debido a la capacidad gelificante de los AX, la formación de gel se realizó con la enzima lacasa al 4 % (p/v). En los resultados calificaron a la goma obtenida como material potencial en la industria alimentaria.

González *et al.* (2003) utilizaron el nejayote como medio aglutinante para formar aglomerados de carbón negro (CB). Analizaron las propiedades que presentaba el CB usando el efluente y otros aditivos (agua, alcohol furfuril [FA] y lignosulfonato de potasio [LSP]). Sus resultados mostraron que los pellets de nejayote tienen resistencia al agrietamiento similar a los generados con aditivos comerciales, además de conductividad eléctrica superior a los pellets fabricados con FA y muy similar a los de LSP. Lo anterior demuestra que a pesar de ser un material de desecho, el nejayote puede utilizarse como aglutinante no solo del CB, sino también de otros materiales con aplicaciones en industrias de cableado o aislantes. En este sentido, su uso como insumo representa una aplicación interesante en la industria de polímeros.

Por otro lado, Valderrama-Bravo *et al.* (2012, 2013) Trabajaron con una celda de filtración a presión, a diferentes condiciones experimentales para separar los sólidos de nejayote utilizando tierra diatomea como coadyuvante de la filtración. Ellos redujeron la concentración de sólidos totales, la turbidez y la demanda biológica de oxígeno, entre otros, lo cual se presenta en la tabla 1.

Tabla 1. 1 . Composición fisicoquímica del nejayote

Contenido	Nejayote	Nejayote filtrado
Sólidos totales (%)	2.28±0.18	1.12±0.11
Humedad (%)	97.72±0.26	98.09±0.21
pH	11.39±0.49	10.53±0.32
Densidad (kg/m ³)	1003.54±2.45	991.01±1.91
Viscosidad (Pa s)	0.002301±4.3E-05	0.002097±5.2E-05
Lípidos (%)	0.008±0.002	0.007±0.003
Cenizas (%)	0.767±0.014	0.3345±0.0182
Proteína cruda (%)	0.113±0.007	0.112±0.027
Fibra (%)	0.581±0.013	0.271±0.014
Carbohidratos (%)	0.862±0.016	0.379±0.031
Calcio (mg/L)	1526.21±26.53	712.40±11.53
Conductividad eléctrica (µS/cm)	4510.12±14.14	4030.23±11.10
DBO (mg/L)*	14218.75±309.36	6212.25±123.74
DQO (mgO ₂ /L)**	40058.14±82.22	21783.68±115.35
Dureza (mg/L)	5768.67±0.46	3847.48±15.20
Sólidos sedimentados (µL/L)	>100,000	<100
Sólidos totales suspendidos (mg/L)	8342.5±25.3	140.6±8.7
Turbidez (NTU)	963.3±6.6	5.8±0.2

Fuente: Valderrama-Bravo et al. (2012)

*DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno)

** DQO (Demanda Química de Oxígeno)

En realidad, son muy pocas las propuestas de realizar tratamiento de nejayote para recuperar el agua y los sólidos.

Buscando alternativas de tratamiento del desecho de nixtamal, se ha recurrido a la filtración a presión, en un filtro de lechos empacados, el cual ofrece un alto rendimiento en cuanto a la retención de los sólidos y por medio de diferentes combinaciones de medios filtrantes se llegara a la mejor combinación en cuanto a filtrado se refiere, para así evitar la contaminación de efluentes de agua y aprovechar a su máximo los sólidos, el agua filtrada y los medios que se utilizan en otros procesos de purificación de agua .

Por otro lado, la industria molinero tortillera tira al drenaje todo el desecho, porque no cuenta con plantas de tratamiento de agua. Por lo que se generan al rededor 250 toneladas de sólidos de maíz, esto equivale a la basura diaria de 4 millones de personas, además de 32 toneladas de cal y 10,000 m³ de agua caliente. Esto representa una problemática importante, ya que el proceso tradicional de nixtamalización es de mayor escala que el proceso industrial y en nuestros días la regulación del tratamiento de nejayote se aplica únicamente para la industria harinera (Valderrama-Bravo *et al.*, 2012).



2 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Para resolver el problema en este trabajo: Separación de sólidos insolubles de agua residuales de nejayote por filtración en lechos empacados. Se planteó un objetivo general y tres objetivos particulares.

Objetivo general:

Evaluar la influencia de la presión hidrostática y de la combinación de arreglo de camas con y sin carbón activado en un filtro de lechos empacados para establecer las mejores condiciones de separación de sólidos insolubles de aguas residuales de nejayote.

Objetivos particulares:

- 1- Analizar la influencia de la combinación de camas arena-tezontle y arena-tezontle-carbón activado en la velocidad de filtración en el lecho empacado, mediante la filtración de aguas residuales de nejayote, para diferenciar el arreglo que elimina el aroma, color, cantidad de sólidos del filtrado, turbidez, y concentración de calcio.
- 2- Determinar la influencia de la presión hidrostática en la velocidad de filtración, mediante la modificación de la altura de las aguas residuales de nejayote en el tanque de alimentación, para establecer la eficiencia de separación del filtrado.
- 3- Evidenciar la presencia de sólidos del filtrado y la morfología de los filtrado de las aguas residuales de nejayote obtenido a diferentes condiciones experimentales por microscopio electrónico de barrido para hacer un análisis comparativo de los componentes presentes en una micrografía de nejayote filtrado.



En la Figura 2.1 se presenta el cuadro metodológico. Este tiene la función de proyectar el trabajo conjunto desarrollado en esta tesis. El cual también se presenta como una guía de la forma en que se ejecutaron cada una de las actividades. Ahí se Mencionan las actividades preliminares como la caracterización de las aguas residuales de nejayote, la elaboración de esferas de carbón activado con sólidos insolubles de nopal.

A su vez muestra los niveles de variación, en los que se trabajaron cada una de las variables de estudio, relaciones existentes entre ellas y las actividades necesarias para el cumplimiento de los objetivos.

En el cuadro también se describen las evaluaciones que se hicieron a los filtrados con diferentes instrumentos, dentro de los que se destaca el turbidímetro, el potenciómetro, el colorímetro.

Así mismo se menciona el análisis estadístico mediante un factorial 2x2 para la presión hidrostática y el arreglo de camas en el filtro de lechos empacados. Adicionalmente, se presentan los métodos de evaluación utilizados para cada una de las corridas experimentales a diferentes condiciones de proceso.

Indica además las pruebas de morfología mediante microscopia electrónica de barrido trabajado al alto vacío, para evidenciar las sales de calcio presentes y la determinación de calcio en el clarificado obtenido a condiciones óptimas por espectroscopia de absorción atómica para comprobar la concentración en cada uno de los filtrados.

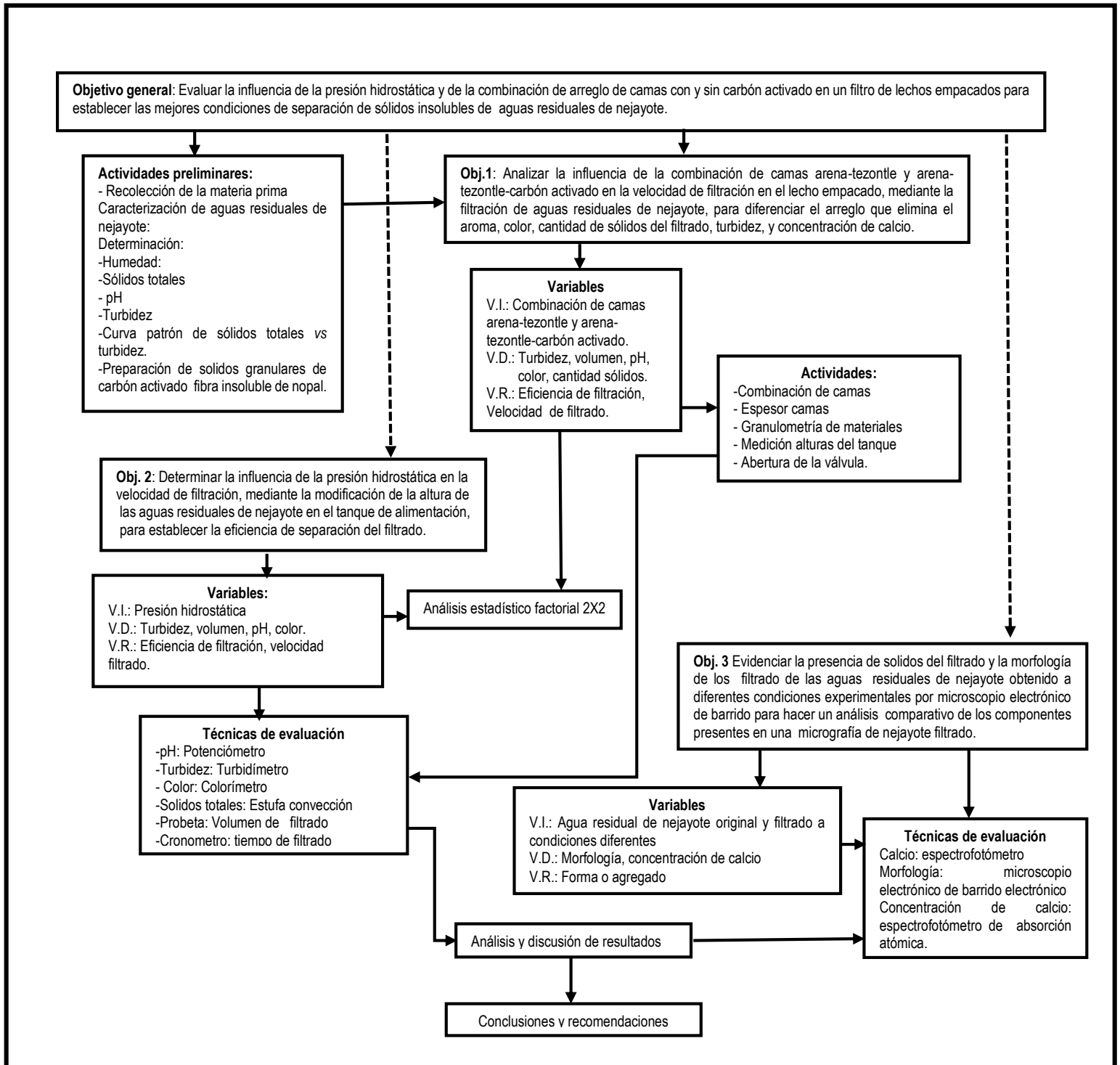


Figura 2. 1 Cuadro metodológico del desarrollo experimental



2.1 Desarrollo experimental

Las actividades experimentales desarrolladas en el trabajo se muestran en el cuadro metodológico, en resumen. Posteriormente, se describen a detalle en texto. El cuadro metodológico mostrado en la Figura 2.1 es una guía para la ejecución de la parte experimental.

2.2 Descripción de actividades preliminares:

Las actividades preliminares que se realizaron fueron la recolección de la materia prima (aguas residuales de nejayote), su caracterización fisicoquímica, curva patrón de sólidos totales vs turbidez y elaboración de esferas de carbón activado

2.2.1 Recolección de aguas residuales de nejayote.

Se recolectó todo el volumen de aguas residuales de nejayote de un solo día en una tortillería como muestra la Figura 2.2 a y b. Se trasladaron a la FES Cuautitlán



Figura 2.2 recolección de agua residual de nejayote a) en la tortillería b) en el LEM-alimentos.



Las aguas residuales de nejayote corresponden a él nejayote, más el agua del primer y segundo lavado.

2.2.2 elaboración de esferas de carbón activado

Se realizaron esferas mediante sólidos insolubles de nopal de y estas fueron saturadas de carbón activado de tamaño promedio de 3 milímetros con una relación 1:1 y se adicionó por cada kilogramo, 150 mililitros de agua, después se mezclaron por 30 minutos, como muestra la Figura 2.3, se hicieron las esferas, se secaron y estas que se retuvieron en un tamiz de 6 serie USA para utilizarlas en el filtro de lechos empacados.



Figura 2.3 mezclado de sólidos insolubles de nopal y carbón activado

2.2.3 Turbidez de agua residual *nejayote*

Para llevar a cabo la técnica fue necesario diluir el agua residual de nejayote debido a que el equipo utilizado es de una escala hasta de 40 NTU. Para lo cual se prepararon la diluciones del producto para que el equipo pueda dar las lecturas, en



un matraz volumétrico de 100 mililitros, se mezclan 5 mililitros, de la suspensión de agua residual nejayote y se aforan con agua potable en un matraz de bola. Este procedimiento se realizó por triplicado y se tomaron las lecturas en un Turbidímetro marca Hanna Instruments- modelo LP 2000 con 10 mililitros de la suspensión.



Figura 2.4 Determinación de turbidez de agua residual de nejayote diluido

Se realizó la medición de turbidez a las diferentes diluciones realizadas para la determinación de sólidos totales en un turbidímetro. Primero se realizó la lectura al agua potable, para 10 mililitros, de agua con el fin de conocer el valor de turbidez. Posteriormente, se tomó lectura a todas las diluciones: Se conectó el equipo, luego se mezcló la muestra problema y se llenó la cubeta del turbidímetro con 10 mililitros como muestra la Figura 2.4. El equipo se encendió y se tomó la lectura en la pantalla del equipo. Con las lecturas de turbidez de soluciones a diferentes concentraciones se elaboró la curva patrón turbidez vs concentración, graficando en el eje de las x la concentración y en el de las y la turbidez.



2.2.4 Determinación de pH

Procedimiento

Se calibró el potenciómetro con las soluciones reguladoras de pH 4, pH 7 y pH 10 para estandarizar las mediciones, de acuerdo a la Figura 2.5.

Se tomó una porción de la muestra de agua residual de nejayote, se mezcló perfectamente por medio de un agitador de vidrio a una temperatura ambiente. Se sumergió el electrodo en la muestra de manera que los cubrió perfectamente, se realizó la medición de pH. Se saca el electrodo y se lava con agua destilada.



Figura 2.5 Determinación de pH

2.2.5 Determinación de contenido de humedad método de estufa (AOAC, Método 925.10) y sólidos totales de las aguas residuales de nejayote.

Para llevar a cabo la prueba se colocan charolas de aluminio durante una hora en la estufa de convección Marca BG Didacta Italia modelo E102 a la temperatura de secado del producto a 90 °C hasta que estuvieran a peso constante. Utilizando pinzas, se trasladaron las charolas a un desecador y se dejaron enfriar durante 30 a 45 min (ver Figura 2.6 a). Posteriormente, se pesaron las charolas con una



aproximación de 0.1 mg y se registró como (m_1). Enseguida se colocaron en la charola 5g de nejayote, registrando como (m_2) (ver Figura 2.5 b) y se introdujeron en la estufa a la temperatura y tiempo recomendado (90 °C por 5 horas). Estas charolas permanecieron en la estufa hasta que ya no cambio su peso. Posteriormente, se dejaron enfriar en desecador y se pesaron para realizar los cálculos correspondientes.

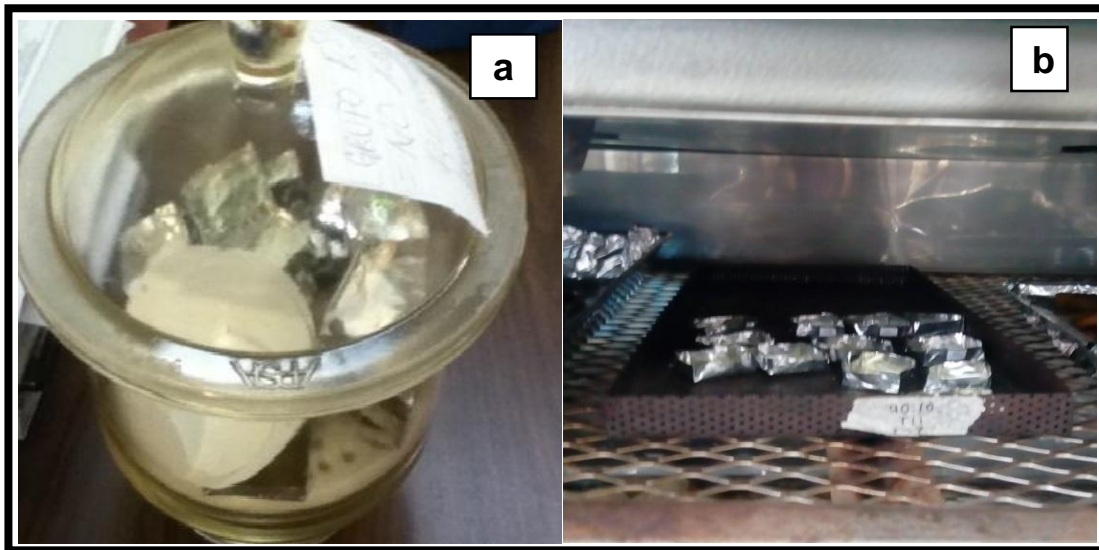


Figura 2.6 Determinación de humedad a) Charolas de aluminio a peso constante. b) charolas con agua residual de nejayote.

