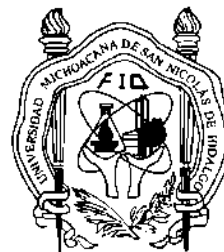




**UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

**EVALUACIÓN DE LA ADICIÓN DE CAOLÍN COMO FILTRO AYUDA EN
LA CAPACIDAD DE REMOCIÓN DE SÓLIDOS PRESENTES EN EL AGUA
RESIDUAL DE UNA PLANTA POTABILIZADORA**

TESIS

Para obtener el título de Ingeniera Química

PRESENTA:

P.I.Q. Jessica Copado García

Asesor de Tesis:

Doctor en Ciencia y Tecnología Ambiental

José Apolinar Cortés

Morelia Michoacán, Marzo de 2015

RESUMEN

En el presente trabajo se evaluó un caolín como filtro ayuda en la capacidad de remoción de sólidos presentes en el agua residual de la planta de agua potable “Vista Bella” de la ciudad de Morelia, mediante el proceso de filtración.

Debido a que la concentración de sólidos en el agua residual de la planta potabilizadora varía conforme se da el proceso de purga, además de que tiene variaciones en las diferentes épocas del año, se realizó el estudio con cuatro concentraciones de sólidos del agua residual, 49.44 g/L de Sólidos Suspendidos Totales (SST) (C_0) y sus diluciones 22.04 g/L ($C_0/2$), 11.2 g/L ($C_0/4$) y 5.51 g/L ($C_0/8$). Para llevar a cabo el proceso de filtración se adicionó el caolín como filtro ayuda tomando en cuenta el porcentaje en peso para cada concentración de sólidos del agua residual, los porcentajes de caolín que se utilizaron fueron 0%, 5%, 10% y 15%.

La experimentación se desarrolló en dos etapas, en la primera etapa el proceso de filtración se llevó a cabo a presión atmosférica, en esta etapa se probaron siete materiales filtrantes diferentes, utilizando una sola concentración de sólidos ($C_0/8$) en el agua residual y adicionando los diferentes porcentajes en peso de caolín. Los materiales filtrantes con mejor desempeño fueron la tela 1 (100% Algodón 321) la cual obtuvo 93.17%, 93.68%, 93.92% y 93.02% de remoción de sólidos para 0%, 5%, 10% y 15% de caolín adicionado respectivamente, y la tela 2 (100% Poliéster S-22) que obtuvo 93.56%, 93.56%, 94.10% y 93.86% de remoción de sólidos para 0%, 5%, 10% y 15% de caolín adicionado respectivamente. En la etapa 2 se trabajó a vacío con las telas de mejor desempeño y se utilizaron las cuatro concentraciones de agua residual adicionando los diferentes porcentajes en peso de caolín. La tela que obtuvo los porcentajes más altos de remoción (76.97%, 86.6% y 96.9% adicionando 10% de caolín para las concentraciones $C_0/8$, $C_0/4$ y $C_0/2$) fue la tela 1. La adición de caolín mejoró los porcentajes de remoción de sólidos para las concentraciones $C_0/8$, $C_0/4$ y $C_0/2$ mientras que para C_0 se observó que no era necesario adicionar caolín como filtro ayuda.

Palabras clave: residual, caolín, filtración, telas, potable.

ABSTRACT

The present study was made to evaluate a kaolin as help filter in the capability to remove solids in the wastewater of the “Vista Bella” Potable Water Plant in the Morelia city by filtration mechanism.

The solids concentration of wastewater is varied when purge process changes and when the season changes. A study was conducted with four solids concentration of the wastewater 49.44 g/L of TSS (C_0) and its dilutions 22.04 g/L ($C_0/2$), 11.2 g/L ($C_0/4$) and 5.51 g/L ($C_0/8$). In the filtration mechanism, the kaolin was added as help filter, this was added as percentage in weight to every concentration of wastewater, the percentage were 0%, 5%, 10% and 15%.

In two stages was developed the experiment. In the first stage the filtration process was done to atmospheric pressure, in this stage were used seven filter fabrics, $C_0/8$ and the different percentages of kaolin. The filter fabrics with better perform were the fabric 1 (100% cotton 321), this obtained 93.17%, 93.68%, 93.92% and 93.02% in solids removed to 0%, 5%, 10% and 15% respectively added kaolin, and fabric 2 (100% Polyester S-22) this obtained 93.56%, 93.56%, 94.10% and 93.86% in solids removed to 0%, 5%, 10% and 15% respectively added kaolin. The stage was done to vacuum with the filter fabrics with better perform, four concentration of wastewater and the different percentages of kaolin. The fabric 1 obtained the highest values in solids removed (76.97%, 86.6% and 96.9% added 10% of kaolin to $C_0/8$, $C_0/4$ y $C_0/2$ concentration). The addition of kaolin increased the percentages in solids removed in $C_0/8$, $C_0/4$ and $C_0/2$ concentrations, while to C_0 , the kaolin wasn't necessary to added to it as help filter.

Keywords: wastewater, kaolin, filtration, fabrics, potable.

ÍNDICE

RESUMEN	i
ABSTRACT	ii
ÍNDICE	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
ÍNDICE DE TABLAS	vii
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Agua en el mundo	1
1.2 Agua potable	2
1.3 Fuentes de Abastecimiento	2
1.4 Procesos de Potabilización de agua	3
1.5 Calidad del agua de la presa de Cointzio	4
1.6 Proceso de potabilización de agua en “Vista Bella”	4
1.7 Caolín	8
1.8 JUSTIFICACIÓN	9
1.9 HIPÓTESIS	10
1.10 OBJETIVO GENERAL	10
1.11 OBJETIVOS PARTICULARES	10
2. MARCO TEÓRICO	11
2.1 Agua Residual de las Plantas Potabilizadoras	11
2.2 Fuentes de Generación	11
2.3 Consideraciones Ambientales	11
2.4 Procesos de Tratamiento de aguas residuales	12

2.5 Métodos de deshidratación.....	14
2.5.1 Lagunas de secado	15
2.5.2 Lechos de secado	15
2.5.3 Centrífugas.....	16
2.5.4 Filtros a vacío	17
2.5.5 Filtros prensa de banda.....	17
2.5.6 Filtros prensa de placas	18
2.6 Medios filtrantes y ayudas de filtración	19
2.7 Teoría básica de la filtración	20
2.7.1 Caída de presión del fluido a través de la torta	21
2.7.2 Resistencia específica de la torta	23
2.7.3 Ecuaciones de filtración para procesos a presión constante.....	24
2.6 Disposición	25
2.7 Aspectos fisicoquímicos del agua.....	25
2.7.1 Turbidez	26
2.7.2 Sólidos Totales.....	26
2.7.3 Color.....	26
2.7.4 Conductividad	27
2.7.5 pH.....	27
2.8 Estado del Arte.....	27
3. METODOLOGÍA	30
3.1 Muestreo del agua residual.....	30
3.2 Adición de Caolín.....	30
3.3 Medio filtrante	32

3.4	Pruebas a presión atmosférica	32
3.5	Pruebas a vacío	34
3.6	Parámetros analizados	36
4.	RESULTADOS.....	37
4.1	Remoción de sólidos a presión atmosférica	37
4.3	Parámetros fisicoquímicos evaluados a presión atmosférica	40
4.3.1	Turbidez	40
4.3.2	Remoción de Color	42
4.3.3	Conductividad	44
4.3.4	pH.....	45
4.4	Remoción de sólidos a vacío	47
4.5	Parámetros fisicoquímicos evaluados a vacío	50
4.5.1	Remoción de Turbidez a vacío.....	50
4.5.2	Remoción de Color a vacío	52
4.5.3	Conductividad	54
4.5.4	pH.....	56
4.6	Selección de la tela con pruebas realizadas a vacío	57
5.	CONCLUSIONES	63
6.	Bibliografía	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Distribución global del agua en el mundo.....	1
Figura 2.1 Etapas básicas para el manejo de desechos de una planta potabilizadora de agua.	13
Figura 2.2 Métodos de deshidratación convencionales.....	14
Figura 2.3 Lecho de filtración de partículas sólidas.....	16
Figura 2.4 Esquema de centrífuga horizontal de tornillo.	16
Figura 2.5 Esquema de filtro de vacío típico.	17
Figura 2.6 Esquema de filtro prensa de bandas.....	18
Figura 2.7 Esquema de filtro prensa de placas y marcos.....	19
Figura 2.8 Aparato de filtración de laboratorio.....	20
Figura 3.1 Montaje de las pruebas a presión atmosférica.....	33
Figura 3.2 Montaje de pruebas a vacío	35
Figura 4.1 Remoción de Sólidos para diferentes materiales filtrantes.....	37
Figura 4.2 Evaluación de caolín como filtro ayuda	39
Figura 4.3 Remoción de Turbidez	41
Figura 4.4 Remoción de color	43
Figura 4.5 Remoción de Conductividad	44
Figura 4.6 Imágenes de los diferentes medios filtrantes	47
Figura 4.7 Remoción de sólidos a vacío para tela 1 y tela 2	49
Figura 4.8 Remoción de Turbidez a vacío para tela 1 y tela 2	51
Figura 4.9 Remoción de color a vacío para tela 1 y tela 2.	53
Figura 4.10 Conductividad a vacío para tela 1 y tela 2.....	55

Figura 4.11 Filtración a vacío (50.79 kN/m ²), C ₀ , 10% caolín a T=21.5 °C. t/V vs V.....	58
---	----

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Características del caolín utilizado	31
Tabla 3.2 Nombre de las telas utilizadas.....	32
Tabla 3.3 Batería de pruebas a presión atmosférica.....	34
Tabla 3.4 Batería de pruebas a vacío	36
Tabla 3.5 Parámetros medidos al clarificado.....	36
Tabla 4.1 Valores de pH después de filtrar	46
Tabla 4.2 Valores obtenidos de pH a vacío.....	56
Tabla 4.3 Valores de tiempo (s) contra tiempo/volumen (s/m ³).....	57
Tabla 4.4 Kp/2 y B de la tela 1 y 2.....	59
Tabla 4.5 Resistencias de la torta y el material filtrante.	60
Tabla 4.6 Resistencias de la torta en pruebas a vacío	61

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Agua en el mundo

El agua cubre 75% de la superficie terrestre, de ésta, el 97.5% es agua salada y el 2.5 % restante es agua dulce. Los casquetes de hielo y los glaciares contienen el 68.7% del agua dulce, los ríos y lagos contienen tan sólo el 0.3%; el resto se encuentra como agua subterránea o encapsulada en la tierra en forma de humedad (Rodda; Shiklomanov, 2006) (figura 1.1).