Por último, se repite el procedimiento de secado a la muestra por una hora adicional, hasta que las variaciones entre dos pesadas sucesivas no excedan de 5 miligramos (peso constante) y esta se registra como (m_3). Para determinar la humedad se utilizó la ecuación 2.1, donde la humedad del producto expresada en porcentaje es

$$Humedad = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} (100 \%)$$

(ec. 2.1)

Donde:



m_1 = masa de la charola vacía, en gramos.

m_2 = masa de la charola con muestra antes del secado, en gramos.

m_3 = masa de la charola con la muestra desecada, en gramos.

El contenido de sólidos totales se obtiene mediante la diferencia del total 100%, menos la humedad.

$$\text{Contenido de sólidos totales} = 100 - \text{Humedad}$$

(ec. 2.2)

2.2.6 Metodología para la curva patrón de turbidez y pH de aguas residuales

La Figura 2.7 mostró las actividades para conocer el contenido de sólidos totales de nejayote y de agua residual de nejayote.

Se realizaron diferentes diluciones de agua residual de nejayote como se muestra en la figura 2.7 (a) para determinar el contenido de sólidos totales de cada una de ellas y elaborar una curva patrón. Posteriormente, las diluciones se colocaron en las charolas (Ver Fig. 2.7 b) y se introdujeron a la estufa (Ver Figura. 2.7c).

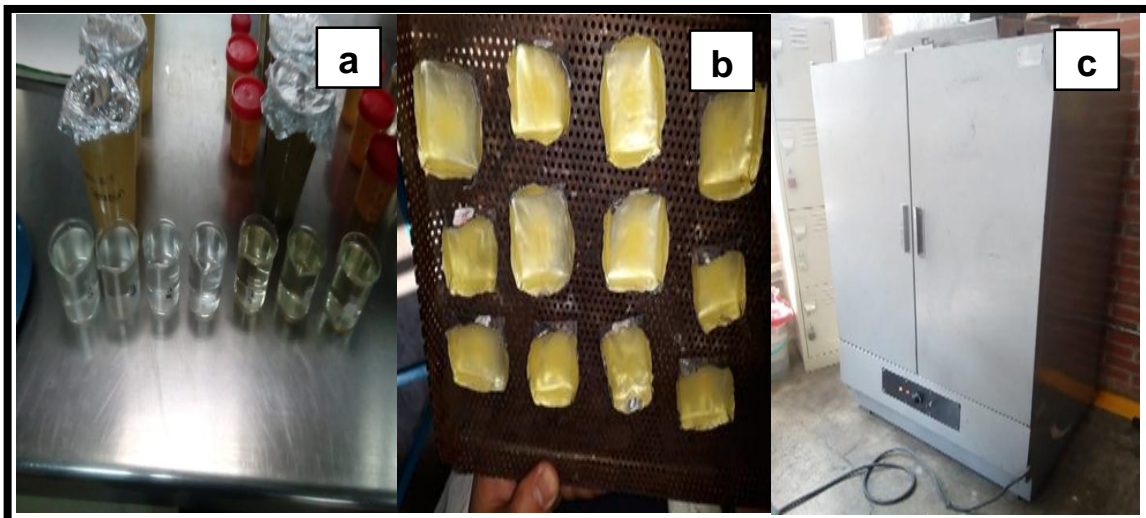


Figura 2.7 Contenido de sólidos totales, a) diluciones de agua residual nejayote, b) Charolas para la determinación de humedad, c) estufa de convección.



Se siguió el mismo procedimiento para obtener los sólidos totales y en base a estos datos se elaboró una curva patrón que sirvió para encontrar los sólidos totales de todas las muestras. Se hicieron diferentes diluciones, se prepararon con 250 mililitros de agua residual de nejayote, un matraz de bola y diferentes pipetas volumétricas (Ver Figura 2.8 a y 2.8 b). Una vez colocado dentro del matraz de bola de 100 mililitros, se agregó agua potable (el agua potable previamente se almacenó en un tanque de 40 litros para todas las determinaciones). Se aforó y se tomaron 5 g en tres charolas (repeticiones) para deshidratar. Esto se realizó por triplicado Se obtuvo la humedad y finalmente los sólidos totales. Los datos fueron vaciados a una tabla y se calculó la desviación estándar de las tres repeticiones realizadas por cada dilución obtenida. Los resultados de sólidos totales se utilizaron para elaborar una curva patrón, donde se graficaron concentración de sólidos totales vs diluciones.

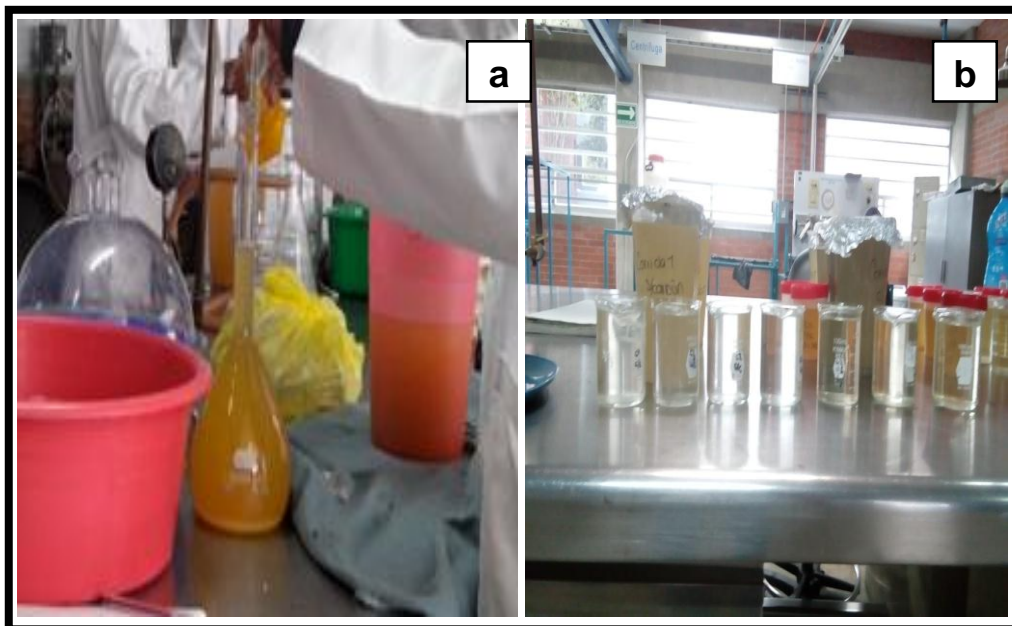


Figura 2.8 Preparación de diluciones, a) Matraz de bola con agua residual de nejayote. b) Diluciones de agua Residual de nejayote



2.3 Actividades objetivo 1 y 2

2.3.1 determinación de presión hidrostática

2.3.1.1 Determinación densidad

En la Figura 2.9 se presenta la determinación de la densidad. Se tomaron tres probetas de 10 mililitros limpias y secas, previamente puestas a peso cte. (Ver Fig. 2.9 a). Se llenaron las probetas con 10 mililitros de agua residual de nejayote el cual es el volumen utilizado (ver Fig.2.9 b), se pesaron en una balanza analítica (ver Fig. 2.9 c). Se determinó la masa y se obtuvo la densidad con la ecuación 2.3.

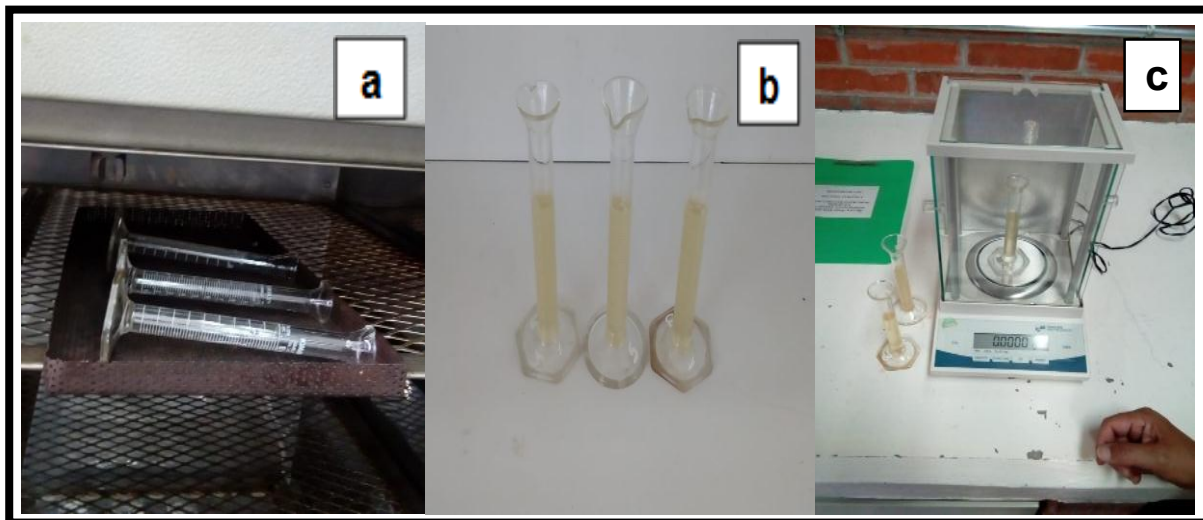


Figura 2.9 Determinación de densidad a) peso contante dentro de la estufa b) medición del volumen c) determinación del peso de la muestra de agua residual de nejayote

$$\rho = m/v$$

(ec 2.3)

Donde:

ρ = densidad de agua residual de nejayote

m= masa de agua residual de nejayote

v= volumen de agua residual de nejayote



2.3.1.2 Determinación de alturas del tanque

Se determinaron las alturas de llenado del tanque, que se encuentra en la parte superior de la estructura del filtro de lechos empacados, para ver con cuál ejercía mayor presión hidrostática y así obtener una mayor velocidad en la obtención del filtrado se seleccionaron 2 alturas en la figura 2.10 se muestra la toma de alturas



Figura 2.10 Medición de alturas en el tanque del filtro de lechos empacados

2.3.1.3 determinaciones de la presión hidrostática

Una vez teniendo el dato de la densidad y de altura se determinó, la presión hidrostática con la ecuación 2.4

$$P = \rho \times g \times h$$

(ec 2.4).

Donde

p = presión hidrostática (pas)

ρ = densidad de agua residual de nejayote sin filtrar (g/mL)

g = gravedad (m/s²)

h = altura del líquido en el tanque



2.3.2 Determinación y selección del tamaño de partícula de los materiales

Para llevar a cabo el cumplimiento del objetivo; se procedió a realizar un acondicionamiento de materiales. Se establecieron las granulometrías que se utilizaron en el filtro de lechos empacados, ordenadas decrecientemente en base a su tamaño, con los número de malla de 6, 8, 10 Serie USA para arena y 6 para carbón activado y tezontle en la Figura 2.11 se observa la selección de tamaños para cada uno de los materiales por medio de tamices



Figura 2.11 selección de tamaño, a) lavado de materiales, b) secado de materiales c) tamizado

2.3.3 Configuración de arreglos dentro del lecho empacado

Se realizó la combinación de los arreglos que se utilizaron en las camas de los lechos empacados durante la filtración de aguas residuales del nejayote. Los materiales fueron colocados en dos diferentes combinaciones, arena-tezontle y arena-tezontle-carbón activado. Cada cama fue de 9 cm de espesor. En la Figura 2.12 se muestra el llenado de los materiales dentro de los lechos empacados. Las arenas más finas se colocaron en la parte inferior, después de la placa perforada, y los posteriores materiales fueron de manera creciente en tamaño de partícula. El carbón activado se acomodó en la parte superior de las camas, para dar tiempo a



que este accionará sobre las aguas residuales del nejayote y realice la función de quitar color y aroma.



Figura 2.12 materiales dentro del lecho empacado.

2.3.4 Determinación de velocidad de filtrado durante la filtración para cada corrida con diferente arreglo de camas y diferente presión

Una vez montado el lecho empacado e introducidos los materiales se inició la operación a las condiciones de trabajo seleccionadas. La altura del tanque de alimentación fue variable dependiendo de la corrida, y el flujo se reguló mediante la



válvula de alimentación trabajada a dos niveles, permaneció $\frac{1}{4}$ de abertura de la válvula abierta y $\frac{1}{2}$ abierta. Se establecieron los volúmenes de filtrado y se determinaron los tiempos, para así poder determinar la velocidad de filtración como se muestra en la figura 2.13.



Figura 2.13 Filtro de lechos empacados en operación



2.3.5 Determinación de la turbidez, pH, sólidos totales para cada uno de los filtrados obtenidos

Se obtuvieron las determinación de turbidez por el método descrito en el punto 2.2.3, y mediante la curva patrón (gráfica) se obtuvieron sólidos totales y el pH, de los los filtrados

2.3.6 Determinación de color en filtrados de aguas residuales de nejayote

Se midió el color del filtrado de agua residual de nejayote en el colorímetro marca minolta (Figura 2.14 a y 2.14 b), utilizando el dispositivo. El dispositivo se llenó (Figura 2.14 c) y se colocó el lente a continuación se realizó la lectura con el brazo para obtener los valores de las coordenadas de color CIE L^* a^* b^* (Donde: L^* representa la diferencia entre la luminosidad ($L^*=100$) y la oscuridad ($L^*=0$); a^* representa la diferencia entre verde (-100) y rojo (+100); b^* representa la diferencia entre azul (-100) y amarillo (+100)); utilizando un ángulo de observador de 2° y un iluminante C (Konica Minolta, 2014).

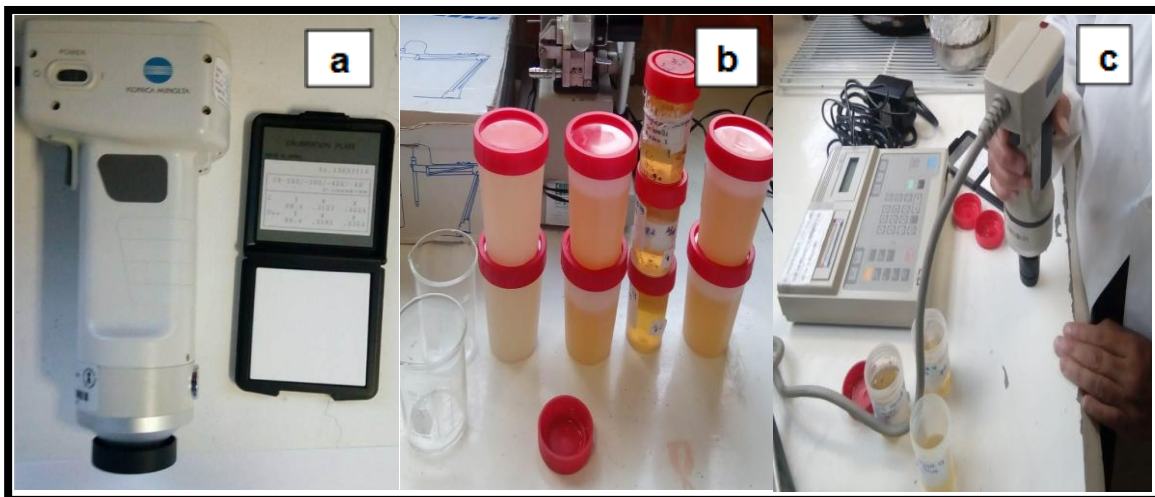


Figura 2. 14 Determinación color en filtrado de agua residual de nejayote; a) Colorímetro Minolta Modelo CR300; b) Preparación de las muestras; c) Llenado con agua residual de nejayote del dispositivo obscuro, Colocación del lente.



Los resultados obtenidos para los valores L^* a^* b^* se pueden revisar en el círculo de color mostrado en la Figura 2.15.

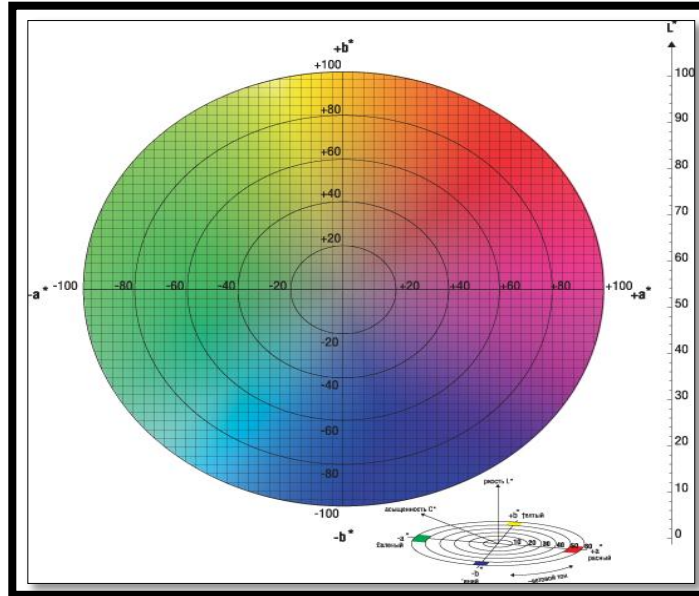


Figura 2. 15 Círculo de color L^* a^* b^* . Konica Minolta, (2014)

2.3.7 determinaciones de eficiencia de separación para cada una de las corridas experimentales.

Se determinó la eficiencia de cada corrida experimental mediante la ecuación 2.5

$$\text{Eficiencia} = \frac{T_{arn} - T_f}{T_{arn}}$$

Donde:

ec (2.5)

T_{arn} = turbidez aguas residuales de nejayote (NTU)

T_f = turbidez del filtrado (NTU)



2.4 análisis estadístico

En la tabla 2.1 se registran las condiciones experimentales a las cuales se filtraron las aguas residuales de nejayote, se realizó un diseño factorial 2x2.

corrida	Arreglo de camas en el lecho	Presión hidrostática
1	Arena-tezontle-carbón activado	1681
2	Arena-tezontle-carbón activado	3362
3	Arena-tezontle	1681
4	Arena-tezontle	3362

Tabla 2. 1 condiciones experimentales de la filtración de aguas residuales de nejayote

2.5 Actividades para el Objetivo 3:

2.5.1 Determinación de la concentración de calcio

Se determinó la concentración de calcio en la muestra filtrada a diferentes condiciones, mediante un espectrofotómetro de absorción atómica de doble haz (Analyst 300, Perkin Elmer, USA) equipado con una lámpara de deuterio de cátodo hueco con corrector de fondo. Las determinaciones se realizaron por triplicado para todas las unidades experimentales de acuerdo a la metodología de la AOAC, (2000). Se pesaron en un balanza analítica Marca Ohaus, 0.25 g de cada muestra los vasos de teflón (CEM, modelo, PFA-LV), agregando 10 mL de ácido nítrico dentro de una campana de extracción hasta que la muestra dejó de hacer burbujas y fue transparente. Se taparon sellándolas herméticamente. A fin de continuar con la digestión. Posteriormente, se colocaron los vasos de teflón dentro del carrusel y se



introdujeron al horno de microondas (CEM, modelo MDS 81D), el cual se programó a tres rampas de calentamiento: la primera, de temperatura ambiente hasta 130 °C en 4:30 min, la segunda de 130 °C, hasta 150 °C en 4.0 min y la última de 150 a 175 °C en 4.0 min, manteniendo una isoterma a la temperatura constante durante 15 minutos. Por último, las muestras se dejaron enfriar, se filtraron y se les adicionó 1 mL de óxido de lantano (ver Figura 2.16 a), se aforaron a 100 mL con agua tridestilada. También se preparó la curva con el estándar de calcio para calibrar y leer. Se colocó la lámpara de cátodo hueco para leer Ca en el equipo, la lectura se realizó con las muestras previamente diluidas, y se colocaron en un vaso de precipitado para introducir al nebulizador. Las muestras se leyeron en un equipo de espectroscopia de absorción atómica de flama utilizando como gases aire–acetileno para producir la flama, se eligió una longitud de onda de 422.7 nm característica del calcio como se aprecia en la Figura 2.16 b. Las muestras que no entraron en la concentración de la curva de calibración se diluyeron para conocer el valor de su concentración y posteriormente se multiplicó por la dilución realizada.

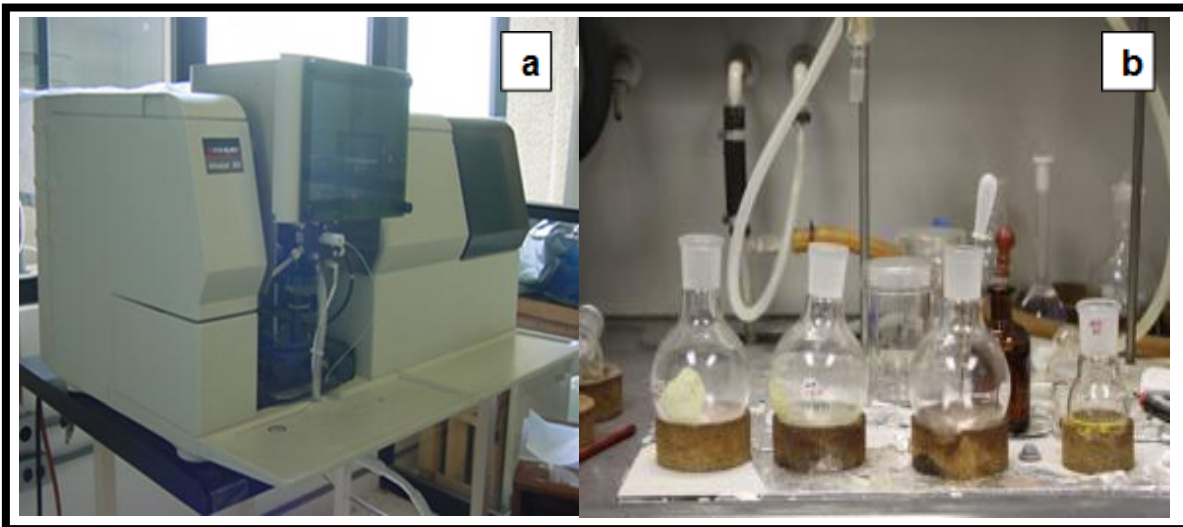


Figura 2.16 Determinación de calcio en muestras; a) filtración de muestras y adición de óxido de lantano. 2 b) espectrofotómetro de absorción atómica



2.5.2 Morfología por Microscopia electrónica de barrido al alto vacío (MEB-AV)

Se caracterizó el filtrado de agua residual de nejayote para identificar los componentes presentes por microscopia electrónica de barrido al alto vacío. Los portamuestras de bronce se limpiaron para retirar impurezas. Una gota de filtrado de agua residual de nejayote se colocaron el porta muestra de bronce adheridas con cinta de carbón electro conductiva, con el fin de que la emisión de electrones fuese continua dentro del microscopio, se introdujeron en el microscopio electrónico de barrido a alto vacío (JEOL, modelo JSU-5600 AV) con la finalidad de obtener las micrografías (ver Figura 2.17 a). Las muestras se colocaron en porta (Figura 2.17b), con el fin de que la emisión de electrones fuera continua dentro del microscopio (Arenas, 1999). A las muestras se les dio, un baño de oro para su deshidratación y se colocaron en un porta muestras de aluminio para cuatro unidades (Figura 2.17 c). Finalmente, fueron observadas a diferentes aumentos.

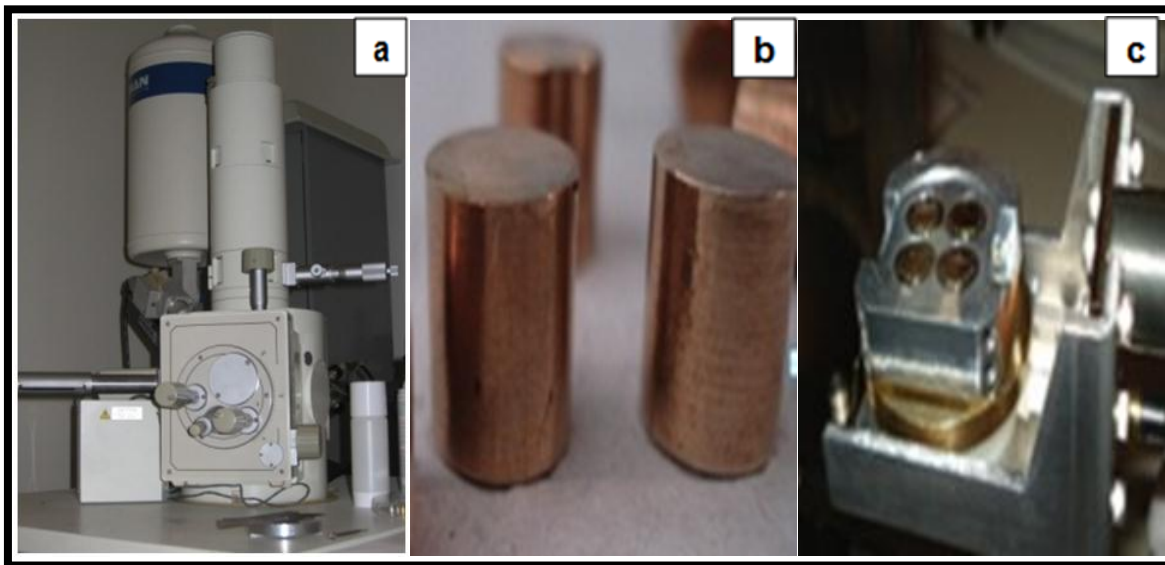


Figura 2.17 Técnica de microscopia. a) Microscopio electrónico, b) porta muestras de bronce. c) porta muestras de aluminio.

Con esta técnica se podrá evidenciar la cantidad de sólidos presentes y la morfología de estos en cada una de las corridas experimentales filtrar



3 DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 Resultados de actividades preliminares.

3.2.1 Resultados de la recolección de aguas residuales de nejayote

300 litros de aguas residuales de nejayote se recolectaron como muestra la Figura 3.1 y se almacenaron en la cámara de refrigeración a 5 °C.



Figura 3.1 a) recolección de aguas residuales de nejayote b) refrigeración de aguas residuales de nejayote.

3.2.2 Resultados de la elaboración de esferas de carbón activado

3 kg de esferas de carbón activado fueron almacenados en recipientes herméticos durante toda la experimentación de acuerdo a la Figura 3.2 para ser utilizadas en las diferentes corridas experimentales en el filtro de lechos empacados en la primera



cama del equipo. Estas esferas presentaron un contenido de humedad del 6%, después de 2 horas de secado.

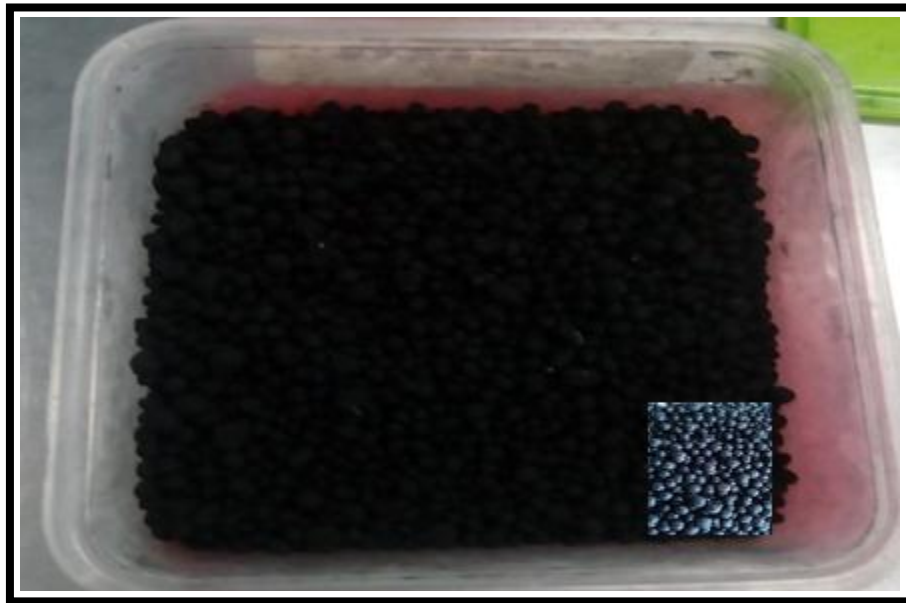


Figura 3.2 Esferas de carbón activado y sólidos insolubles de nopal

3.2.3 Resultados de la determinación de turbidez de agua residual de nejayote

Los resultados de la turbidez de agua residual de nejayote sin filtrar se presentan en la tabla 3.1

Tabla 3.1 resultados de turbidez del agua residual de nejayote sin filtrar

Nejayote Repeticiones	Turbidez (NTU)	\bar{x}
1	25.06	25.23 ± 0.77
2	24.56	
3	26.082	



3.2.4 Resultados de determinación de pH de agua residual de nejayote sin filtrar Los resultados de pH se presentan en la tabla 3.2

Tabla 3. 2 resultados de las determinaciones de pH

Nejayote Repeticiones	pH	\bar{x}
1	8.60	8.56 ± 0.15
2	8.70	
3	8.40	

3.2.5 Resultados de la determinación de humedad y sólidos totales de aguas residuales de nejayote.

En la tabla 3.3 se reportan los resultados de la humedad y los de sólidos totales de nejayote.

Tabla 3. 3 humedad y sólidos totales de aguas residuales de nejayote

Caja (muestra)	Charola vacía (g)	Charola c/muestra (g)	Charola c/muestra seca (g)	Humedad (%)	Sólidos totales (%)	\bar{x}
1	1.37	7.64	1.50	99.297	0.703	0.777 ± 0.06
2	1.41	8.01	1.54	99.202	0.798	
3	1.37	7.85	1.50	99.168	0.832	



3.2.6 Resultados de las curvas patrón de agua residual de nejayote a distintas diluciones sin filtrar turbidez vs solidos totales (ver Figura 3.3), pH vs solidos totales (Ver Figura 3.4).

- **Curva patrón Turbidez vs sólidos totales**

Mediante diluciones del agua residual de nejayote sin filtrar se determinó turbidez, solidos totales, pH, con esto se graficaron las curvas patrón la cuales representa los valores promedio de las determinaciones de la turbidez vs contenido de sólidos y pH en función de solidos totales, mediante una regresión lineal (ver Figura 3.3).

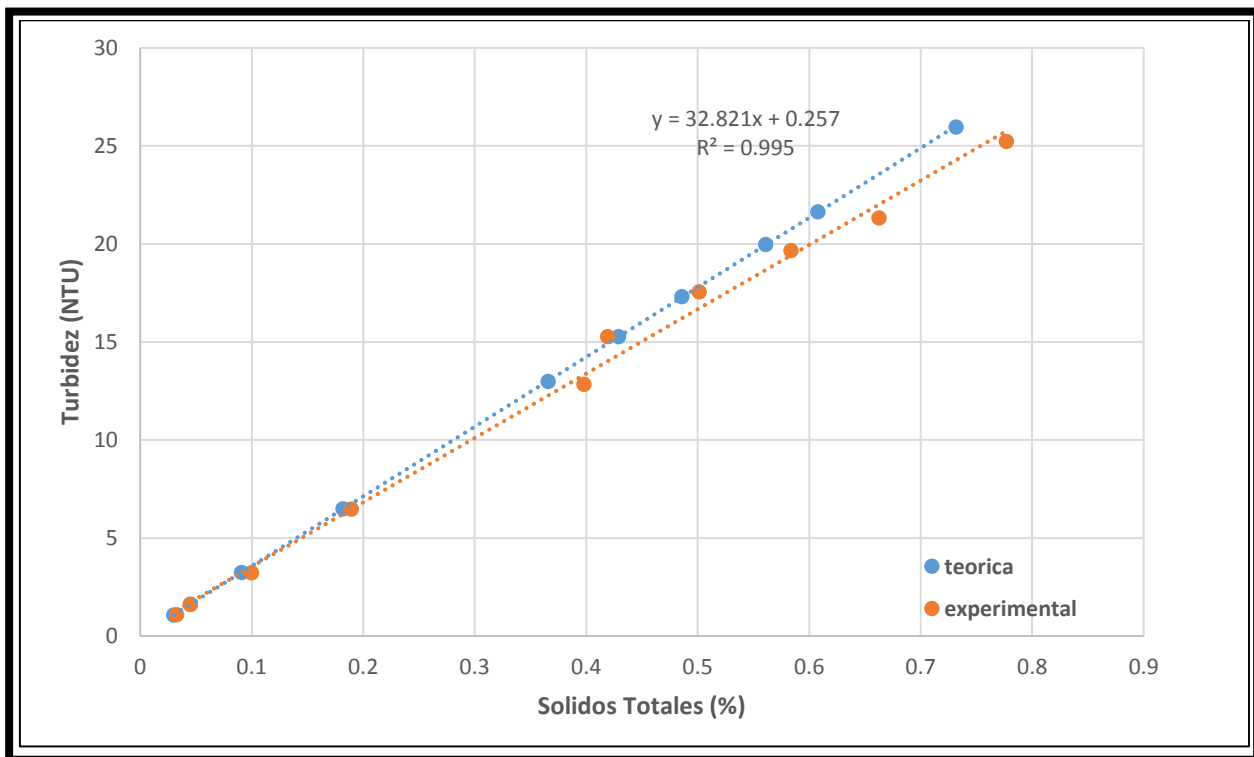


Figura 3. 3 Curva patrón Turbidez vs. % concentración de solidos totales



Se observa que hay semejanza en la tendencia entre la curva teórica y experimental, por lo cual se puede utilizar la relación turbidez solidos totales para obtener cualquier resultado dentro de los rangos de la curva en los posteriores filtrados. Es decir se filtró y se determinó la turbidez, se entra a la gráfica con este valor y se puede encontrar el valor de la concentración de sólidos totales.

- **Curva patrón de pH vs Concentración de solidos totales**

En base a los datos anteriores, se graficó la curva de pH en función de la concentración de sólidos, mediante una regresión lineal se obtuvo la tendencia. La Gráfica se presenta en la Figura 3.4.