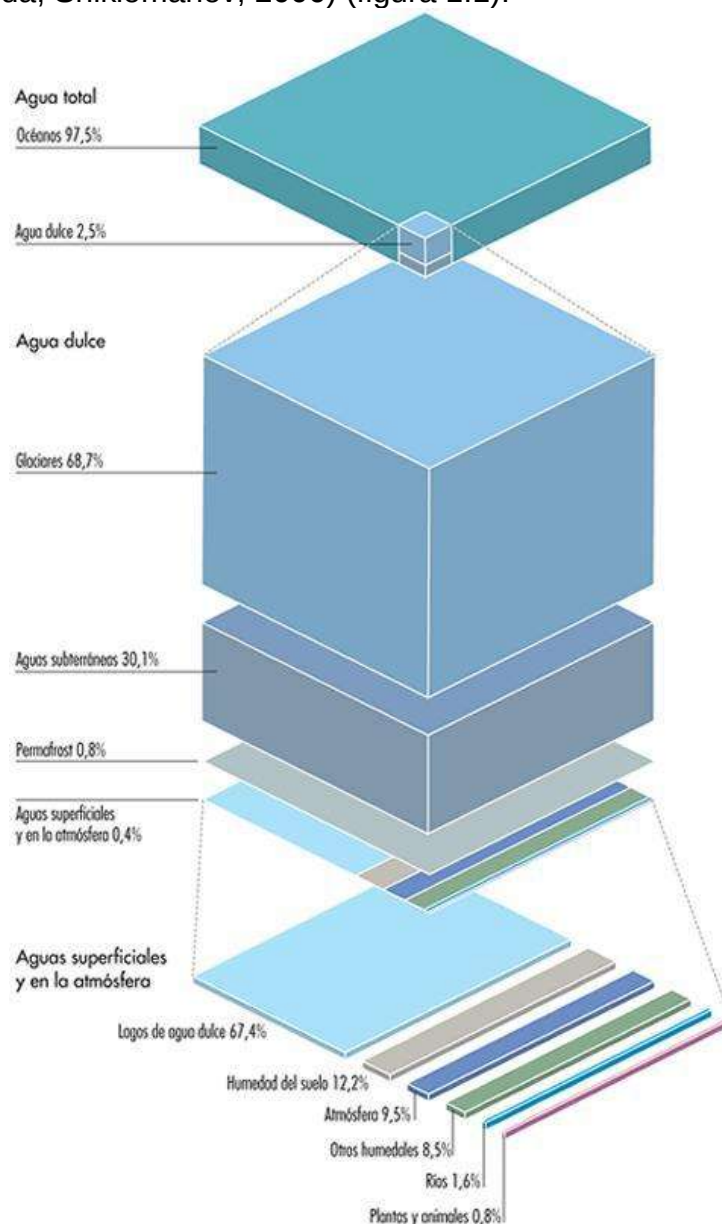


Figura 1.1 Distribución global del agua en el mundo.

Fuente: (Rodda; Shiklomanov, 2006)

El agua dulce disponible se utiliza para satisfacer las necesidades de uso y consumo humano, debido al porcentaje tan bajo de esta, se sabe que en la actualidad, más de 80 países (40% de la población mundial) sufren escasez grave de agua. La problemática podría aumentar en los próximos 50 años a medida que aumenta la población y las precipitaciones se ven perturbadas por el calentamiento global (ONU, 2014).

1.2 Agua potable

El agua tal como se encuentra en la naturaleza, muchas veces no es apta para uso y consumo humano, por ello, ésta se somete a diferentes procesos y operaciones para obtener así agua potable, que posteriormente puede ser distribuida a la población y consumida sin riesgo alguno.

Bajo esta realidad, México a través del artículo 115 constitucional, designa a los municipios la ardua tarea del suministro de agua potable a las poblaciones de nuestro país. Para ello, dentro de los ayuntamientos se constituyen organismos operadores de agua potable, alcantarillado y saneamiento, siendo éstos los responsables directos de abastecer el agua en cantidad suficiente y con una calidad que cumpla con la normativa aplicable.

Para garantizar que los niveles de calidad se mantengan, se adoptaron normas publicadas por la Organización Mundial de la Salud, donde se establecen las características del agua para uso y consumo humano, siendo para México: la MODIFICACIÓN a la NOM-127-SSA1-1994 (2000).

1.3 Fuentes de Abastecimiento

El ser humano ha encontrado dos fuentes de abastecimiento, que debido a su costo de tratamiento son las más convencionales, las aguas subterráneas y las aguas superficiales. Cada una de estas aguas posee características diferentes y para hacerlas aptas para consumo humano también requieren procesos de tratamiento diferentes.

Las aguas subterráneas se forman a partir del precipitado y la posterior percolación a través de algunas capas terrestres, confinándose, al no poder fluir por capas no permeables. Esto hace que se encuentre aislada de la atmósfera, conteniendo solo iones disueltos entre los que se encuentran cationes (Calcio, Magnesio, Sodio, Potasio, Hierro y Manganeseo) y aniones (carbonatos, bicarbonatos, sulfatos y cloruros), generando un “agua dura” con conductividad elevada y alteraciones estéticas ocasionadas por el hierro y Manganeseo. Sin embargo se encuentran libres de organismos patógenos y sólidos suspendidos.

Mientras que las aguas superficiales son cualquier cuerpo de agua abierto a la atmósfera que puede fluir o permanecer en reposo como los ríos, lagunas y embalses. Estas fuentes se abastecen con la precipitación directa o por la descarga de algún manto freático, teniendo así aguas susceptibles de introducción y transportación de contaminantes. La retención del agua, como es el caso de lagos y embalses, hace que la actividad microbiana remueva material orgánico, se presenta también el proceso de sedimentación que separa el material particulado. Las superficiales generalmente no son tan duras, tienen mayor concentración de oxígeno disuelto y no contienen ácido sulfhídrico.

1.4 Procesos de Potabilización de agua

Para que el agua pueda ser consumida por el ser humano se requiere que ésta cumpla con ciertas características físicas, químicas, organolépticas, bacteriológicas y radioactivas.

La obtención de la calidad del agua apta para consumo humano requiere entonces de procesos de potabilización eficientes según la procedencia del agua cruda y de la calidad de ésta.

Cuando el agua es subterránea se tiene la cloración, y su posterior distribución a la población. Si se habla de embalses de excelente calidad solo se adiciona un sistema de filtración y una post-cloración. Si el agua es de un pozo poco profundo

posiblemente contenga Fe suspendido y para ello se usa: aireación, filtración y finalmente cloración. La aireación permite eliminar los sabores, olores y el Fe.

En la actualidad la calidad de las aguas subterráneas suelen contener sólidos suspendidos, lo que origina el uso recurrente de un proceso en donde se tiene la participación de dispositivos de mezclado rápido, seguidos de un floculado de mezclado lento, un estanque de sedimentación en donde se presenta el asentamiento de la mayor parte de los sólidos floculados, finalmente se tiene la filtración y cloración.

1.5 Calidad del agua de la presa de Cointzio.

El agua de la presa de Cointzio tiene características que ninguna otra presa del país posee, esto se debe al tipo de sólido que contiene esta agua, que es una arcilla ferruginosa en estado coloidal (González, 2012).

Se estimó el tratamiento necesario del agua de acuerdo con las características obtenidas de la misma almacenada en la presa de Cointzio. Se tienen reportes con los siguientes valores:

Turbiedad: 100-2500 unidades Jackson.

Color: 3500-600 unidades en la escala Pt-Co.

pH: 7.2-7.8.

Dureza: 33-76 mg/L.

1.6 Proceso de potabilización de agua en “Vista Bella”

La Presa de Cointzio abastece a la planta potabilizadora Vista Bella, donde se realiza el proceso de potabilización para de ahí enviarse el agua a la ciudad. Las plantas potabilizadoras que operan en Morelia son administradas por el OOAPAS. Existen dos plantas: la planta potabilizadora Vista Bella y la planta potabilizadora Mintzita; abastecen una parte de la ciudad. El resto depende de pozos profundos, distribuidos en la ciudad. La planta Vista Bella abastece al 21% de la ciudad

mientras que la planta Mintzita abastece al 35% de la ciudad y el resto depende de los llamados "pozos profundos" (Castillo, 2012).

La planta Vista Bella lleva a cabo el proceso de potabilización mediante las etapas siguiente (González, 2012):

Cribado

Coagulación

Floculación

Sedimentación

Desinfección

Filtración

Almacenamiento y distribución

El sulfato de aluminio, comúnmente llamado alumbre, es el coagulante primario y es el producto utilizado para la desestabilización de las partículas suspendidas en el agua o coloides, que se consigue especialmente por medio de la neutralización de sus cargas eléctricas generalmente negativas, formando un precipitado.

Se utiliza sulfato de aluminio líquido, el cual es agregado conjuntamente con un polímero catiónico que disminuye la cantidad necesaria del sulfato de aluminio, para llevar a cabo la coagulación; esto se debe a que si se agrega demasiado sulfato de aluminio, el agua clara que va a dar a la ciudad se encontrará con residuos de aluminio. Se agregan en promedio 54ppm de sulfato de aluminio y 1.2ppm de polímero catiónico.