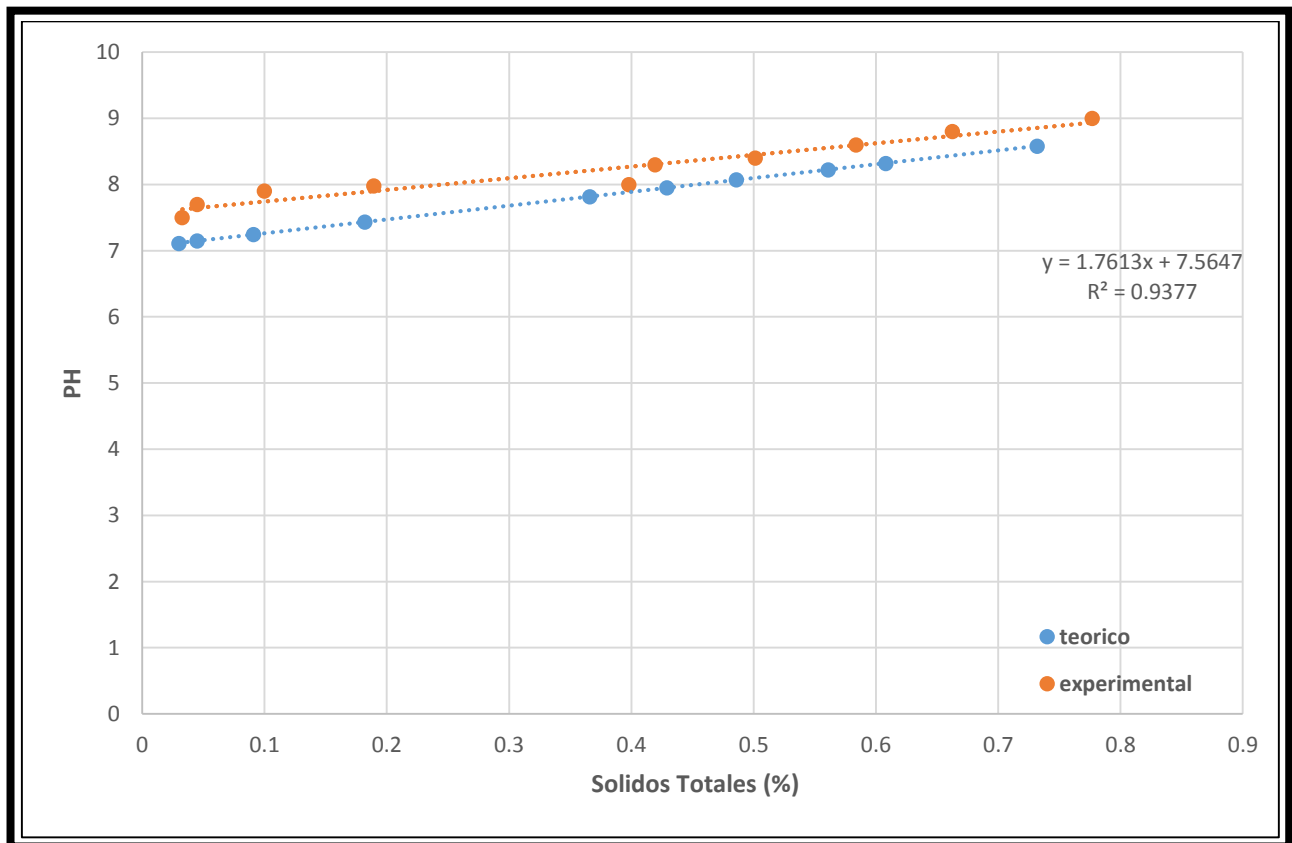


Figura 3. 4 Curva patrón pH vs concentración de solidos totales



Se observa que hay semejanza en la tendencia entre la curva teórica y experimental, por lo cual se puede utilizar la relación pH sólidos totales para obtener cualquier resultado dentro de los valores del intervalo de la curva patón en los posteriores filtrados. Es decir se filtró y se determinó el pH, se entra a la gráfica con este valor y se puede encontrar el valor de la concentración de sólidos totales.

3.3 Resultados del objetivo 1 y 2

3.3.1 determinación de presión hidrostática a diferentes alturas

3.3.1.1 Resultado de determinación de densidad del agua residual de nejayote sin filtrar (ver Tabla 3.4)

Tabla 3. 4 Determinación de la densidad de agua residual de nejayote

muestra	Densidad (kg/m ³)	Promedio (kg/m ³)
R1	957	952 ± 22.81
R2	928	
R3	973	

Se obtuvieron los resultados de densidad del agua residual de nejayote sin filtrar ya que es un parámetro para la obtención de la presión hidrostática se realizaron 3 repeticiones por muestra, de acuerdo a la Tabla 3.4.

3.3.1.2 Resultados de determinación de alturas del agua residual de nejayote en el tanque del equipo



Tabla 3. 5 Determinación de alturas del tanque

Prueba	Repetición	Alturas de tanque (m)	Promedio (m)
1	R1	0.19	0.18 ±.01
	R2	0.17	
	R3	0.18	
2	R1	0.37	0.36 ±.01
	R2	0.36	
	R3	0.35	

Se obtuvieron resultados de las dos alturas que se trabajaron en el tanque y posteriormente se hizo el cálculo de la presión hidrostática.

3.3.1.3 resultados de la presión hidrostática

Resultados de la determinación de presión (ver tabla 3.6)

Los valores de la presión por cada altura se muestran en la tabla 3.6

Tabla 3. 6 Determinación de presión

Altura (\bar{x})	Presión (Pa)
0.18m	1681
0.36m	3362

Nótese que se tomó el valor en una altura y el doble de la misma

Los resultados muestran que a mayor altura, el líquido ejerce una mayor presión en el sistema de filtración de lechos empacados.

3.3.2 Resultados del tamaño de partícula de materiales de las camas del filtro de lechos empacados (ver tabla 3.7)



Los valores del análisis granulométrico se muestran en la tabla 3.7

Tabla 3. 7 Análisis granulométrico

Materiales	No de malla que retiene (serie USA)
Carbón activado	6
Tezontle	6
Arena sílica	6, 8, 10

La tabla 3.7 muestra los diferentes materiales que se utilizaron en el lecho empacado y su tamaño de partícula que pasaron por las mallas 6, 8, 10 U.S.A

3.3.3 Resultados de la combinación de materiales para las corridas experimentales (ver tabla 3.8)

Las distintas combinaciones de camas usadas en el filtro se muestran en la tabla 3.8

Tabla 3. 8 Combinación de camas

Arreglo	Combinación de camas en el lecho
1	Arena-tezontle-carbón activado
2	Arena-tezontle-carbón activado
3	Arena-tezontle
4	Arena-tezontle



Se realizaron combinaciones de los arreglos para ver cuál presentaba un mejor filtrado tres repeticiones por combinación

3.3.4 Resultados de las velocidades de filtrado obtenidos para cada corrida con diferente arreglo de camas y diferente presión

La Figura 3.5 muestra las velocidades de filtración para las presiones hidrostáticas de 1681 y 3362 Pa con la combinación arena tezontle carbón activado.

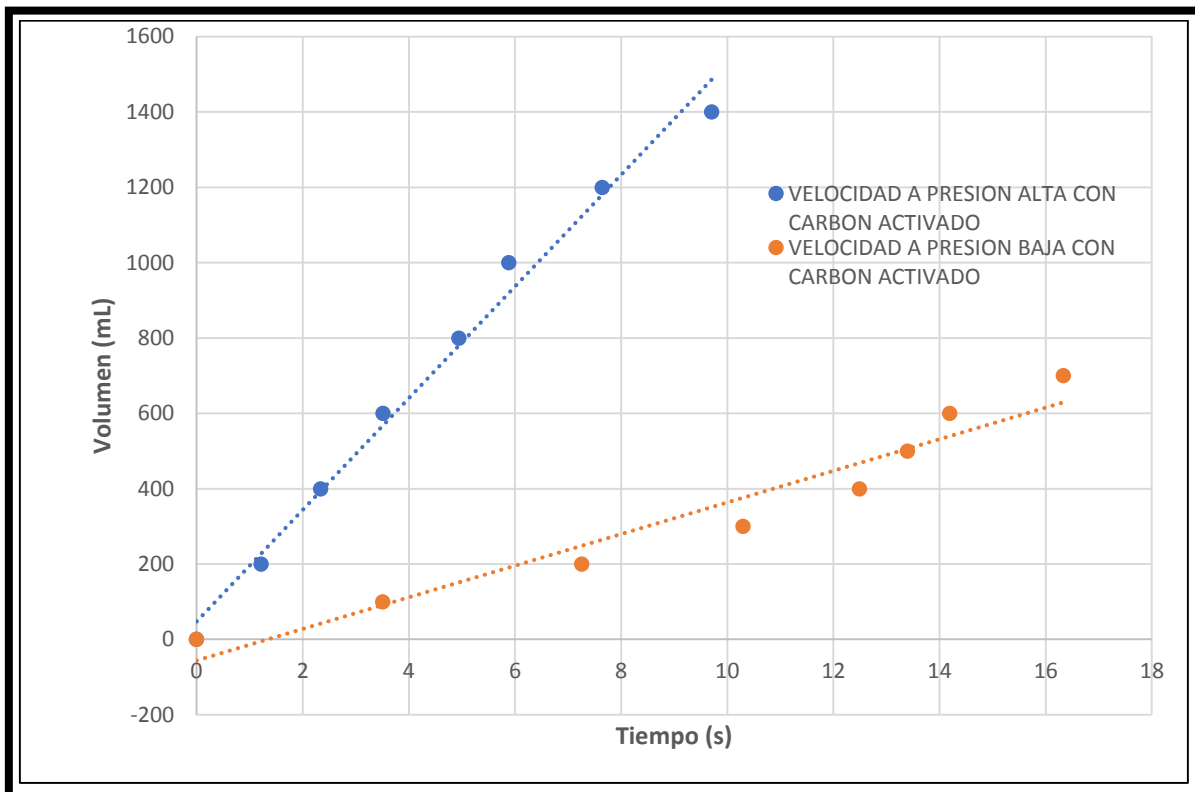


Figura 3. 5 Grafica comparativo volumen en función de tiempo a presión alta y baja arena-tezontle-carbón

Los resultados muestran que cuando se utiliza la combinación arena tezontle carbón activado a presión alta (3362 Pa), el volumen de filtrado es mayor en menor tiempo, es decir la velocidad de filtrado es más rápida. A diferencia de cuando se aplica una



presión menor, ya que en esta los tiempos se alargan, el volumen total de filtrado es la mitad del anterior en el mismo tiempo y por tanto la velocidad es menor considerablemente. Con esto se puede concluir que la velocidad de filtrado depende de la presión que se aplique.

La Figura 3.6 muestra las velocidades de filtración para las presiones hidrostáticas de 1681 y 3362 Pa con la combinación arena tezontle si carbón activado

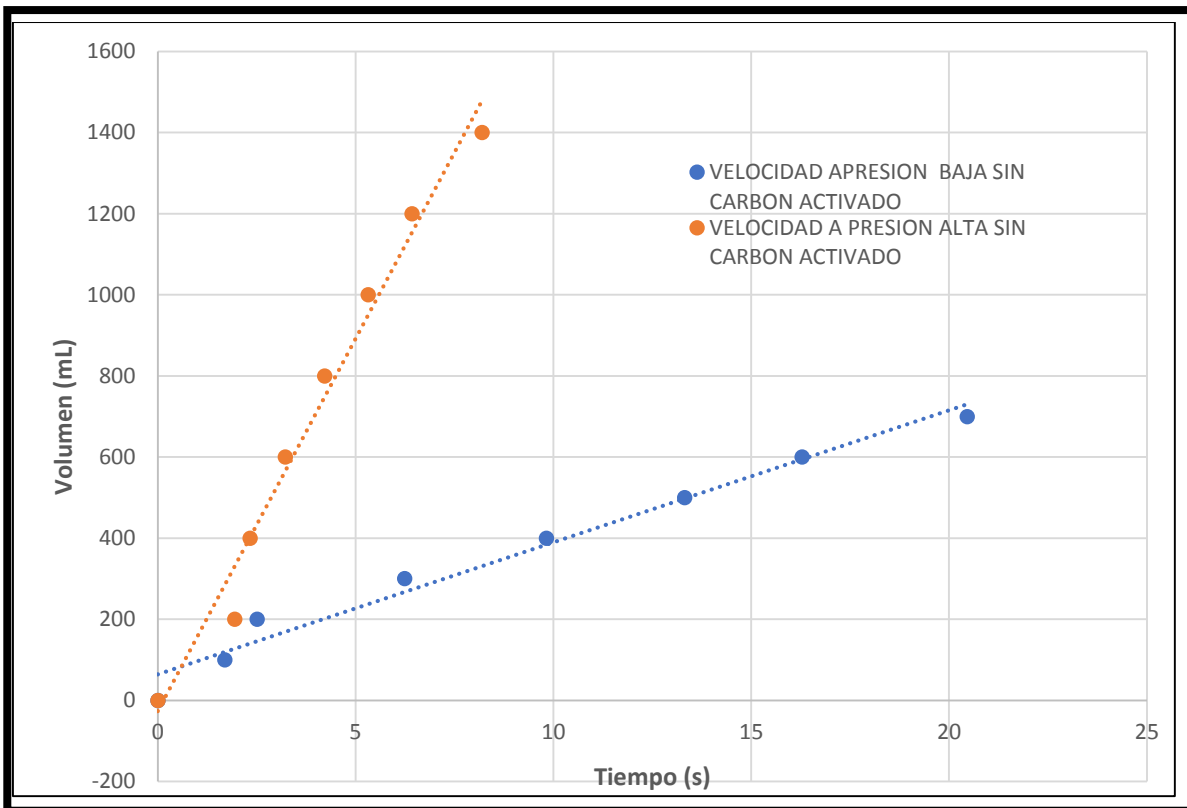


Figura 3.6 Grafico comparativo volumen en función de tiempo a presión baja y alta con arena-tezontle y sin carbón activado.



Los resultados del grafico muestran que cuando se usa la combinación arena tezontle a presión alta, la velocidad de filtrado y el volumen de filtrado son mayores, y el tiempo es mínimo a diferencia de cuando se aplica una presión menor, ya que en esta los tiempos se alargan, el volumen total de filtrado es la mitad del anterior y la velocidad disminuye considerablemente, con esto se puede decir que la velocidad de filtrado depende de la presión que se aplique

La Figura 3.7 Muestra las velocidades de filtración para las presiones hidrostáticas de 1681 y 3362 Pa con y sin carbón activado

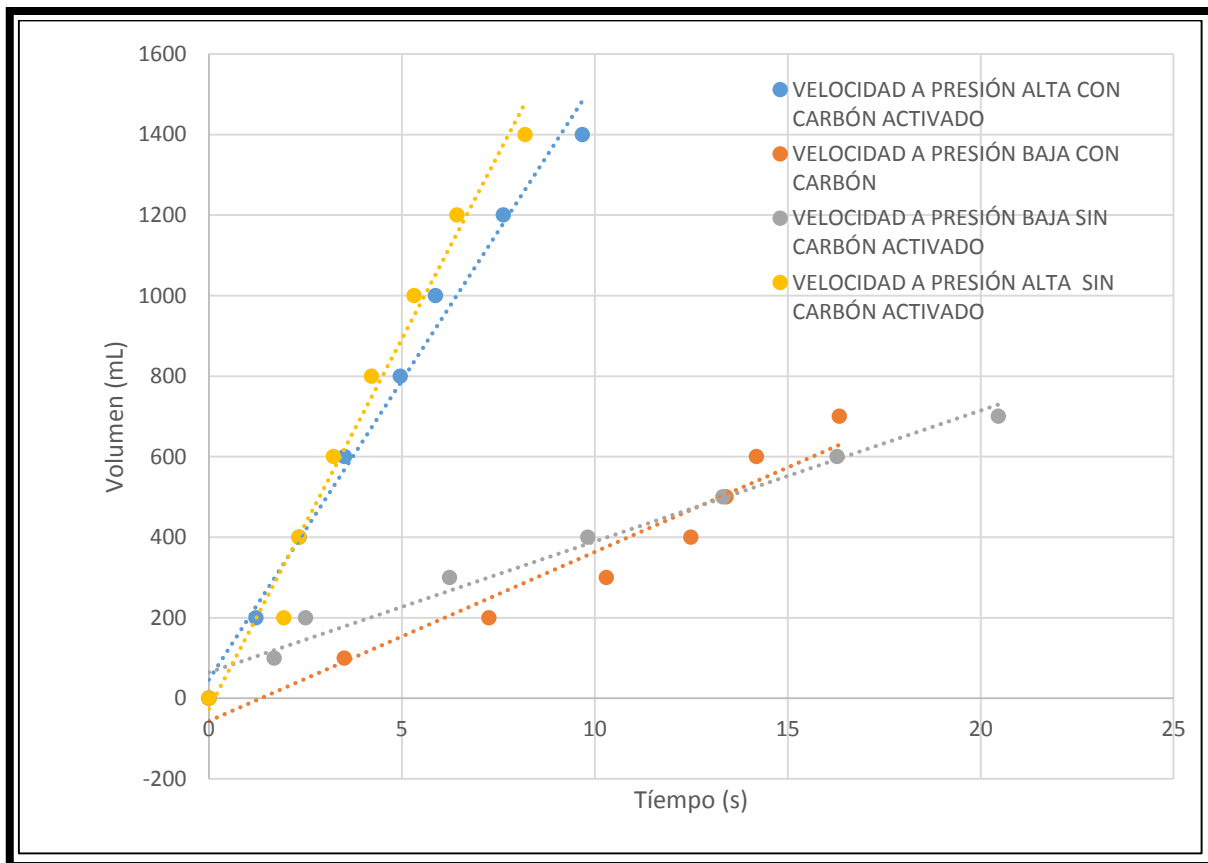


Figura 3. 7 Grafico comparativo volumen en función de tiempo a presión baja y alta con arena-tezontle-carbón activado y arena-tezontle