El sulfato de aluminio en solución se agrega directamente a la corriente de agua cruda proveniente de la presa y va a dar a las cajas de mezcla rápida o coaguladores en cada tanque sedimentador aprovechando la turbulencia del canal y su velocidad para la mezcla. Teniendo en cuenta que la neutralización de los

coloides es el principal objetivo que se pretende en el momento de la introducción del coagulante, es conveniente que el reactivo utilizado (sulfato de aluminio) se difunda con la mayor rapidez posible.

El coagulante introducido da lugar a la formación del floculo, pero es necesario aumentar su volumen, su peso y sobre todo su cohesión. Para esto se usan ciertos productos llamados floculantes, llamadas también ayudantes de coagulación; son productos destinados a favorecer cada una de estas operaciones. La acción se ejerce al nivel de la velocidad de reacción (floculación más rápida) o a nivel de las características del floculo (más pesado, más voluminoso y más coherente).

La sílice activada fue el primer floculante que se empleó y sigue siendo, en la actualidad, el que mejores resultados puede dar, principalmente si se utiliza conjuntamente con sulfato de aluminio. En la planta se introduce la sílice activada antes coagulante, en un punto común, a la entrada del agua a la planta, le da al floculo más peso y cohesión y ayuda a eliminar color.

El agua, después de pasar por la caja de mezcla rápida, llega a la cámara de floculación, en donde recibe una agitación mecánica lenta para favorecer el crecimiento del floculo. De esta parte, el agua pasa al sedimentador de flujo semivertical como una corriente descendente, imprimiéndole al floculo la dirección adecuada con el objeto de que se deposite en el fondo. El agua clarificada asciende y es recogida a través de una serie de canaletas rectangulares instaladas en la superficie del tanque.

Los lodos sedimentables en el tanque son purgados cada 8 horas (45min por purga) de manera hidráulica a través de una serie de válvulas operadas manualmente que se encuentran instaladas en el fondo de estos tanques. Actualmente estos lodos no reciben tratamiento alguno y son enviados al drenaje municipal que va a dar al río Chiquito.

El agua clarificada que produce cada uno de los tanques los tanques es vertida en un canal general afluente hacia los filtros. Antes de llegar a los filtros entra a un tanque en donde se decanta el excedente (si hay) al drenaje municipal.

Debido a que el sulfato de aluminio reacciona con la alcalinidad del agua, se tiene un descenso en el pH ($\text{pH}=6$), por lo cual es necesario agregar cal química para ajustar el pH y llevarlo al punto neutro ($\text{pH}=7$). Es precisamente antes de entrar a los filtros donde se agrega la cal química y es en este punto donde se aplica el desinfectante, se aplica cloro oxidante de materia orgánica. Se agregan 2ppm de cloro en solución.

El cloro va a existir en el agua como ácido hipocloroso y como iones hipoclorito y se define como cloro libre disponible 1ppm. Este canal se conecta a los filtros a través de una tubería de 24", el agua se distribuye en los filtros a través de una serie de líneas instaladas en cada uno de ellos. Los filtros se denominan como filtros rápidos de arena (antracita)

La filtración tiene la función de separar a los sólidos suspendidos, microflóculos e incluso coloides presentes en el agua al pasarlos por un medio poroso y que no fueron eliminados en el proceso de sedimentación por diversos factores. Los filtros reciben el agua por la parte superior del lecho filtrante, con lo cual se tiene un flujo descendente a través del material poroso, debido a esto las partículas son retenidas en el lecho filtrante.

La retención paulatina de las partículas en el lecho se debe a que van ocupando los espacios libres al pasar el agua con los sólidos. Cuando ocurre este fenómeno se hace necesario lavar el filtro (retrolavarlo), para esto se utiliza un tanque con capacidad de 400m³, ubicado en la parte alta de la planta, se invierte la dirección del flujo de agua en el filtro, con esto se retiran las impurezas del lecho y se vierten en unas canaletas instaladas en cada filtro, donde posteriormente son enviadas al drenaje. Se usan en promedio 180m³ de agua limpia en cada operación de lavado. Las aguas claras filtradas que salen de cada unidad recorren la galería hasta llegar a los tanques de regularización, de donde por gravedad se distribuyen a la ciudad.

Se cuenta con un pequeño cárcamo en donde se aplica energía de bombeo para lograr hacer llegar el agua potable a la parte alta de la ciudad.

1.7 Caolín

Los cerámicos incluyen un amplio rango de productos en los cuales el caolín es utilizado. Estos incluyen vajillas, sanitarios, azulejo, porcelana eléctrica, cerámica y refractarios.

Los caolines como principal ingrediente en los principales productos cerámicos. El término cerámico se refiere a la manufactura de productos de materiales de barro mediante la aplicación de altas temperaturas. Las propiedades de los cerámicos de los materiales arcillosos son variables dependiendo de la composición de la arcilla mineral y sus propiedades como son distribución de tamaño de partícula, presencia de materia orgánica y la composición del mineral no arcilloso (Olvera & Hernández, 2014).

1.8 JUSTIFICACIÓN.

Las aguas residuales generadas en las plantas potabilizadoras de nuestro país generalmente no son sometidas a procesos de tratamiento que ayuden a disminuir los efectos secundarios que éstas provocan.

La planta potabilizadora “Vista Bella” ubicada en Morelia, tiene una corriente de agua residual, generada en el proceso de sedimentación, la cual se descarga cada ocho horas al río Chiquito de Morelia.

Dicha corriente residual contiene arcilla y agentes coagulantes desprendidos del proceso de potabilización, lo cual causa efectos adversos en el cuerpo receptor (río Chiquito de Morelia), tales como un pH de 6 y un gran contenido de sólidos. Un pH ácido genera una disminución en la capacidad metabólica de los microorganismos, en consecuencia una disminución de su capacidad de biodegradación.

Lo sólidos suspendidos generan azolvamiento del río además de la disminución en la capacidad de captación y una menor solubilidad del oxígeno en el agua.

Para que se pueda llevar a cabo la separación del material arcilloso del agua residual mediante el proceso de filtración, se requiere encontrar un material filtrante que retenga los sólidos arcillosos presentes en el agua residual de la planta potabilizadora “Vista Bella”, sin embargo, al ser muy pequeño el tamaño de aglomerado de dichos sólidos, se requiere de un material con un tamaño de poro muy pequeño, debido a esto, el costo del material aumenta, además se presenta el problema de que el material se tapa demasiado rápido y no permite llevar a cabo una buena separación.

En el presente trabajo se adicionó un caolín al agua residual de la planta potabilizadora para hacer crecer el tamaño de aglomerado y mejorar la separación de la arcilla presente mediante el proceso de filtración.

Lo anterior con el objetivo de obtener un agua libre de sólidos que pueda recircularse en el proceso de potabilización y que debido a las propiedades del

caolín, al final del proceso se forme con la arcilla una mezcla que sea útil para la elaboración de materiales de alfarería y/o construcción.

1.9 HIPÓTESIS

Mediante la adición de caolín, se obtendrán mayores tamaños de aglomerado de la arcilla presente en el agua residual de una planta potabilizadora, lo cual producirá una mayor capacidad de remoción mediante el proceso de filtración.

1.10 OBJETIVO GENERAL

Determinar la capacidad de remoción de los sólidos presentes en el agua residual de una planta potabilizadora, mediante la adición de caolín como filtro ayuda en el proceso de filtración.

1.11 OBJETIVOS PARTICULARES

1. Determinar la capacidad de remoción de sólidos, con diferentes materiales filtrantes y diferentes concentraciones de caolín, para una misma concentración de sólidos arcillosos en el agua residual.
2. Determinar el mejor material filtrante, con diferentes concentraciones de caolín, para diferentes concentraciones de sólidos de agua residual trabajando a vacío.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Agua Residual de las Plantas Potabilizadoras

En las plantas potabilizadoras se remueven los sólidos suspendidos, coloidales y en algunos casos, sólidos disueltos en el agua para hacerla potable, generando lodos o aguas residuales. Éstos tienen una gran variedad de características, debido a que cada planta de potabilización toma el agua de diferentes fuentes y dichas fuentes presentan diferentes peculiaridades.

2.2 Fuentes de Generación

La generación de agua residual de una planta potabilizadora, así como sus características y cantidades, están en función del tipo de tratamiento aplicado, de la composición del agua cruda y de la calidad del producto.

En general, el agua residual de una planta potabilizadora, proviene de los sedimentadores y de la operación de lavado de los filtros. (Cabezas Yanez, 2011)
Dichas aguas residuales están constituidas principalmente de:

- Materias finas o coloidales en suspensión como partículas de arena, arcilla y limo, sedimento, materia orgánica e inorgánica finamente dividida, algas, plancton y otros organismos microscópicos, como bacterias y virus, causantes de la turbiedad.
- Los residuos de los productos químicos utilizados para el proceso de tratamiento.

2.3 Consideraciones Ambientales

La descarga del agua residual de las plantas potabilizadoras sobre ríos y lagos conduce a la formación de depósitos o bancos de lodos en las zonas de baja

velocidad de flujo. Dichos depósitos cubren a los organismos bénticos y alteran la cadena alimenticia de los peces.

Los sólidos suspendidos presentes en las aguas residuales de las plantas potabilizadoras provocan una disminución de la solubilidad del oxígeno en el agua y una obstrucción de la luz solar. Las algas se ven directamente afectadas en la producción de oxígeno por la cantidad de luz recibida, trayendo consigo un efecto adverso también en las bacterias encargadas de la degradación de la materia orgánica presentes en las aguas debido a que estas necesitan oxígeno para su metabolismo (bacterias aeróbicas).

Los lodos reducen la calidad estética de la fuente receptora al aumentar la turbiedad del agua. El aumento de la turbiedad puede disminuir la actividad fotosintética, además de que un incremento de sólidos suspendidos y de turbiedad hacen perder el valor recreacional del agua y su uso para esparcimiento.

La descarga de aguas de lavado de filtros conlleva el riesgo de contaminación bacterial patogénica y de aumento en el crecimiento microbial del agua. El agua puede ser origen y vehículo de enfermedades, las cuales suelen clasificarse en las de origen biológico-infeccioso y las producidas por agentes químicos. La primera suele presentarse en tiempos relativamente cortos mientras que la segunda, la detección de la enfermedad es un tiempo largo.

2.4 Procesos de Tratamiento de aguas residuales

El manejo de lodos o aguas residuales de las plantas potabilizadoras convencionales considera típicamente cinco etapas (Separación, recolección, concentración, tratamiento y disposición) como se observa en la figura 2.1. De estas, la etapa cuatro corresponde al tratamiento, el cual consiste en la deshidratación.

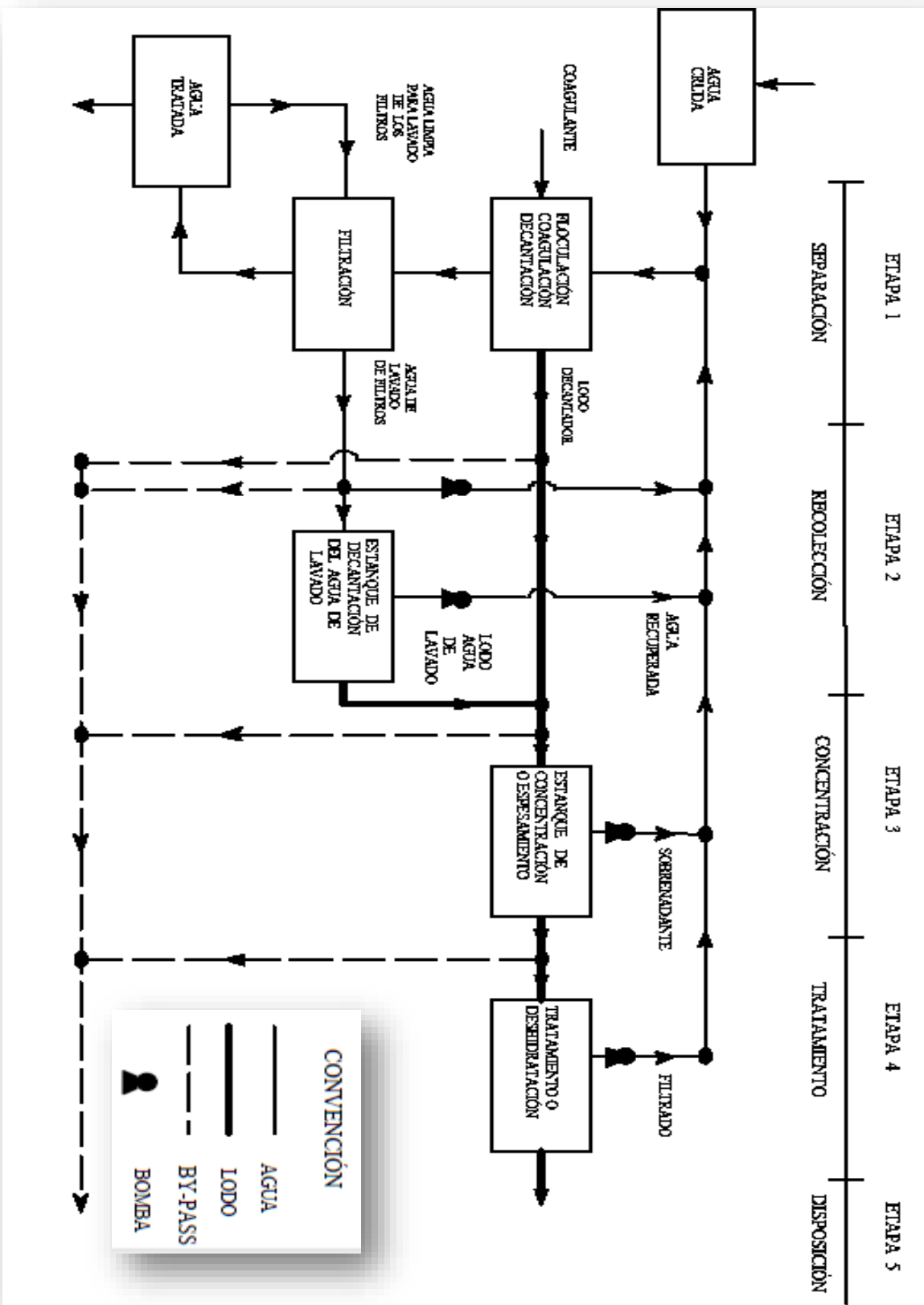


Figura 2.1 Etapas básicas para el manejo de desechos de una planta potabilizadora de agua.

Fuente: (Garcés Arancibia, Díaz Aguirre, & Dellepiane Navarro, 1996)

2.5 Métodos de deshidratación

Los métodos de deshidratación permiten la concentración de los sólidos presentes en el agua reduciendo el flujo residual mediante la separación de ésta. Los sistemas de secado natural y sistemas de deshidratación mecánica comprenden las opciones para esta operación. Los métodos más comúnmente utilizados para la deshidratación de aguas residuales se presentan en la figura 2.2.

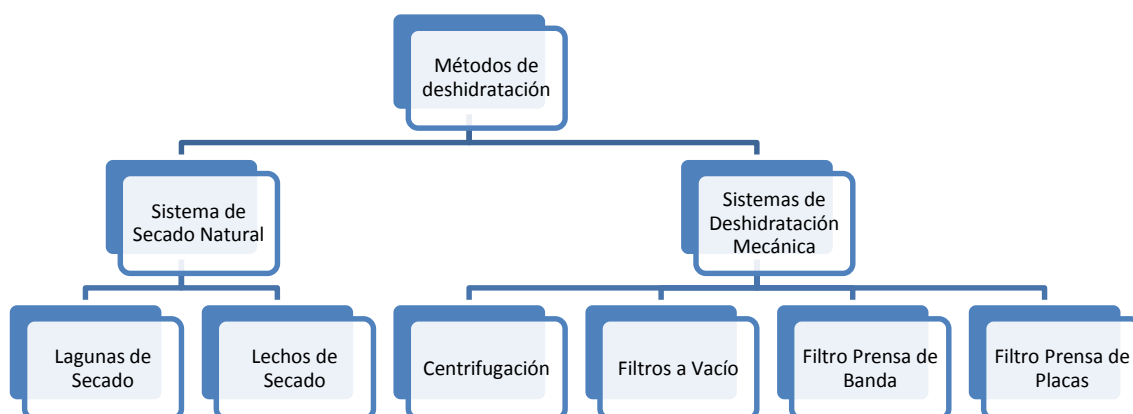


Figura 2.2 Métodos de deshidratación convencionales

Dentro de los sistemas de secado natural se encuentran a las lagunas de secado y a los lechos de secado, los cuales tienen como principal ventaja el costo de su implementación siempre que se disponga del área suficiente a bajo precio. Tienen un bajo consumo de energía y de productos químicos, una baja sensibilidad a las variaciones cuantitativas y cualitativas del lodo y simplicidad de operación. Son apropiados para plantas pequeñas o aisladas dadas sus altas exigencias de superficie. Algunas desventajas son una alta dependencia de las condiciones climáticas y un alto requerimiento de mano de obra para la remoción del lodo.

Los sistemas de deshidratación mecánica comprenden centrifugación, filtros a vacío, filtros prensa de banda y filtros prensa de placas, tienen como ventajas

principales el necesitar áreas menores, independencia de las condiciones meteorológicas y minimización de ciertos impactos ambientales. Entre sus desventajas se encuentran el mayor consumo de energía, la necesidad de utilizar acondicionantes químicos adecuados, una alta sensibilidad a las variaciones cualitativas y cuantitativas del lodo, la necesidad de un lavado frecuente de las telas filtrantes y otros equipos en contacto directo con el lodo, así como los eventuales problemas de ruido y vibraciones excesivas provocadas por el funcionamiento de las bombas y motores (Cabezas Yanez, 2011). Cada equipo tendrá una eficiencia y carga de aplicación recomendada que dependerá de la naturaleza del lodo, el grado de acondicionamiento químico, la frecuencia de utilización, la mantención y el producto final deseado.

2.5.1 Lagunas de secado

En las lagunas de secado, el tratamiento de los lodos se realiza por la separación del sobrenadante y las aguas lluvias principalmente por la evaporación. La carga óptima de aplicación de sólidos (kg/m^2) está en función de la concentración de los mismos y la profundidad óptima de aplicación del lodo en el lecho. La carga de aplicación típica es de 40 kg/m^2 para zonas lluviosas y 80 kg/m^2 en regiones secas (Garcés Arancibia, Díaz Aguirre, & Dellepiane Navarro, 1996).

2.5.2 Lechos de secado

En los lechos de secado (figura 2.3), la remoción de agua se realiza por los mismos mecanismos que en las lagunas, agregándose el drenaje gravitacional a través de arena, grava y tubería de recolección. Su diseño corresponde con profundidades de aplicación de 0.3 a 0.9 m. Para lodos sin acondicionar, se han aplicado cargas de 15 a 20 litros de lodo/ $\text{m}^2/\text{día}$, con un ciclo de secado de 3 a 4 días.