Los resultados del gráfico muestran que la repetición de arena tezontle y arena tezontle carbón activado a presión alta tiene una mayor velocidad de filtrado un menor tiempo y un volumen alto esto se debe a que la velocidad el volumen y el tiempo dependen de que presión se utilice en el sistema, sin embargo a presiones bajas tuvimos menor velocidad de filtrado pero mayor calidad en el filtrado como se puede observar en la Figura 3.8(color de cada uno de los filtrados)

3.3.5 Los resultados de cada determinación para el filtrado (ver tabla 3.6)

Tabla 3.9 determinaciones del filtrado pH y sólidos totales obtenidos de la curva patrón

Los resultados de turbidez, pH sólidos totales se muestran en la tabla 3.9

Tabla 3. 9 Resultados de determinaciones para cada filtrado

Materiales	Turbidez (NTU)	pH	Solidos totales (g)
Arena-tezontle-carbón activado	13.74	8.28	0.41
Arena-tezontle-carbón activado	10.35	8.1	0.30
Arena-tezontle	18.48	8.54	0.55
Arena-tezontle	16.73	8.44	0.50

La tabla muestra que el arreglo que presento mejores condiciones de filtrado fue la combinación arena tezontle carbón activado a presión baja (1681 pa) con menor turbidez, menor pH y menor solidos totales que es lo que se espera para una buena calidad de filtrado-



3.3.6 Determinación de color

Los resultados obtenidos en la determinación de color para el filtrado de las corridas arena tezontle y arena tezontle carbón activado se presentan en la tabla 3.

Tabla 3. 10 Resultados de determinación de color de los filtrados.

Muestra	Coordenada de color			color
	A	B	L	
Original	- 0.52	30.36	1.72	Amarillo opaco
Arena-tezontle-carbón activado presión alta	0.40	-3.90	23.23	trasparente
Arena-tezontle-carbón activado presión baja	0.31	-3.51	25.30	transparente
Arena-tezontle presión alta	0.23	-3.73	24.35	transparente
Arena-tezontle presión baja	0.27	-3.56	24.42	transparente

En la Figura 3.8 se muestran los filtrados obtenidos para las diferentes corridas experimentales.

Nótese que la muestra ultima, con carbón activado a presión baja no presento color ni aroma es traslucida comparada con la muestra uno que corresponde a las aguas residuales de nejayote. De manera que las condiciones de filtración más recomendables para aguas residuales de nejayote son a presión (1681 pa) para el arreglo arena-tezontle-carbón activado.

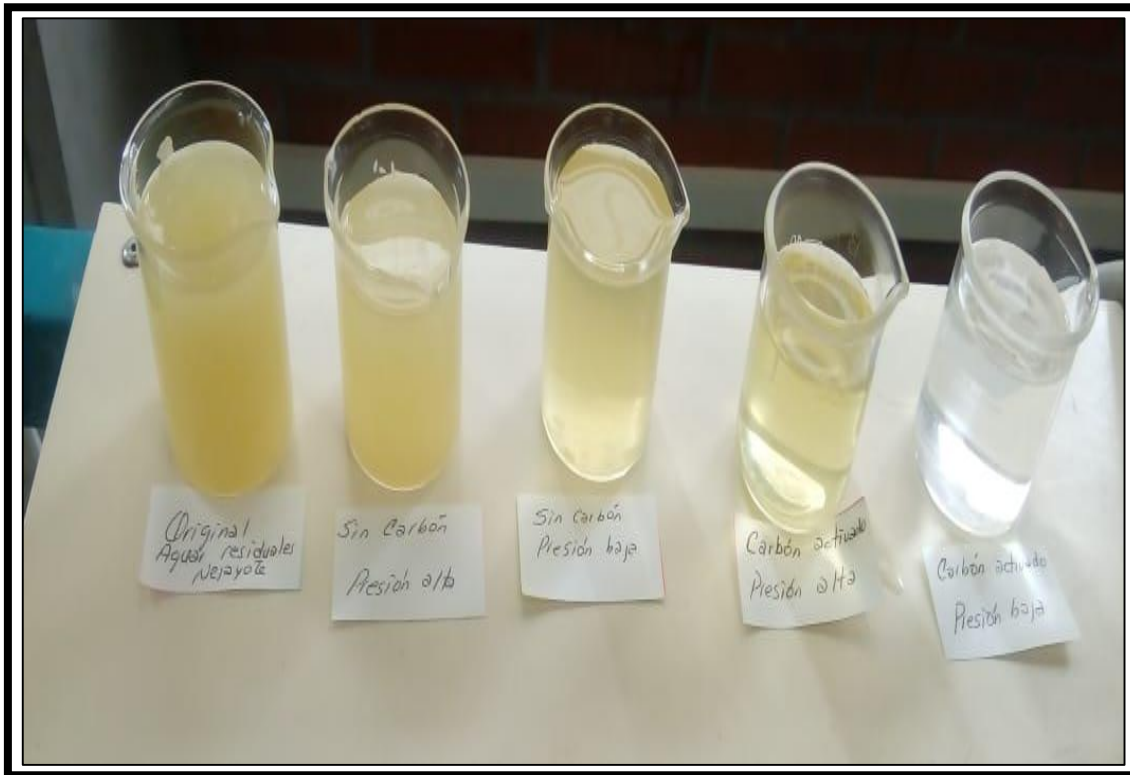


Figura 3.8 Color de cada uno de los filtrados

La Figura 3.8 es una evidencia de los filtrados de agua residual de nejayote a diferentes condiciones de filtración a presión y con arreglo de camas con carbón activado y sin carbón activado. Nótese que cualquiera de los filtrados resulta ser una buena opción. Sin embargo, el uso de carbón activado puede eliminar por completo el color del filtrado y además del aroma típico del nejayote, aunque este parámetro no fue evaluado, podría dársele un valor de cero aroma a las muestras donde se utilizó cama de carbón activado. Por otro lado la presión también afecta dado que tiene que ver con el tiempo de residencia. A menor presión el filtrado permanece mayor tiempo en las camas.



3.3.7 Resultados de la determinación de eficiencia de separación para cada corrida experimental

En la Figura 3.9 muestra la gráfica comparativa de las diferentes eficiencias de separación utilizándola relación de turbidez (Ver ec. 2.5) del capítulo 2

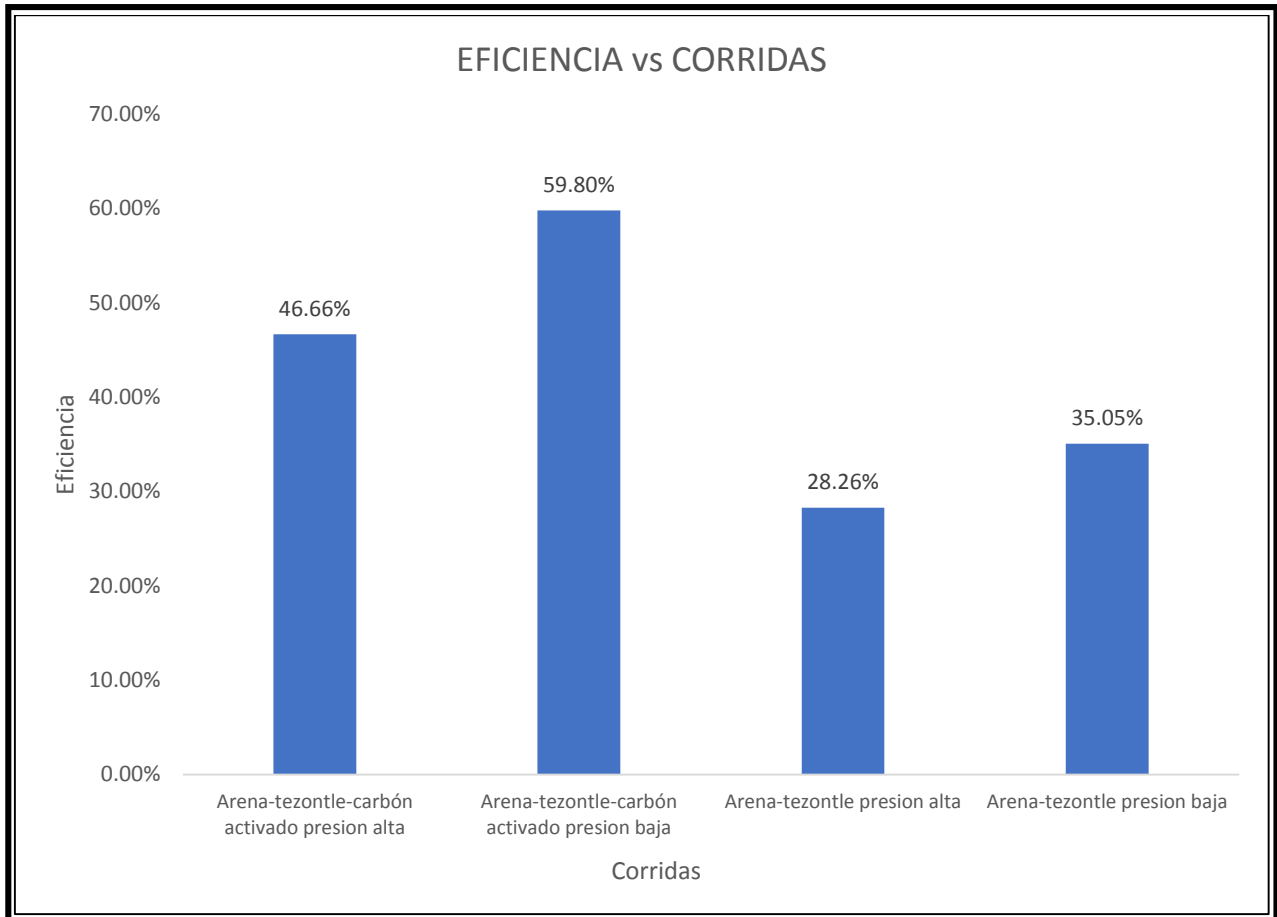


Figura 3. 9 grafico eficiencia vs corridas

La gráfica de la Figura 3.9 presenta los resultados de eficiencia de separación, que tiene que ver con los sólidos presentes en los filtrados. La gráfica muestra que la combinación a presión baja con carbón activado tiene mayor eficiencia en el proceso de filtración y posteriormente la de velocidad alta, por lo que el carbón activado es determinante para este material a filtrar y obtiene los mejores resultados.



3.4 análisis estadístico

En la Figura 3.10 se muestra la Gráfica de efectos principales para velocidad.

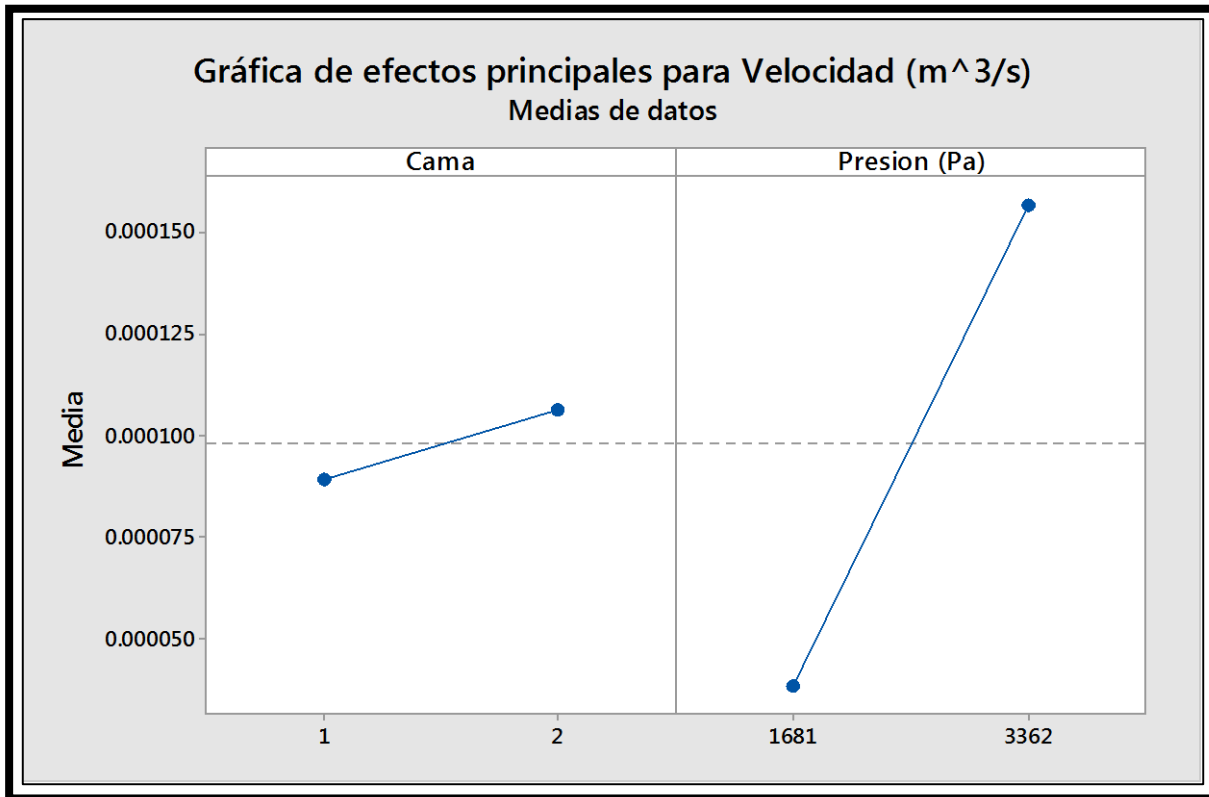


Figura 3.10 Gráfica de efectos principales para Velocidad (m/s)

En la Figura 3.10 el 1 representa el arreglo con carbón activado y el 2 sin carbón activado.

Se observa que para la velocidad, la variable que tiene mayor influencia es la presión, a mayor presión mayor velocidad y el arreglo o combinación no es determinante para la velocidad. Sin embargo, sin carbón activado presenta la mayor velocidad que sin cama de carbón activado.



En la Figura 3.11 se muestra la Gráfica de efectos principales para la eficiencia

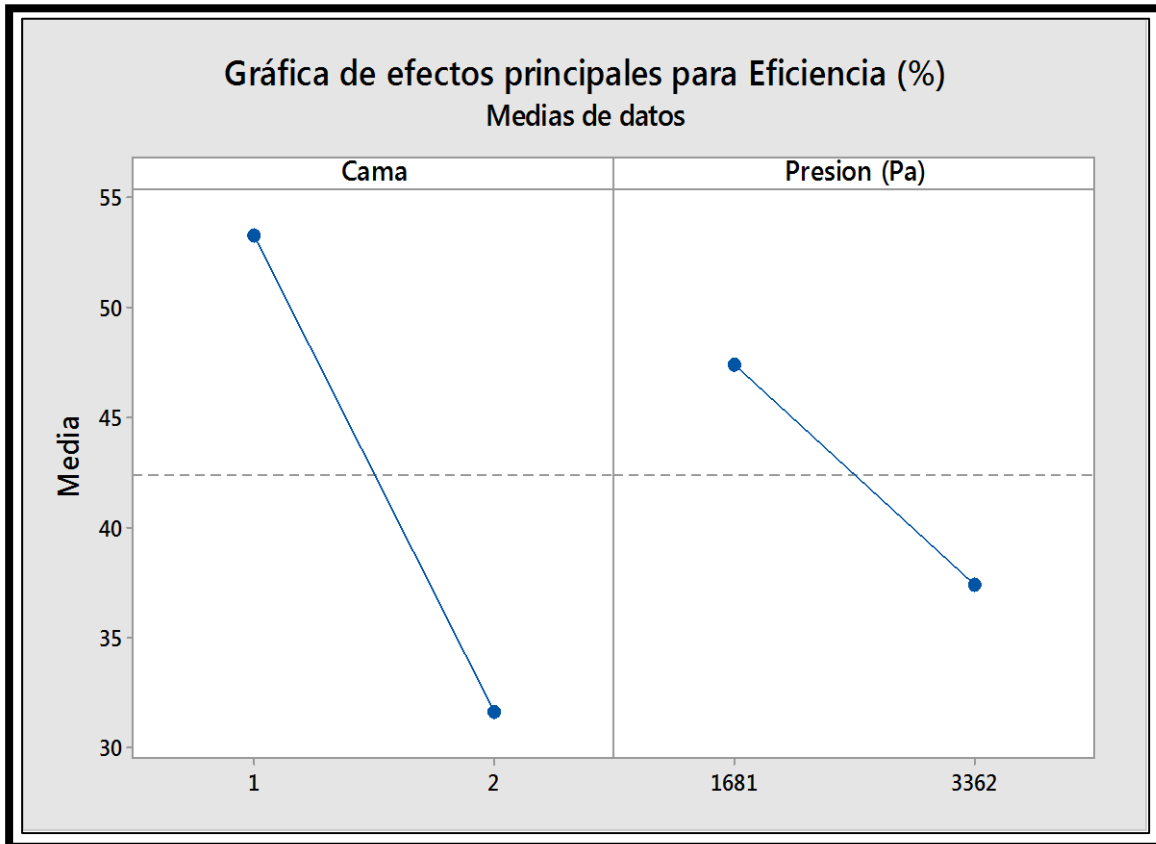


Figura 3. 11 Gráfica de efectos principales para Eficiencia (%)

Se observa que para la eficiencia de separación las variables que tienen mayor influencia es el arreglo con carbón activado (no 1), mientras que la presión tiene un efecto mucho menor. Dado que durante la filtración en el equipo se aprecia que en la cama de carbón activado las aguas residuales permanecen mayor tiempo, y esto permite interaccionar y obtener clarificados con menos sólidos y con menor turbidez.