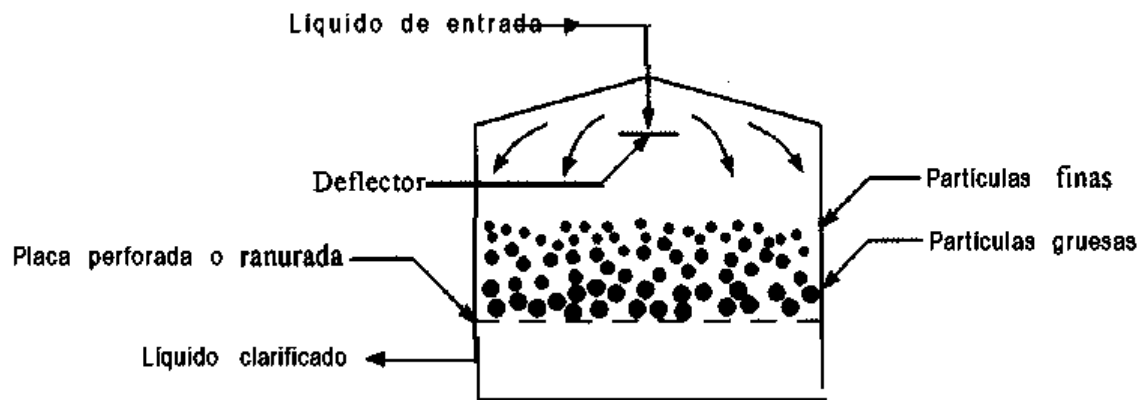


Figura 2.3 Lecho de filtración de partículas sólidas.

FUENTE: (Geankoplis, 1998)

2.5.3 Centrífugas

En las centrífugas (figura 2.4), se utiliza esta fuerza, a la que el lodo está sometido dentro de un recipiente cilindro-cónico que gira a alta velocidad para separar los sólidos de la fase líquida. La fuerza actúa desde el centro hacia las paredes causando la sedimentación de las partículas junto a estas y la separación de la fracción líquida menos densa, en la parte interna. La remoción de los sólidos se hace a través de un tornillo helicoidal sin fin, que gira dentro del rotor a una velocidad distinta.

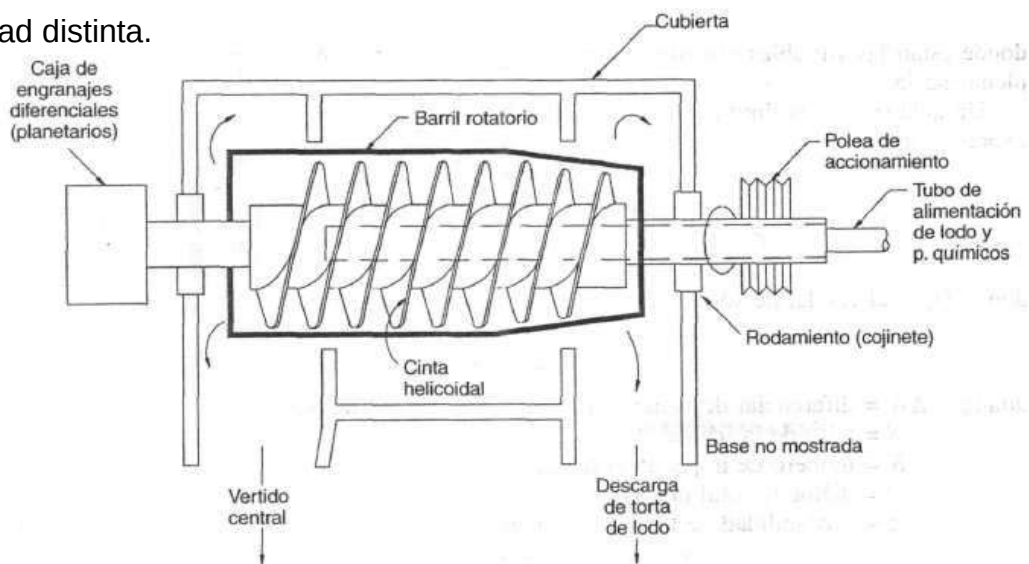


Figura 2.4 Esquema de centrífuga horizontal de tornillo.

FUENTE: (Cabezas Yanez, 2011)

2.5.4 Filtros a vacío

En los filtros al vacío (figura 2.5), la remoción del agua contenida en el lodo se realiza por un vacío creado dentro de un cilindro recubierto externamente con un tejido filtrante. Al girar parcialmente sumergido en un recipiente con lodo acondicionado, el vacío provoca un flujo de líquido hacia el interior del cilindro, permitiendo la retención de las partículas mayores que los poros del material filtrante y además de las partículas de tamaño inferior que se adhieren al material ya filtrado, la torta, en la superficie externa del tambor.

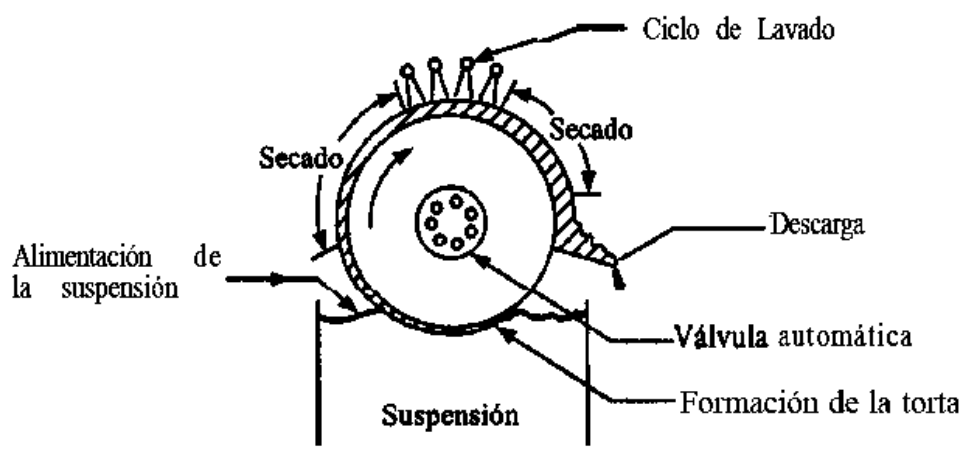


Figura 2.5 Esquema de filtro de vacío típico.

FUENTE: (Geankoplis, 1998)

2.5.5 Filtros prensa de banda

En los filtros prensa de banda (figura 2.6), la remoción del agua incluye tres etapas: un acondicionamiento químico, usualmente con polielectrolito orgánico; un drenaje y espesamiento gravitacional a una consistencia no fluida; y posteriormente, la compresión del lodo a baja presión entre dos bandas sin fin que atraviesan un conjunto de rodillos ajustables de variados diámetros.

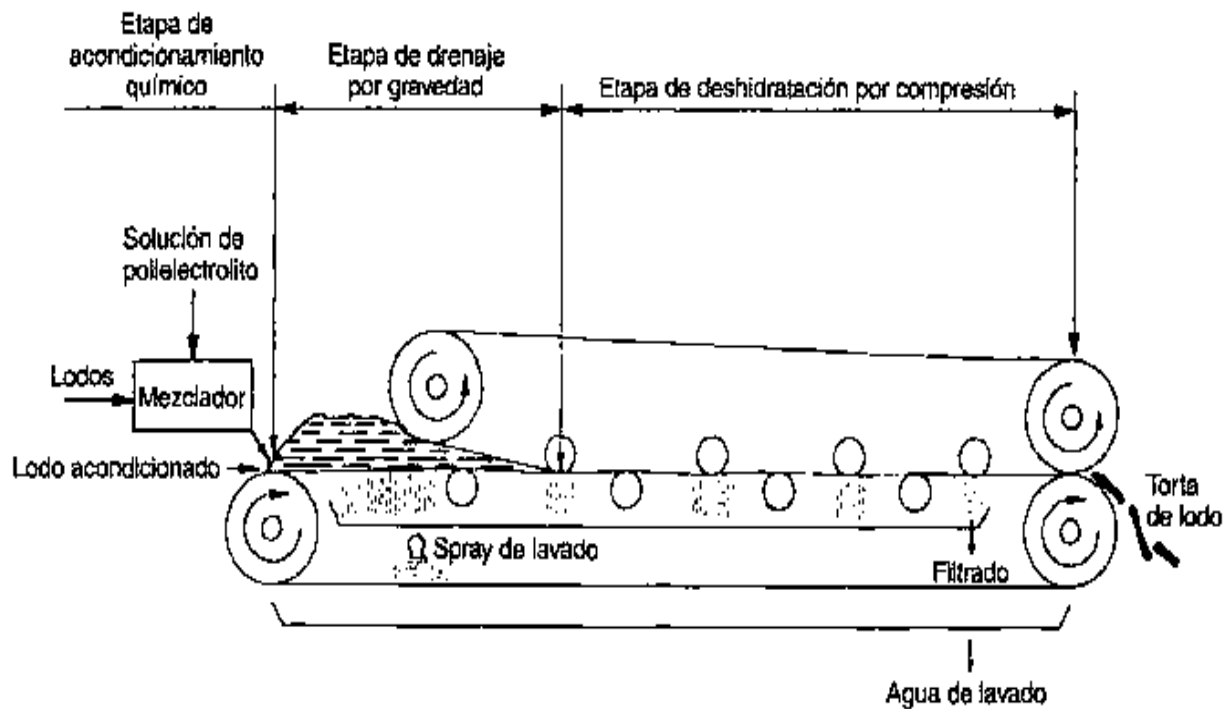


Figura 2.6 Esquema de filtro prensa de bandas.

FUENTE: (Cabezas Yanez, 2011).

2.5.6 Filtros prensa de placas

En los filtros prensa de placas (figura 2.7) la remoción se realiza por medio de un bombeo al interior de varias cámaras recubiertas con un tejido filtrante, definidas entre dos placas adyacentes. Al continuar bombeando, se forza un flujo a través de la torta que se forma en el interior de las cámaras por la acumulación de sólidos en la superficie del tejido.

Cuando los sólidos y el agua remanente llenan el volumen disponible, el bombeo se detiene, la prensa se abre permitiendo la salida de cada una de las tortas de lodo deshidratado contenidas en las cámaras, se ensambla la prensa y se vuelve a iniciar el ciclo.