En la Figura 3.12 se muestra la gráfica de interacción para la velocidad

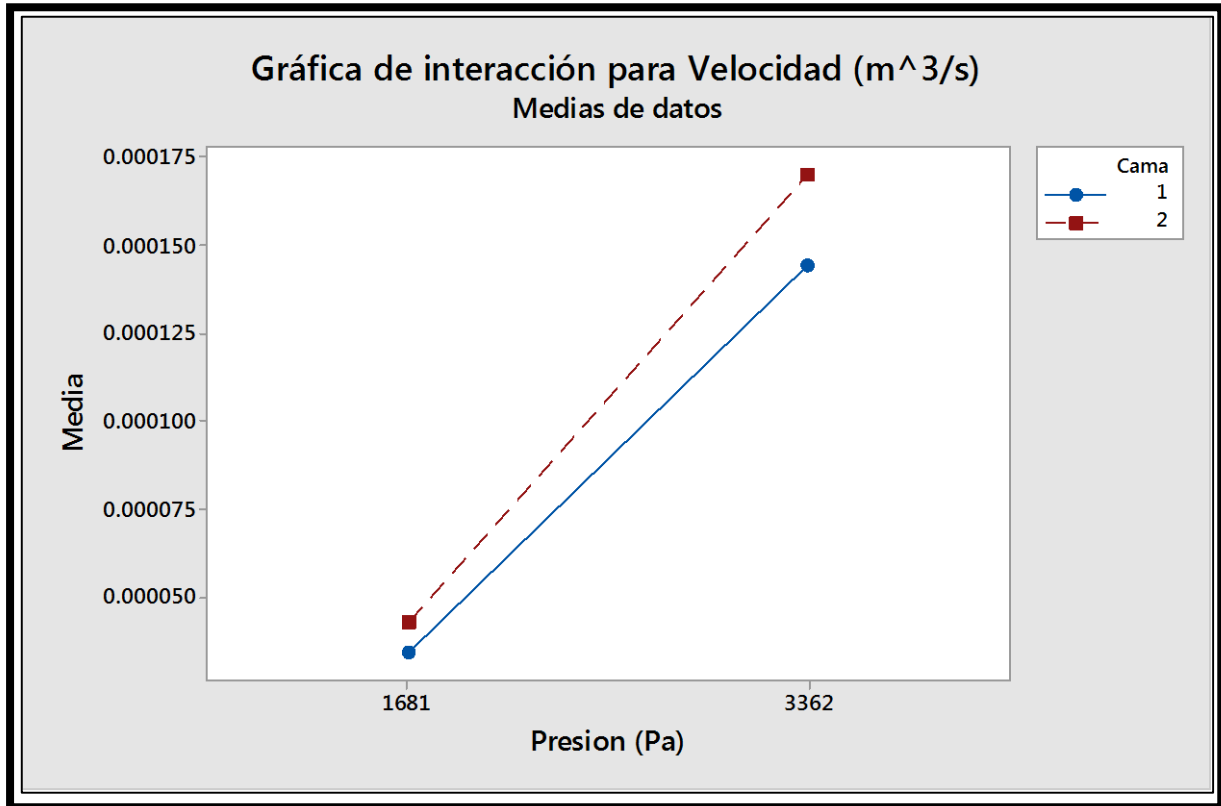


Figura 3.12 grafica de interacción para la velocidad

La grafica 3.12 muestra que las presiones utilizadas no presentan interacción con el arreglo de camas puesto que las gráficas no se cruzan. Sin embargo, si se trabaja a presiones menores se perfila que pudiera haber interacción. A presiones mayores no ocurriría esto. La línea en rojo representa al arreglo de camas sin carbón activado, se observa que presenta mayor velocidad de filtración. Es evidente que el carbón activado requiere un tiempo de hidratación lo cual se observó durante la experimentación, cuando la suspensión de aguas residuales de nejayote atravesaba por la cama de carbón activado utilizaba un mayor tiempo para filtrarla, aunque tenía como beneficio menor turbidez y no tenía aroma.



En la Figura 3.13 se muestra la gráfica de interacción para la eficiencia de separación

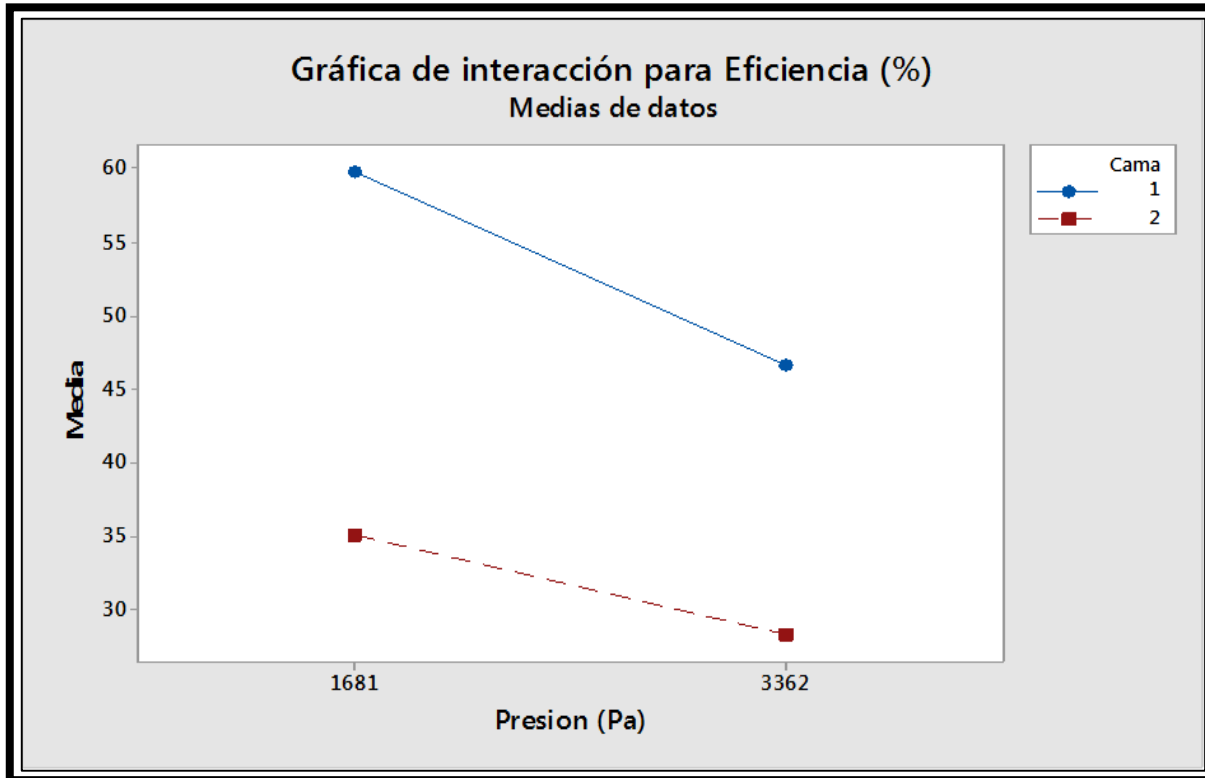


Figura 3. 13 gráfica interacción eficiencia de separación

La Figura 3.13 muestra que no existe interacción entre la presión y arreglo de camas sin embargo a una presión baja de (1681 pa) presenta la mayor eficiencia de separación debido a que tiene mayor tiempo de residencia dentro del equipo. Es decir las aguas residuales de nejayote tuvieron un mayor contacto con cada una de las camas por donde paso. Es evidente que el arreglo de camas con carbón activado presentó la mejor eficiencia de separación y con la menor presión.



3.5 Resultados del objetivo 3

La tabla 3.11 presenta los resultados de la determinación del contenido de calcio en la suspensión de aguas residuales de nejayote y en cada uno de los filtrados a diferentes condiciones de separación.

Tabla 3. 11 resultados de la determinación de calcio

Muestra	Concentración de calcio
Arena-tezontle-carbón activado presión alta	113.01 ± 0.70
Arena-tezontle-carbón activado presión baja	66.51 ± 0.12
Arena-tezontle presión alta	216.31 ± 0.10
Arena-tezontle presión baja	187.33 ± 0.70

Los resultados muestran que la menor concentración de calcio correspondió a la corrida en la que se utilizó carbón activado a presión baja y posteriormente a presión alta esto permite que se seleccionen los arreglos con carbón activado. Mientras que los arreglos de camas sin carbón activado presentaron mayores concentraciones de calcio. Inclusive la corrida con la mayor presión presentó el mayor contenido de calcio. De manera que se puede tomar la decisión de seleccionar las mejores condiciones de filtrado en función de la cantidad menor de calcio.

3.5.2 resultados de la determinación de la morfología en cada filtrado de agua residual de nejayote

En la Figura 3.14 se muestra la micrografía de agua residual de nejayote que es la muestra de suspensión original y consecuentemente se mostraran las micrografías para cada uno de los filtrados obtenidos. Todas las micrografías fueron tomadas a



100 x para establecer puntos comparativos entre ellas y evidenciar las mejores condiciones de filtración.

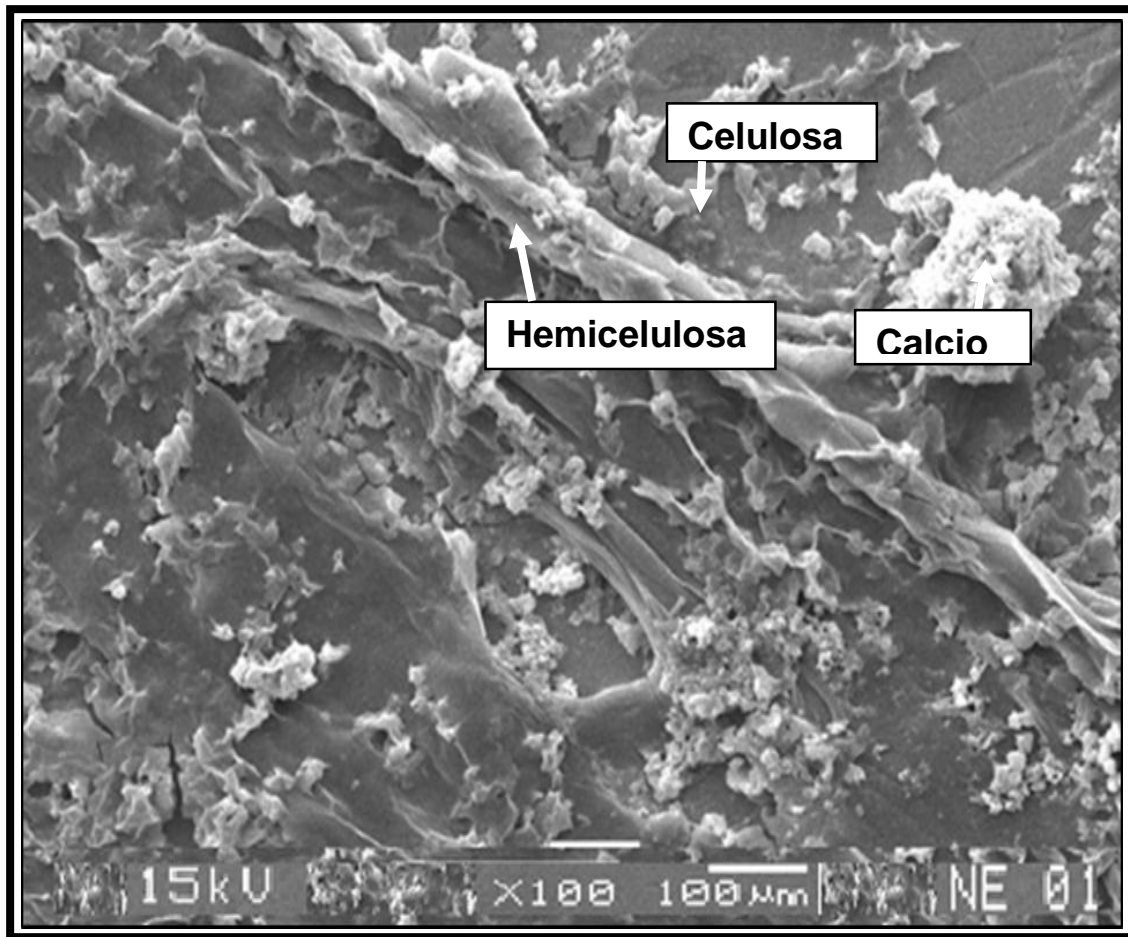


Figura 3.14 Micrografía de agua residual de nejayote sin filtrar

La Figura 3.14 corresponde a las aguas residuales de nejayote sin filtrar. Se observan muchas fibras de celulosa y muchas de hemicelulosa, así como fracciones de carbonato de calcio. Todos estos componentes pertenecen a sólidos totales del nejayote. Esto es el resultado de las fracciones de sólidos que se le desprenden durante la cocción y reposo del maíz durante el proceso de nixtamalización.



En la Figura 3.15 se muestra la micrografía de agua residual de nejayote filtrado a alta presión sin carbón activado.

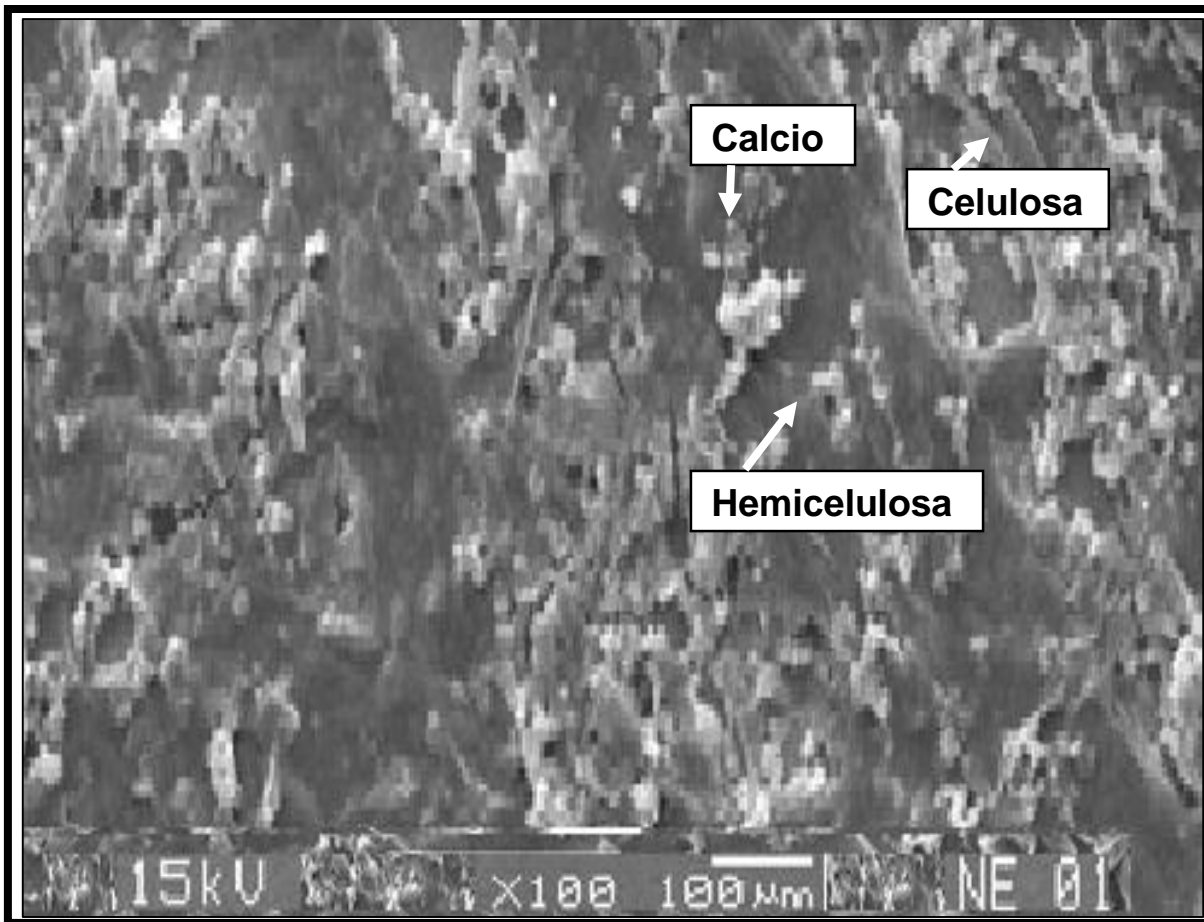


Figura 3. 15 Micrografía de agua residual de nejayote alta presión sin carbón activado

La Figura 3.15 muestra muy pocas fibras de celulosa y también de hemicelulosa , pero todavía aparecen fracciones de carbonato de calcio.



En la Figura 3.16 se muestra la micrografía de agua residual de nejayote a baja presión sin carbón activado.

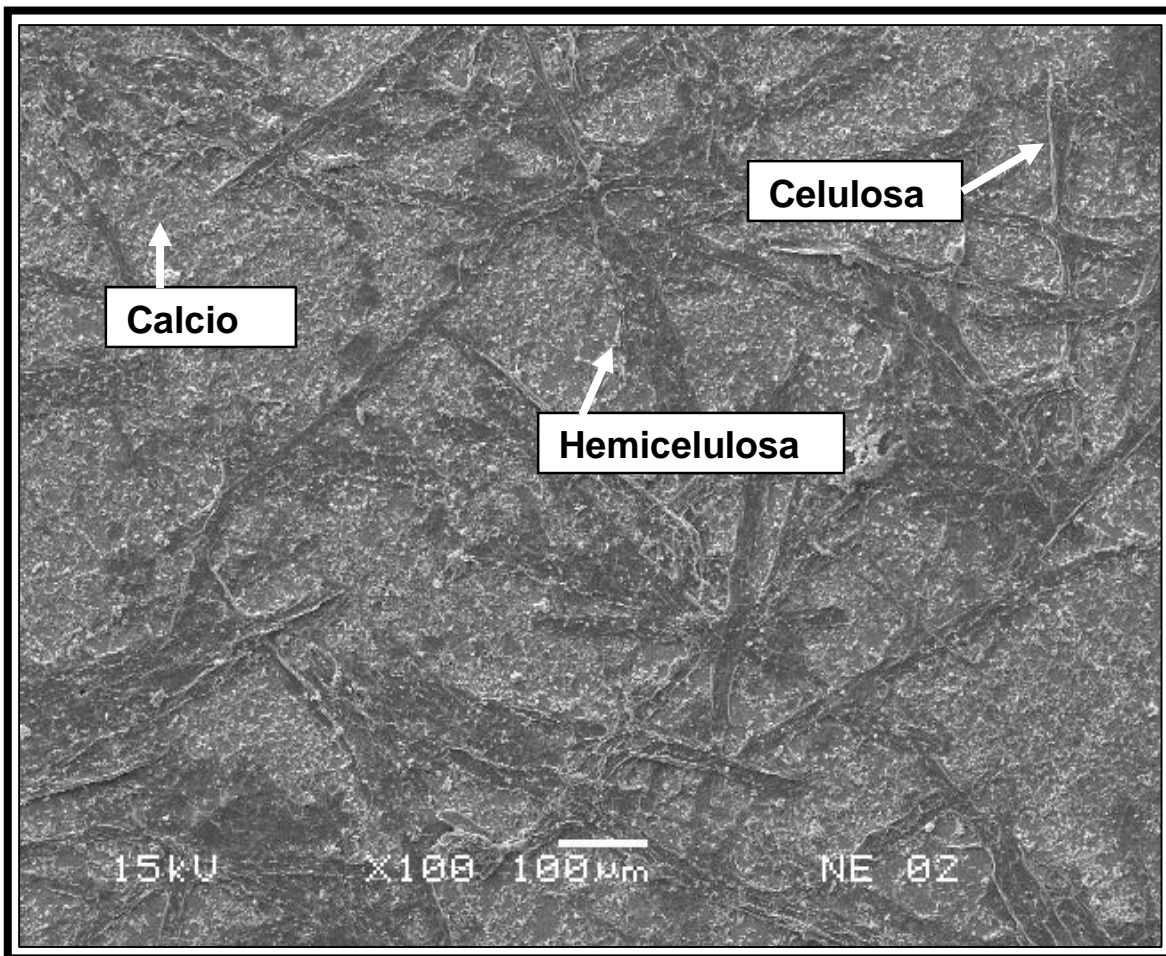


Figura 3. 16 Micrografía de agua residual de nejayote baja presión sin carbón

La Figura 3.16 corresponde a la micrografía de filtrado a baja presión sin carbón activado y muestra escasas fibras de celulosa y hemicelulosa, y tamaños muy diminutos de fracciones de carbonato de calcio. Sin embargo, aún quedan partes de trazas de componentes contaminantes para una agua residual que pudiera ser utilizada para otros usos.



En la Figura 3.17 se muestra la micrografía de agua residual de nejayote con carbón presión alta

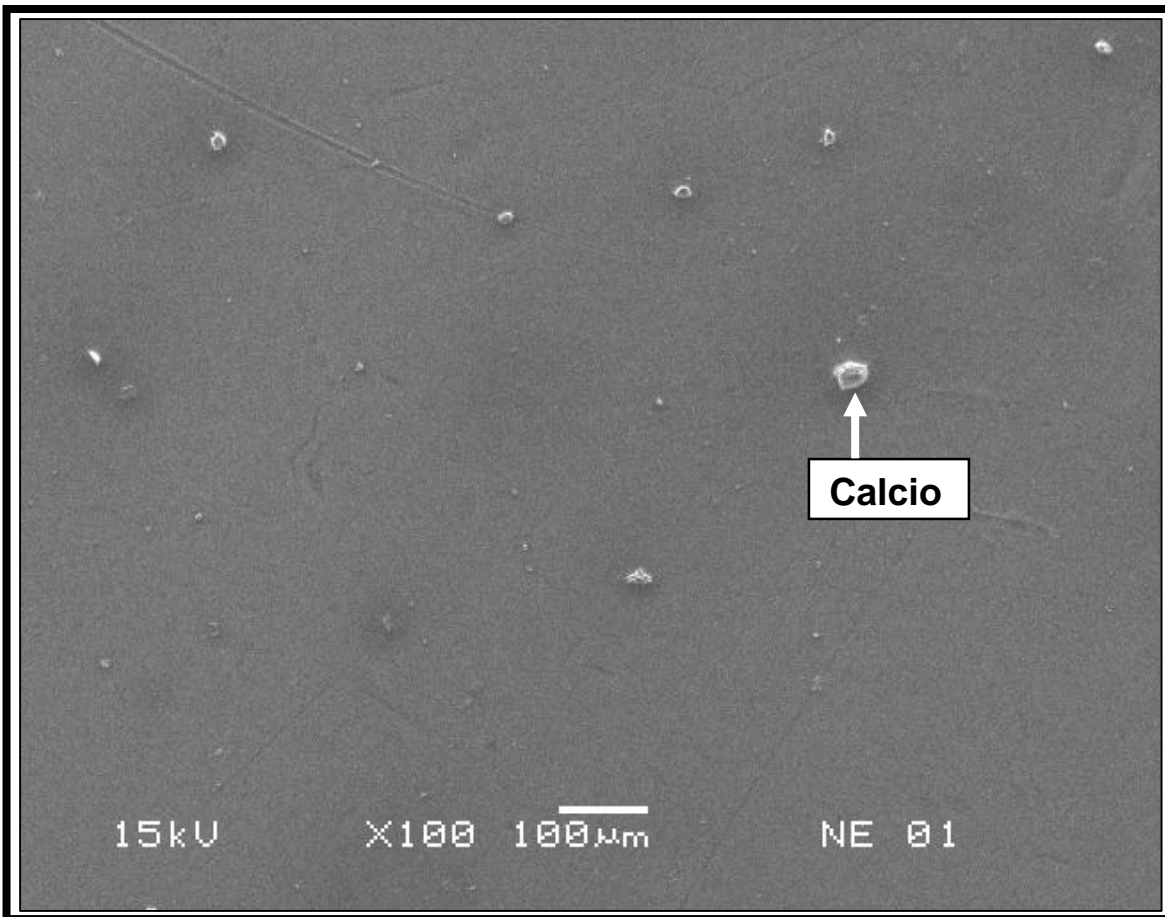


Figura 3. 17 Micrografía de agua residual de nejayote carbón presión alta

La Figura 3.17 Muestra la micrografía únicamente carbonato de calcio. En pequeños aglomerados. Sin fibras de celulosa, ni hemicelulosas.



En la Figura 3.18 se muestra la micrografía de agua residual de nejayote con Carbón a presión baja

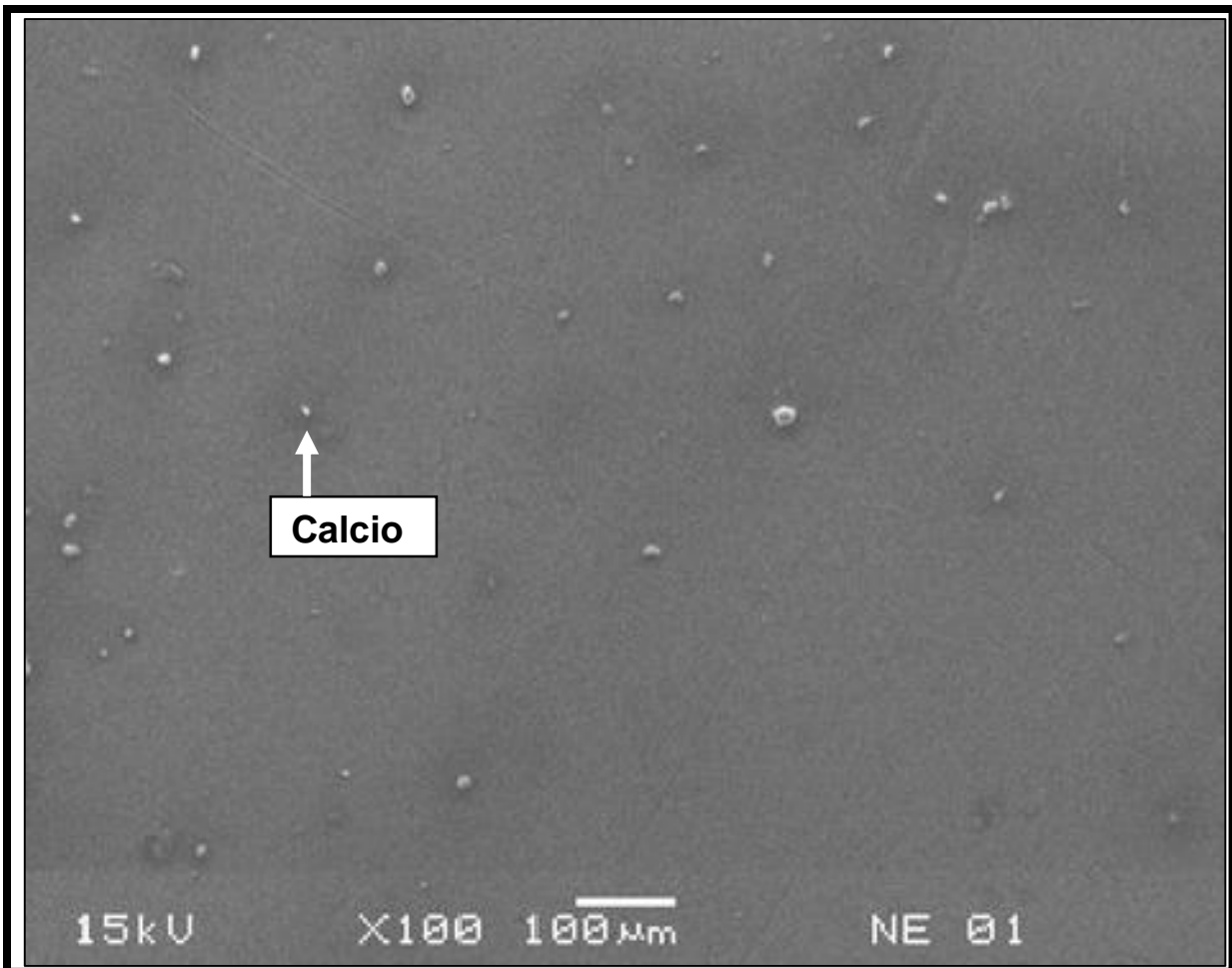


Figura 3. 18 Micrografía de agua residual de nejayote con carbón presión baja

La Figura 3.18 corresponde a la micrografía de agua residual de nejayote con carbón a presión baja y se observa se eliminan casi por completo todas las fibras y los componentes contaminantes del nejayote.



3.6 Conclusiones

- La combinación de camas arena-tezontle-carbón activado a presión alta (3362 pascales), ofreció una mayor velocidad de filtrado, pero una menor calidad en el filtrado respecto al color y aroma, con una eficiencia del 44.66 %, a diferencia de las presiones bajas (1681 pascales) utilizadas con esta misma combinación de materiales, ya que a presión baja se eliminó el color, el aroma y mejoro eficiencia de separación con un 59.80 %.
- En micrografía y espectrofotometría del filtrado de agua residual de nejayote en la combinación arena-tezontle-carbón activado a presión baja a diferencia de las distintas corridas, se observa que se eliminan casi por completo todas las fibras y los componentes contaminantes del nejayote.
- Los lechos empacados son una alternativa para el tratamiento de las aguas residuales de nejayote. Por su bajo costo (materiales), fácil instalación y por la sencillez de la operación, tiempos cortos de filtración, lavado sencillo de las arenas y otros materiales, durabilidad del equipo, fácil mantenimiento y eficiencias de hasta 59 % en el proceso de separación de solidos insolubles de nejayote.



Anexos

Resultados de Contenido de sólidos totales de agua residual de nejayote en dilución.