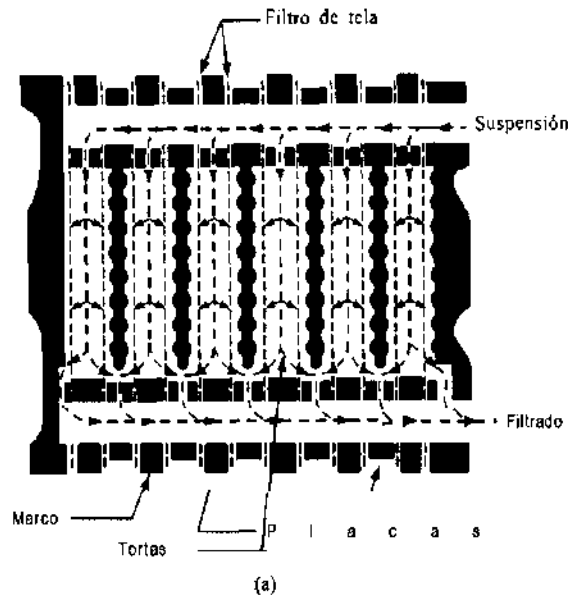


Figura 2.7 Esquema de filtro prensa de placas y marcos.

FUENTE: (Geankoplis, 1998).

2.6 Medios filtrantes y ayudas de filtración

Los medios filtrantes permiten la retención de sólidos sobre su superficie durante la filtración. Éstos deben producir un clarificado transparente, los poros no se deben obstruir con facilidad, además debe permitir la extracción de la torta sin dificultades, resistencia a no rasgarse y a los productos químicos. Los medios filtrantes de uso común en la industria son las telas gruesas o sargas, tejidos pesados, fibra de vidrio, papel, fieltro de celulosa, telas metálicas, de lana, de nylon, de dracrón y otros tejidos sintéticos. Las fibras de hilacha de materiales naturales son más eficaces para partículas finas que las fibras plásticas metálicas (Geankoplis, 1998)

Se usan ayudas de filtración para mejorar el mecanismo de filtración. Con esto se obtiene un aumento en la porosidad de la torta y se reduce la resistencia durante la operación. Se suele usar tierras diatomáceas o kieselfuhr, que están constituidos principalmente por sílice no compresible, también es de uso común la celulosa de madera, asbesto y otros sólidos porosos inertes.

2.7 Teoría básica de la filtración

En la filtración, las partículas suspendidas en un fluido, ya sea líquido o gas, se separan mecánica o físicamente usando un medio poroso que retiene las partículas en forma de fase separada que permite el paso del filtrado sin sólidos.

El equipo industrial de filtración difiere del de laboratorio únicamente en lo que respecta a la cantidad de materia que se maneja y en la necesidad de operar a costos bajos. En la figura 2.8 se muestra un aparato de filtración típico del laboratorio, que es un embudo de Büchner. El flujo del líquido a través de la tela o papel filtro se produce debido al vacío en el extremo de salida. La suspensión consta del líquido y las partículas suspendidas. Las pequeñas aberturas de los poros de la tela bloquean el paso de las partículas. Se usa un soporte con orificios bastante grandes, sobre el cual se apoya la tela filtrante.

Las partículas sólidas se acumulan en forma de una torta de filtrado a medida que se verifica el proceso. Esta torta también actúa como filtro de las partículas suspendidas. La resistencia al flujo aumenta a medida que la torta crece.

Las filtraciones comerciales cubren una amplia gama de aplicaciones. El fluido puede ser un gas o un líquido. Las partículas sólidas suspendidas pueden ser muy finas o bastante grandes, muy rígidas o plásticas, esféricas o de forma muy irregular, agregados o partículas individuales. El producto valioso puede ser el filtrado sin sólidos o la torta sólida.

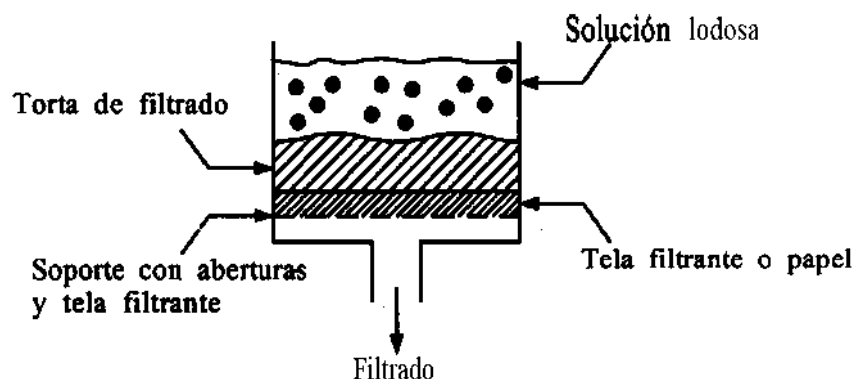


Figura 2.8 Aparato de filtración de laboratorio

Fuente: (Geankoplis, 1998)

2.7.1 Caída de presión del fluido a través de la torta

Para el flujo laminar en un lecho empacado con partículas, la relación de Carman-Kozeny ecuación (1) se ha demostrado que es aplicable a la filtración.

$$-\frac{\Delta p_c}{L} = \frac{k_1 \mu v (1 - \varepsilon)^2 S_0^2}{\varepsilon^3} \quad (1)$$

Donde:

k_1 = constante (para partículas aleatorias, de tamaño y forma definidos)

μ = viscosidad del filtrado, Pa*s

v =velocidad lineal basada en el área de filtración

ε = porosidad de la torta

L = espesor de la torta, m

S_0 = área superficial específica de las partículas en m² de área por m³ de volumen de partículas sólidas, m²/m³

Δp_c = caída de presión en la torta, N/m²

La velocidad lineal es:

$$v = \frac{dV/dt}{A} = \frac{m^3/s}{m^2} = \frac{m}{s} \quad (2)$$

Donde:

dV = cambio de volumen de filtrado en función del tiempo de filtración

dt = cambio en el tiempo de filtración

A =área de filtración

El espesor de la torta L puede relacionarse con el volumen de filtrado V , por medio de un balance de materia. Si c_s es kg de sólidos/ m^3 de filtrado, el balance de materia será:

$$LA(1 - \varepsilon)\rho_p = c_s(V + \varepsilon LA) \quad (3)$$

ρ_p = densidad de las partículas sólidas de la torta, kg/m^3

c_s = concentración de sólidos en la alimentación, Kg sólidos/ m^3 de filtrado

El término final de la ecuación 3 es el volumen del filtrado retenido en la torta. Éste suele ser pequeño y se desprecia. Combinado la ecuación 1 y 2 se tiene una expresión para calcular la velocidad lineal basada en el área de filtración:

$$v = \frac{dV}{A dt} = \frac{-\Delta p_c}{\frac{k_1(1-\varepsilon)S_0^2}{\rho_p \varepsilon^3}} = \frac{-\Delta p_c}{\alpha \frac{\mu c_s V}{A}} \quad (4)$$

Donde α es la resistencia específica de la torta:

$$\alpha = \frac{k_1(1 - \varepsilon)S_0^2}{\rho_p \varepsilon^3} \quad (5)$$

Para la resistencia del medio filtrante, por analogía con la ecuación 4, se puede escribir la expresión:

$$\frac{dV}{A dt} = \frac{-\Delta p_f}{\mu Rm} \quad (6)$$

Donde:

Rm = resistencia del medio filtrante, m^{-1}

Puesto que las resistencias de la torta y del medio filtrante están en serie, se puede combinar las ecuaciones 4 y 6.

$$\Delta p = \Delta p_f + \Delta p_c \quad (7)$$

$$\frac{dV}{A dt} = \frac{-\Delta p}{\mu \left(\frac{\alpha c_s}{A} + R_m \right)} \quad (8)$$

Algunas veces la ecuación 8 se modifica como sigue:

$$\frac{dV}{A dt} = \frac{-\Delta p}{\frac{\mu \alpha c_s}{A} (V + V_e)} \quad (9)$$

Donde V_e es el volumen de filtrado necesario para formar una torta de filtración ficticia cuya resistencia sea igual a R_m .

2.7.2 Resistencia específica de la torta

La ecuación 5 indica que la resistencia específica de la torta está en función de la fracción de espacios huecos ϵ y de S_0 , también está en función de la presión pues ésta puede afectar ϵ .

Si α es independiente de $-\Delta p$, los lodos son incompresibles. Por lo general, α aumenta con $-\Delta p$, pues la mayoría de las tortas son algo comprimibles. Una ecuación empírica de uso común es:

$$\alpha = \alpha_0 (-\Delta p)^s \quad (10)$$

Algunas veces se usa la siguiente relación:

$$\alpha = \alpha_0 [1 + \beta (-\Delta p)^s] \quad (11)$$

Los datos obtenidos en experimentos de filtración suelen ser poco reproducibles. El estado de aglomeración de las partículas en la suspensión puede variar y afectar la resistencia específica de la torta.

2.7.3 Ecuaciones de filtración para procesos a presión constante

Con frecuencia, las filtraciones se llevan a cabo en condiciones de presión constante. La ecuación 8 se puede invertir y reordenar para obtener

$$\frac{dt}{dV} = \frac{\mu\alpha c_s V}{A^2(-\Delta p)} + \frac{\mu R m}{A(-\Delta p)} \quad (12)$$

En donde se tiene:

$$Kp = \frac{\mu\alpha c_s}{A^2(-\Delta p)} \quad (13)$$

$$B = \frac{\mu R m}{A(-\Delta p)} \quad (14)$$

Entonces:

$$\frac{dt}{dV} = K_p V + B \quad (15)$$

Para presión invariable, α constante y una torta incompresible, V y t son las únicas variables de la ecuación 15. Integrando para obtener el tiempo de filtración t en s.

$$\int_0^t dt = \int_0^V (K_p v + B) dV \quad (16)$$

$$t = \frac{K_p V^2}{2} + BV \quad (17)$$

$$\frac{t}{V} = \frac{K_p V}{2} + B \quad (18)$$

Para evaluar la ecuación 16 es necesario conocer α y R_m . Esto se puede hacer obteniendo los datos de V recogidos en diferentes tiempos t .

2.6 Disposición

La disposición final de los residuos generados en una planta potabilizadora, forman parte del diseño ingenieril de ésta, sin embargo, en algunos países se suele descargar el agua residual a los cuerpos de agua naturales. Otros países en cambio han aportando conocimiento sobre la disposición de estos residuos.