Los datos del contenido de sólidos totales se presentan en la tabla

Tabla Contenido de sólidos totales de agua residual de nejayote de diferentes diluciones

Dilución	Sólidos totales (%)			\bar{x}	σ	C.V	
	Teórica	Experimental					
		R1	R2				R3
1/24	0.030	0.034	0.031	0.032	0.002	0.058	
1/16	0.045	0.044	0.046	0.044	0.001	0.033	
1/8	0.091	0.092	0.123	0.081	0.099	0.210	
1/4	0.182	0.189	0.184	0.195	0.189	0.005	0.029
1/2	0.366	0.441	0.357	0.394	0.398	0.042	0.106
1/1.7	0.429	0.410	0.420	0.428	0.410	0.044	0.109
1/1.5	0.486	0.498	0.523	0.482	0.501	0.0206	0.041
1/1.3	0.561	0.582	0.578	0.590	0.58	0.005	0.009
1/1.2	0.608	0.668	0.620	0.700	0.662	0.040	0.060
100	0.732	0.703	0.798	0.832	0.777	0.060	0.086



Resultados de la Turbidez en muestras diluidas de nejayote

En la tabla se registraron los valores de turbidez para las muestras diluidas a diferentes concentraciones

Tabla Resultados de turbidez de muestras diluidas de nejayote

Dilución	Turbidez (NTU)				\bar{x}	σ	C.V
	Teórica	Experimental					
		R1	R2	R3			
1/24	1.08	1.16	1.02	1.09	1.09	0.07	0.06
1/16	1.62	1.56	1.64	1.63	1.61	0.04	0.02
1/8	3.24	3.14	3.30	3.22	3.22	0.07	0.02
1/4	6.49	6.47	6.48	6.49	6.48	0.01	0.001
1/2	12.9	13.01	12.70	12.80	12.8	0.15	0.01
1/1.7	15.2	15.30	15.32	15.20	15.3	0.06	0.004
1/1.5	17.3	17.90	17.40	17.38	17.56	0.29	0.01
1/1.3	19.98	20.1	19.43	19.45	19.66	0.38	0.019
1/1.2	21.65	21.35	21.45	21.20	21.33	0.12	0.005
100	25.96	25.06	24.56	26.08	25.2	0.77	0.03

Resultados de ph de nejayote en dilución (agua residual de nejayote)

Los datos del contenido de sólidos totales

Dilución	PH				\bar{x}	σ	C.V
	teórica	experimental					
		R1	R2	R3			
1/24	7.11	7.01	7.03	7.01	7.01	0.01	0.001



1/16	7.14	7.13	7.12	7.1201	7.12	0.01	0.01
1/8	7.24	7.16	7.18	7.15	7.16	0.01	0.002
1/4	7.43	7.34	7.39	7.40	7.37	0.03	0.004
1/2	7.81	7.70	7.600	7.790	7.69	0.09	0.01
1/1.7	7.95	7.80	7.850	7.900	7.85	0.05	0.01
1/1.5	8.07	8.05	8.08	8.06	8.06	0.01	0.02
1/1.3	8.22	8.64	8.53	8.98	8.71	0.23	0.03
1/1.2	8.32	8.40	8.45	8.30	8.38	0.07	0.01
100	8.58	8.60	8.70	8.40	8.56	0.15	0.02

Resultados de los volúmenes, tiempo y velocidad de filtrado obtenidos para cada corrida

Velocidad a Presión alta Arena-tezontle-carbon

Volumen (mL)	Tiempo (s)	Tiempo (s)	Tiempo (s)	Promedio	σ	C.V
0	0	0	0	0	0	0
200	1.22	1.21	1.22	1.21	0.005	0.004
400	2.34	2.33	2.34	2.3	0.005	0.002
600	3.52	3.50	3.52	3.51	0.011	0.003
800	4.97	4.89	4.96	4.94	0.043	0.008
1000	5.93	5.85	5.87	5.88	0.041	0.007
1200	7.64	7.66	7.63	7.64	0.015	0.002
1400	9.71	9.73	9.68	9.70	0.025	0.002



Velocidad a Presión baja Arena-tezontle-carbon

Volumen (mL)	Tiempo (s)			Promedio	σ	C.V.
	R1	R2	R3			
0	0	0	0	0	0	0
100	1.72	1.77	1.6	1.69	0.087	0.05
200	2.57	2.46	2.49	2.50	0.056	0.02
300	6.25	6.24	6.23	6.24	0.010	0.001
400	9.87	9.88	9.72	9.82	0.089	0.009
500	13.3	13.24	13.41	13.31	0.086	0.006
600	16.27	16.36	16.22	16.23	0.070	0.004
700	20.50	20.44	20.43	20.45	0.037	0.001

Velocidad Presión baja Arena-tezontle

volumen MI	Tiempo (s)			Promedio	σ	C.v
	R1	R2	R3			
0	0	0	0	0	0	0
100	3.50	3.43	3.60	3.51	0.085	0.024
200	7.16	7.28	7.33	7.25	0.087	0.012
300	10.39	10.27	10.24	10.3	0.079	0.007
400	12.42	12.56	4.47	12.49	4.630	0.370
500	13.33	13.43	13.44	13.40	0.060	0.004
600	14.18	14.16	14.24	14.19	0.041	0.002
700	16.23	16.41	16.37	16.33	0.094	0.005



Velocidad a Presión alta Arena-tezontle

Volumen (mL)	Tiempo(s)			Promedio	σ	C.V
	R1	R2	R3			
0	0	0	0	0	0	0
200	1.96	1.92	1.94	1.94	0.02	0.01
400	2.32	2.35	2.33	2.33	0.01	0.00
600	3.24	3.21	3.22	3.22	0.015	0.004
800	4.2	4.21	4.23	4.21	0.015	0.003
1000	5.32	5.3	5.34	5.32	0.02	0.003
1200	6.47	6.44	6.37	6.42	0.05	0.007
1400	8.22	8.17	8.19	8.19	0.02	0.003

Análisis estadístico

ANOVA: Eficiencia (%), Velocidad (m/s) vs. Cama, Presión (Pa)

Factor	Tipo	Niveles	Valores
Cama	fijo	2	1, 2
Presion (Pa)	fijo	2	1681, 3362

Análisis de varianza de Eficiencia (%)

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Cama	1	465.48	465.48	46.18	0.093



Presion (Pa)	1	99.30	99.30	9.85	0.196
Error	1	10.08	10.08		
Total	3	574.86			

S = 3.175 R-cuad. = 98.25% R-cuad.(ajustado) = 94.74%

Análisis de varianza de Velocidad (m/s)

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Cama	1	0.000000000	0.000000000		**
Presion (Pa)	1	0.000000014	0.000000014		**
Error	1	0.000000000	0.000000000		
Total	3	0.000000014			

** El denominador de la prueba F es cero o no se definió.

S = 0.0000087 R-cuad. = 99.48% R-cuad.(ajustado) = 98.43%



Este proyecto participó en el quinto congreso de ciencia educación y tecnología de la Universidad Nacional Autónoma de México

No. Reconocimiento: 5CET-03-2019-01

UNAM
CUAUITLÁN



5° CONGRESO



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO
Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán

Otorgan la presente

CONSTANCIA

AL AUTOR(ES):
Omar Sanchez Gaspar; Araceli Ulloa Saavedra; Maria de los A.
Cornejo Villegas; Elisa Gutiérrez Cortez

POR EL TRABAJO EN MODALIDAD PRESENTACIÓN ORAL TITULADO:
**SEPARACIÓN MÉCANICA DE AGUAS RESIDUALES DE NEJAYOTE EN
UN FILTRO DE LECHOS EMPACADOS**

Presentado en el 5º Congreso de Ciencia, Educación y Tecnología
Que se llevó a cabo del 17 al 21 de junio de 2019 en la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán

"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cuautitlán Izcalli, Estado de México a 09 mayo de 2019


Dra. Alma Luisa Revilla Vazquez
Jefa de la División de Ciencias Químico Biológicas





Referencias bibliográficas

- Abbas, S. R., Sabir, S. M., Ahmad, S. D., Boligon, A. A., Athayde, M. L. (2014). Phenolic profile, antioxidant potential and DNA damage protecting activity of sugarcane (*Saccharum officinarum*). *Food Chemistry*, **147**, 10-16. doi: 10.1016/j.foodchem.2013.09.113
- Acosta-Estrada, B. A., Lazo-Vélez, M. A., Nava-Valdez, Y., Gutiérrez-Uribe, J. A., Serna-Saldívar, S. O. (2014). Improvement of dietary fiber, ferulic acid and calcium contents in pan bread enriched with nejayote food additive from with maize (*Zea mays*). *Journal of Cereal Science*, **60** (1), 264-269. doi: 10.1016/j.jcs.2014.04.006
- Analysis of the pasting profile in corn starch: structural, morphological, and thermal transformations, Part I
- AOAC. (1998). Official Methods of Analysis. 16th edn. Maryland USA, Official Method 968.08: Association of Official Analytical Chemists.
- Arboleda, J. (2000). Teoría y Práctica de la Purificación del Agua. 3a ed. Mc Graw Hill. Colombia.
- Arenas, C.(1999). Manual de microscopia, Editorial labor. Barcelona.
- Ayala-Soto, F., Serna-Saldívar, S. O., García-Lara, S., Pérez-Carrillo, E. (2014). Hydroxycinnamic acids, sugar composition and antioxidant capacity of arabinoxylans extracted from different maize fiber sources. *Food Hydrocolloids*, **35**: 471-475. doi: 10.1016/j. foodhyd.2013.07.004
- Bakshi, A. S., y Singh, R. P. (1980). Kinetics of water diffusion and starch gelatinization during rice parboiling. *Journal of Food Science*, **45**, 1387–1392.
- Blanco-Gámez, E. A., Sánchez-González, E. A., Valladares, M. N., Olvera, C. (2008). Identificación de microorganismos aislados del nejayote. *Revista salud pública y nutrición*, **13**, 1-5.
- Castro-Muñoz, R. y Yáñez-Fernández, J. (2015). Valorization of nixtamalization wastewaters (Nejayote) by integrated membrane process. *Food and Bioproducts Processing* **95**: 7–18.



- Carvajal-Millán, E., Rascón-Chu, A., Márquez-Escalante, J. A. (2005). Método para la obtención de goma de maíz a partir del líquido residual de la nixtamalización del grano de maíz. *Mexican Patent PA/a/2005/008124*.
- Cornejo-Villegas, M. A., Acosta-Osorio, A. A., Rojas-Molina, I., Gutiérrez-Cortéz, E., Quiroga, M. A., Gaytán, M. (2010). Study of the physicochemical and pasting properties of instant corn flour added with calcium and fibers from nopal powder. *Journal of Food Engineering* **96**: 401-409.
- EPA, Environmental Protection Agency. 1980. Design Manual: Onsite Wastewater Treatment and Disposal Systems. EPA Office of Water. EPA Office of Research & Development. Cincinnati, Ohio. EPA 625/1- 80-012.
- 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*: 568-572.
- Ferreira-Rolón, A., Ramírez-Romero, G., Ramírez-Vives, F. (2014). Aumento de la actividad metanogénica en los lodos granulares, precipitando calcio en el nejayote mediante el burbujeo de CO₂. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, **13**(2), 517-525. Retrieved from <http://www.scielo.org.mx/pdf/rmiq/v13n2/v13n2a16.PDF>
- Gean koplis, Ch., (2006). Procesos de transporte y principios de procesos de separación. Continental, México.
- González, S. (2012). Tratamiento de aguas residuales municipales en un filtro biológico aerobio utilizando tezontle con dos diferentes tamaños de partícula. México: Instituto de Ingeniería, UNAM.
- González, R., Reguera, E., Figueroa, J. M., Martínez, J. L. (2003). Study of the Influence of nejayote and other additives on the cohesive strength and electric properties of black agglomerates. *Journal of Applied Polymer Science*, **90** (14), 3965-3972. doi: 10.1002/ app.13098.
- Gutiérrez-Cortéz, E., Rojas-Molina, I., Rojas, A., Arjona, J. L., Cornejo-Villegas, M. A., Zepeda-Benítez, Y. (2010). Microstructural changes in the maize kernel pericarp during cooking stage in nixtamalization process. *Journal of Cereal Science* **51**, 81-88.



-
- Hallaver, A., 1987. Specialty Corns, 2nd edn. New York Washington D.C. Pp 312-319
 - Helman, J., (1984). Farmacotecnia teórica y práctica. Tomo III. Continental, México.
 - Hendricks, D. (2006). Water Treatment Unit Process Physical and Chemical. Taylor & Francis. Boca Raton, FL. USA.
 - Hernández, S., Guzmán-Maldonado, H- Pineda-Gómez, P., Rodríguez-García M.E. (2007) Study of structural and thermal changes in endosperm of quality protein maize during traditional nixtamalization process. *Cereal Chemistry*, **84**:304-312.
 - Konica Minolta, (2014), Entendiendo el espacio de color Cielab. <http://sensing.konicaminolta.com.mx/2014/09/entendiendo-el-espacio-de-color-cie-lab/> Consultado el 24/05/17.
 - Lorenzo, M., Reyes, A., Blanco, I., Vasallo, M. (2010). Determinación de Ca, Cu, Fe y Pb por espectrofotometría de absorción atómica en aguardientes de caña. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar. Pp. 3-6.
 - Manual de operaciones del Turbidímetro Fotométrico Nefelométrico Minolta CR-300. Minolta. Pp. 14-21-
 - Mendis, M. y Simsek, S. (2014). Arabinoxylans and human health. *Food Hydrocolloids*, 42, 239-243. doi: 10.1016/j.foodhyd.2013.07.022
 - 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.
 - NMX-F-046-S-1980. Harina de maíz nixtamalizado. Norma Mexicana. Secretaria de fomento Industrial. Dirección de Normas.
 - NOLLET, L. M. L (Ed).; Handbook of Food Analysis; M. Dekker, Nueva York 1996, pp. 100-116.
 - Nucci, E. R., Silva, R. G., Gomes, T. C., Giordano, R. C., Cruz, J. G. (2005). A fuzzy logic algorithm for identification of the harvesting threshold during



PGA production by *Bacillus megaterium*. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, **22** (4), 521-527. doi: 10.1590/S0104- 66322005000400004

- Ordoñez, M. L. (1996). Desarrollo teórico sobre los métodos y técnicas de análisis experimental para la operación de filtración. México: UNAM-FESC.
- Perfil del Mercado del Sílice. (2013). Secretaria de economía. Coordinación Nacional de Minería. Dirección General del desarrollo Minero. México.
- Pflugfelder, R. L., Rooney, L. W., Waniska, R. D. (1988). Dry matter losses in commercial corn masa production. *Cereal Chemistry* **65** (2), 127-132.
- Ponce-Noyola, T., y Pérez-Avalos, O. (2002). Celulasas y xilanasas en la industria. *Avance y Perspectiva*, **21**, 273-277.
- Ramírez-Romero, G., Reyes-Velázquez, M., Cruz-Guerrero, A. (2013). Estudio del Nejayote como medio de crecimiento de probióticos y producción de bacteriocinas. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, **12**(2), 463-471. retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=62029966009>
- Rincón-Londono, L. J. Vega-Rojas, M. Contreras-Padilla, A. A. Acosta-Osorio, M. E. Rodríguez-García Analysis of the pasting profile in corn starch: structural, morphological, and thermal transformations, Part I *International Journal Biological Macromolecule*, **91** (2016), pp. 106-114.
- ROJAS, J. A. (1999). Potabilización del Agua. México, D. F.: Alfa omega Grupo EDITOR, S A. de C.V. Pp 116-132.
- Rosentrater, K. A. (2006). A review of corn masa processing residues: Generation, properties, and potential utilization. *Waste Management* **26**, 284-292.
- Rojas Molina Isela, Gutiérrez E., Cortés Acevedo M. E., Falcón A., Bressani R., Rojas A., Ibarra C., Pons Hernández J. L., Guzmán Maldonado S. H., Cornejo Villegas A. y Rodríguez M. E. (2008). Analysis of Quality Protein Changes in Nixtamalized QPM Flours as a Function of the Steeping Time. *Cereal Chemistry*. **85**: 409-416. Doi: 10.1094/CCHEM-85-3-0409.
- Salinas, M. Y. G. y Vázquez, C. (2003) Calidad del maíz para las industrias molinero-tortillera y de harinas nixtamalizadas. In: 60 años de Investigación al Servicio de México. Campo Experimental Valle de México “El Horno”. Memoria Técnica No. 6. Chapingo, México. Pp: 61-65.



-
- Salmerón-Alcocer, A., Rodríguez-Mendoza, N., Pineda- Santiago, V., Cristiani-Urbina, E., Juárez-Ramírez, C., Ruiz-Ordaz, N., & Galíndez-Mayer, J. (2003). Aerobic treatment of maize-processing wastewater (nejayote) in a single-stream multi-stage bioreactor. *Journal of Environmental Engineering and Science*, 2(5), 401-406. doi: 10.1139/S03-046
 - Sánchez-González, M., Blanco-Gámez, A., Escalante, A., Valladares, A. G., Olvera, C., Parra, R. (2011). Isolation and characterization of new facultative alkaliphilic *Bacillus flexus* strains from maize processing. Pp23.32.
 - SANTOS, D.; 2013.cultivo de maíz. Rev. Bras. Engenh. Agr. Amb. 16(8):843-848.
 - Seoanez, M. (2004). Depuración de las aguas residuales por tecnologías ecológicas y de bajo costo. Ediciones Mundi Prensa. España. Pp 16-27.
 - Svarowsky, (1979). Ingeniería Sanitaria tratamiento, evacuación y reutilización de las aguas residuales., 4ta ed., New York-USA., Mac Graw Hill., Pp. 207
 - Tchobanoglous, G. (1995). Ingeniería de aguas residuales: redes de alcantarillado y bombeo. Madrid: McGraw-Hill. Pp. 61-79.
 - Tortora-Gerard, J., Funke-Berdell, R., Case-Christine, L. (2007). *Introducción a la Microbiología*. Buenos Aires, Argentina: Editorial Médica Panamericana. Pp 84-92.
 - Trejo-González, A; Feria-Morales, A. y Wild-Altamirano, C. (1982). The role of lime in the alkaline treatment of corn of tortilla production. Modifications of proteins; food, nutritional and pharmacological aspects. *Advances in Chemistr: 24*. 245-263.
 - Van Loon, J. C. Analytical Atomic Absorption Spectroscopy. Academic Press, New York. (1980). Pp. 76-43.
 - Valderrama-Bravo, M. del C. Contreras-Padilla, M. Gutiérrez-Cortez, E. Oaxaca-Luna, A., Rodríguez-García, M. E. (2013) Physical-Mechanic treatment of nixtamalization subproduct (Nejayote)) *CyTA Journal of Food* (Vo. 11 No. S1, 75-83).
 - Velasco-Martínez, M., Angulo, O., Vázquez-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.



-
- Voet, D., y Voet, J. G. (2006). *Bioquímica*. Buenos Aires, Argentina: Editorial Médica Panamericana. Pp. 104-117.
 - Van Loon J, Analytical Atomic Absorption Spectroscopy: Selected Methods: Editorial Academic Press Inc. Pp 98-60
 - Waste water (nejayote). *Letters in Applied Microbiology*, **54** (4), 1-7. doi: 10.1111/j.1472-765X.2011.03021.x.
 - -Zeki-BerK (2009) Food Process Engineering and Techology. Filtration. New York. Pp. 204-213.