Algunos tratamientos de disposición consideraran la adición de los residuos al suelo, en los cuales, el lodo se riega o incorpora dentro de la capa superficial de suelo para la descomposición, estabilización e inmovilización de sus constituyentes. El lodo se ha aplicado a tierras de cultivos, áreas de minería abandonadas y como material de cobertura en rellenos sanitarios (Romero, 1999). De esta manera se obtiene la disposición final del lodo y además, se modifican las propiedades del suelo y se reciclan materiales del lodo.

Los lodos de las plantas potabilizadoras de agua pueden modificar favorablemente el pH y la capacidad de retención de agua del suelo, aunque tienen poco valor fertilizante.

2.7 Aspectos fisicoquímicos del agua

La presencia de sustancias químicas disueltas e insolubles en el agua, que pueden ser de origen natural o antropogénico, definen su composición física y química.

2.7.1 Turbidez

La turbidez de una muestra de agua es la medida de la interferencia que presentan las partículas en suspensión al paso de la luz. Se debe a la arcilla, al lodo, a las partículas orgánicas, a los organismos microscópicos y a cuerpos similares que se encuentran suspendidos en el agua.

2.7.2 Sólidos Totales

Corresponden al residuo remanente después de secar una muestra de agua. Equivalen a la suma del residuo disuelto y suspendido.

Equivalencias:

Sólidos totales = sólidos suspendidos + sólidos disueltos

Sólidos totales = sólidos fijos + sólidos volátiles

Sólidos disueltos o residuos disueltos. Mejor conocidos como sólidos filtrables, son los que se obtienen después de la evaporación de una muestra previamente filtrada.

Sólidos en suspensión. Corresponden a los sólidos presentes en un agua residual, exceptuados los solubles y los sólidos en fino estado coloidal. Se considera que los sólidos en suspensión son los que tienen partículas superiores a un micrómetro y que son retenidos mediante una filtración en el análisis de laboratorio. Sólidos volátiles y fijos. Los sólidos volátiles son aquellos que se pierden por calcinación a 550 °C, mientras que el material remanente se define como sólidos fijos. La mayor parte de los sólidos volátiles corresponden a material orgánico. Los sólidos fijos corresponden, más bien, a material inorgánico.

2.7.3 Color

Las causas más comunes del color del agua son la presencia de hierro y manganeso coloidal o en solución; el contacto del agua con desechos orgánicos,

hojas, maderas, raíces, etc., en diferentes estados de composición (Romero, Calidad del Agua, 1999).

Cuando hay turbidez, el agua presenta un color evidente y para obtener el color verdadero se recurre a algún mecanismo técnico. El color constituye una característica de orden estético y su acentuada concentración puede causar cierto rechazo.

2.7.4 Conductividad

La conductividad del agua es una expresión numérica de su habilidad para transportar una corriente eléctrica. La conductividad del agua depende de la concentración total de sustancias ionizadas en el agua y la temperatura a la cual se haga la determinación. El valor de la conductividad es muy usado en el análisis de agua para la obtener un estimativo rápido del contenido de sólidos disueltos (Romero, Calidad del Agua, 1999).

2.7.5 pH

La determinación de la alcalinidad total y de las distintas formas de alcalinidad es importante en los procesos de coagulación química, ablandamiento, control de corrosión y evaluación de la capacidad tampón de un agua (Romero, Calidad del Agua, 1999). La determinación de la acidez es de importancia en ingeniería sanitaria debido a las características corrosivas de las agua acidas y al costo que supone la remoción y el control de las sustancias que producen corrosión.

2.8 Estado del Arte

Uso de lodo para la elaboración de agregados para la construcción incluyendo ladrillo (Weng, Lin, & Chiang, 2003). En este estudio se evaluaron ladrillos fabricados con lodo seco proveniente de 34 plantas de tratamiento de aguas residuales en Taiwán. Con esta tecnología se logró la inmovilización de metales pesados de la matriz, oxidación de materia orgánica y reducción de patógenos

debido al proceso de cocción. El proceso de fabricación de las muestras, inició con la mezcla de diferentes proporciones de lodo. Se usó una máquina de vacío para extraer el aire contenido en la mezcla para evitar cuarteaduras durante el proceso de cocción. La mezcla fue vaciada en una serie de moldes con las siguientes dimensiones: longitud 230 mm, ancho 110 mm y espesor 60 mm. Después de 24 horas de reposo y otras 24 horas de secado a 103°C, se sometieron a un proceso de cocción en un intervalo de temperatura de 880, 920, 960 y 1000°C por 6 h y un contenido de lodo de 0, 10, 20, 30 y 40%. Este trabajo demostró las condiciones adecuadas para el uso de lodo seco como sustituto de arcilla para producir un ladrillo de calidad. La proporción de lodo en la mezcla y la temperatura de cocción son dos factores claves que afectan la calidad de los ladrillos. En conclusión, la proporción recomendada de lodo en el ladrillo es de 10%, con un contenido óptimo de humedad del 24% y una temperatura de cocción entre 880°C y 960°C.

Fabricación de materiales cerámicos para la construcción a partir de lodo generado en una estación de tratamiento de agua potable (Cerdeño del Castillo & Pérez Lorenzo, 2006). En un estudio realizado por el Departamento de Materiales de Construcción de la Asociación para la Investigación y Desarrollo Industrial de los Recursos Naturales (AITEMIN) se utilizó lodo generado en una Estación de Tratamiento de Aguas Potables en Asturias, como materia prima en la fabricación de productos cerámicos. El análisis químico y mineralógico del lodo indicó que está compuesto en un 75% de minerales arcillosos y el resto en minerales calcáreos (calcita), cuarzo y hasta 2.5% de materia orgánica. En ese estudio se elaboraron probetas con técnicas y equipos similares a los usados en la industria cerámica. Se realizaron mezclas de lodo y arcilla empleada comúnmente en la fabricación de materiales cerámicos para la construcción. Se llegó a una proporción de 2% del lodo y el resto de arcilla. Las características que cumplieron estos especímenes se muestran a continuación y cumplen con la Norma Española UNE-EN 771-1:2003 titulada: Especificaciones de piezas para fábrica de albañilería. Parte 1: Piezas de arcilla cocida.

Tabla 1.1 Especificaciones de piezas para fábrica de albañilería: Piezas de arcilla cocida (UNE-EN 771-1:2003).

Parámetro	Valores
Dimensiones (mm)	240x90x120
Densidad aparente(g/cm^3)	0.76±0.08
Densidad absoluta(g/cm^3)	1.88±0.19
Resistencia a la compresión (MPa)	6.6
Adherencia (MPa)	0.15
Absorción de agua (%)	6

(Cabezas Yanez, 2011) Realizó un estudio para el diseño de un sistema de tratamiento de lodos provenientes de la Empresa Pública de Agua Potable y Alcantarillado de la Ciudad de Santo Domingo a nivel laboratorio en el que mediante la prueba de jarras determinó al policloruro de aluminio como agente coagulante y con pruebas de sedimentación logró dimensionar el equipo que intervendría en el proceso. Realizó un análisis a los lodos coagulados concluyendo que deberían someterse a un microencapsulamiento debido a los contenidos de plomo y mercurio fuera de norma, mientras que para el clarificado determinó su descarga al alcantarillado ya que se encontraba dentro de norma. Además, el dimensionamiento de la planta se destino a tratar un caudal de 10 m³/h de lodo teniendo una descarga final de 4.58 m³/h de lodo coagulado.

(AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION , 1999) Menciona que los filtros precapa, como la tierra diatomácea u otros materiales granulares de arcilla, tienen la capacidad de remover partículas de alrededor de una micra en el proceso de filtración. Algunas de las ventajas que ofrece el uso de estas precapas incluyen un bajo costo de capital además de que no necesita un proceso preliminar de coagulación o floculación. Sus desventajas incluyen la incapacidad de manejar agua de alta turbidez, la posibilidad de que las partículas pasen a través de la precapa si el recubrimiento no fue efectivo o existió agrietamiento durante la operación, y la capacidad mínima para remover compuestos que causan color, sabor y olor.

3. METODOLOGÍA

3.1 Muestreo del agua residual

El agua residual de la planta potabilizadora “Vista Bella se descarga cada ocho horas al río Chiquito de Morelia. Dicha corriente contiene arcilla y agentes coagulantes desprendidos en las operaciones de coagulación-floculación.

Al inicio de la purga, la concentración de sólidos es elevada y va disminuyendo paulatinamente, dada la estratificación en la concentración de sólidos en la purga, fue necesario realizar la evaluación de la filtración a diferentes concentraciones de lodo, esto con el fin de establecer la dinámica de separación de los sólidos suspendidos.

Las concentraciones con las cuales se evaluó la capacidad de separación, se realizaron tomando muestra de lodo al inicio de la descarga ($C_0=49.44\text{g/L}$), ésta muestra correspondió a la de mayor concentración de sólidos, posteriormente fue llevada al laboratorio en donde se hicieron diluciones para llevar a cabo la experimentación a diferentes concentraciones: “ $C_0=49.44\text{ g/L}$ ”, “ $C_0/2 =22.04\text{g/L}$ ”, “ $C_0/4= 11.2\text{ g/L}$ ” y “ $C_0/8 =5.51\text{ g/L}$ ”.

3.2 Adición de Caolín

Como parte de la experimentación se adicionó caolín como filtro ayuda en el proceso de filtración del agua residual de la planta potabilizadora, proceso mediante el cual es posible llevar a cabo su tratamiento.

Debido a que la adición de caolín se hizo en porcentaje en peso (% W), fue necesario hacer la cuantificación de los sólidos totales contenidos en el agua residual. La determinación de éstos, se llevó a cabo de acuerdo a la norma NMX-AA-034-SCFI (2001) . Los porcentajes de caolín adicionados fueron: 5% W, 10% W y 15% W en peso, con el objetivo de que la mezcla resultante de arcilla-caolín pueda ser utilizada para la elaboración de materiales de construcción o alfarería,

la base de dicha mezcla debe ser el material arcilloso y no debe tener más del 15% de caolín.

Las características del caolín utilizado se presentan en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Características del caolín utilizado

CAOLÍN		
INFORMACIÓN GENERAL		
FAMILIA QUÍMICA: DISILICATO ALUMÍNICO HIDRATADO		
FÓRMULA: $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ó $\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$		
ANÁLISIS QUIMICO TÍPICO		
ÓXIDO DE SILICE	SiO ₂	69.33 %
ÓXIDO DE ALUMINIO	Al ₂ O ₃	19.00 %
ÓXIDO DE CALCIO	CaO	0.35 %
ÓXIDO DE SODIO	Na ₂ O	0.90 %
ÓXIDO DE POTASIO	K ₂ O	0.70 %
ÓXIDO DE TITANIO	TiO ₂	0.14 %
PROPIEDADES FÍSICAS TÍPICAS		
GRANULOMETRÍA	M-30, M-60, M-80 M-100	
HUMEDAD	8 % MÁXIMO	
PH	8.0	
PROPIEDADES FÍSICAS		
APARIENCIA	COLOR BLANCO Y/O BEIGE CLARO	
OLOR	NINGUNO	
SABOR	NINGUNO	

FUENTE: INSUMOS AGROINDUSTRIALES LA HACIENDA, S.A. DE C.V.

3.3 Medio filtrante

Se utilizaron diferentes tipos de tela como medio filtrante para determinar el nivel de tratamiento del agua residual de la planta potabilizadora por medio de la filtración. Para determinar que tipo de tela proporcionaba mejores resultados, se probaron siete telas de diferentes materiales, cada una con porosidad distinta, estos tipos de telas se eligieron ya que son empleados frecuentemente en equipos industriales de filtración.

En la tabla 3.2 se presentan los nombres de las telas utilizadas:

Tabla 3.2 Nombre de las telas utilizadas

Medio Filtrante	NOMBRE
Tela 1	100% Algodón 321
Tela 2	100% Poliéster S-22
Tela 3	Polipropileno
Tela 4	Nylon 840-466
Tela 5	Poliéster F-4629
Tela 6	P.P.-3000
Tela 7	Poliéster ahujado

3.4 Pruebas a presión atmosférica

Se realizaron pruebas de filtración en el nivel laboratorio, a presión atmosférica y a una sola concentración de sólidos en el agua residual, dichas pruebas se llevaron a cabo con las diferentes telas mostradas en la tabla 3.2 y los distintos porcentajes en peso de caolín.

El procedimiento para llevar a cabo las pruebas de filtración a presión atmosférica fue el siguiente:

1. Se prepararon 200 ml de la muestra de agua residual con la concentración de sólidos deseada ($C_0/8=5.51$ g/L).
2. Se realizó la respectiva adición del porcentaje de caolín requerido para la prueba (0% W, 5% W, 10% W o 15% W).
3. Se recortó un fragmento en forma circular con un diámetro de 9 cm de la tela a probar, como la que se observa en la figura 3.1.a.
4. Se acomodó debidamente la tela en un embudo Büchner (figura 3.1.b).
5. El embudo fue colocado sobre un matraz kitazato, con la finalidad de recolectar el filtrado como se aprecia en la figura 3.1.c.
6. Los 200 ml fueron vertidos sobre el montaje anteriormente descrito.
7. Se midió la velocidad de filtración (ml/min), con la ayuda de un cronómetro y la graduación del matraz.
8. El filtrado fue recolectado en un recipiente debidamente etiquetado para su posterior análisis.

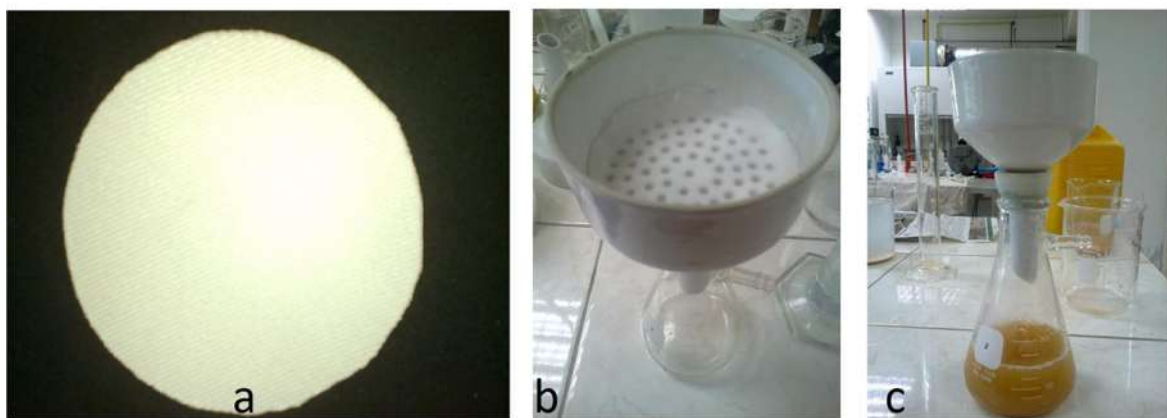


Figura 3.1 Montaje de las pruebas a presión atmosférica

El procedimiento anteriormente descrito se llevó a cabo para cada una de las pruebas que se presentan en la tabla 3.3.

Tabla 3.3 Batería de pruebas a presión atmosférica

Medio Filtrante	Pruebas a presión atmosférica con $C_0/8$ (5.51 g/L)							
	0 % W caolín		5% W caolín		10% W caolín		15% W caolín	
Tela 1	-	-	-	-	-	-	-	-
Tela 2	-	-	-	-	-	-	-	-
Tela 3	-	-	-	-	-	-	-	-
Tela 4	-	-	-	-	-	-	-	-
Tela 5	-	-	-	-	-	-	-	-
Tela 6	-	-	-	-	-	-	-	-
Tela 7	-	-	-	-	-	-	-	-

3.5 Pruebas a vacío

Una vez que se realizaron las pruebas a presión atmosférica, se seleccionaron las dos telas que presentaron mejores resultados en cuanto a retención de sólidos para posteriormente realizar pruebas a vacío y a diferentes concentraciones de sólidos en el agua residual.

El procedimiento que permitió llevar a cabo las pruebas de filtración a vacío se describe a continuación:

1. Se prepararon 200 ml de la muestra de agua residual con la concentración de sólidos deseada ($C_0=49.44$ g/L, $C_0/2 =22.04$ g/L, $C_0/4= 11.2$ g/L y $C_0/8 =5.51$ g/L).
2. Se realizó la respectiva adición del porcentaje de caolín requerido para la prueba (0% W, 5% W, 10% W o 15% W).

3. El montaje del equipo se realizó de la misma manera que el descrito en los puntos 3 al 5 de la pruebas a presión atmosférica.
4. A través de una manguera se conectaron el matraz Kitasato y la bomba a vacío (figura 3.2. a).
5. Se vertieron los 200ml de la muestra sobre el embudo.
6. Una vez formado un sello hidráulico se hechó a andar la bomba de vacío.
7. Se midió la velocidad de filtración (ml/min), con la ayuda de un cronómetro y la graduación del matraz Kitasato.
8. Mientras se media la velocidad, también se verificaba que no se rompiera el vacío (figura 3.2.b).
9. La operación terminaba con la formación de la torta sobre el medio filtrante y la disminución de la presión a vacío.
10. El filtrado fue recolectado en un recipiente debidamente etiquetado para su posterior análisis.



Figura 3.2 Montaje de pruebas a vacío

Este procedimiento aplicó para cada una de las pruebas que se observan en la tabla 3.4

Tabla 3.4 Batería de pruebas a vacío

% W de Caolín	Pruebas a vacío con los medios filtrantes de mejor desempeño			
	C ₀ /8=5.51 g/L	C ₀ /4=11.2 g/L	C ₀ /2=22.04 g/L	C ₀ =49.44 g/L
0 % W caolín	Tela 1	Tela 1	Tela 1	Tela 1
	Tela 2	Tela 2	Tela 2	Tela 2
5% W caolín	Tela 1	Tela 1	Tela 1	Tela 1
	Tela 2	Tela 2	Tela 2	Tela 2
10% W caolín	Tela 1	Tela 1	Tela 1	Tela 1
	Tela 2	Tela 2	Tela 2	Tela 2
15% W caolín	Tela 1	Tela 1	Tela 1	Tela 1
	Tela 2	Tela 2	Tela 2	Tela 2

3.6 Parámetros analizados

Los parámetros evaluados para cada filtrado recogido de las pruebas anteriormente descritas fueron: pH, conductividad, color, turbidez y determinación de sólidos, con la finalidad de determinar la calidad de cada uno de ellos. Los análisis se llevaron a cabo en base a las normas que se muestran en la tabla 3.5.

Tabla 3.5 Parámetros medidos al clarificado

Parámetro analizado	Método utilizado
pH	NMX-AA-008-SCFI (2011)
Conductividad	NMX-AA-093-SCFI (2000)
Color	NMX-AA-045-SCFI (2001)
Turbidez	NMX-AA-038-SCFI (2001)
Determinación de sólidos	NMX-AA-034-SCFI (2001)

4. RESULTADOS

4.1 Remoción de sólidos a presión atmosférica

Las pruebas a presión atmosférica se llevaron a cabo a una concentración de sólidos de 5.51 g/L $\text{Co}/8$, las diferentes concentraciones de caolín (sin Caolín, 5%, 10% y 15% de caolín) y las siete telas de uso industrial. Para estas pruebas de filtración, se evaluaron los sólidos totales en la muestra a separar y en el filtrado obtenido, con el objetivo de conocer los porcentajes de remoción de sólidos.

En la figura 4.1 se muestran los porcentajes de remoción de sólidos obtenidos con cada una de las telas y diferentes concentraciones de caolín adicionadas.

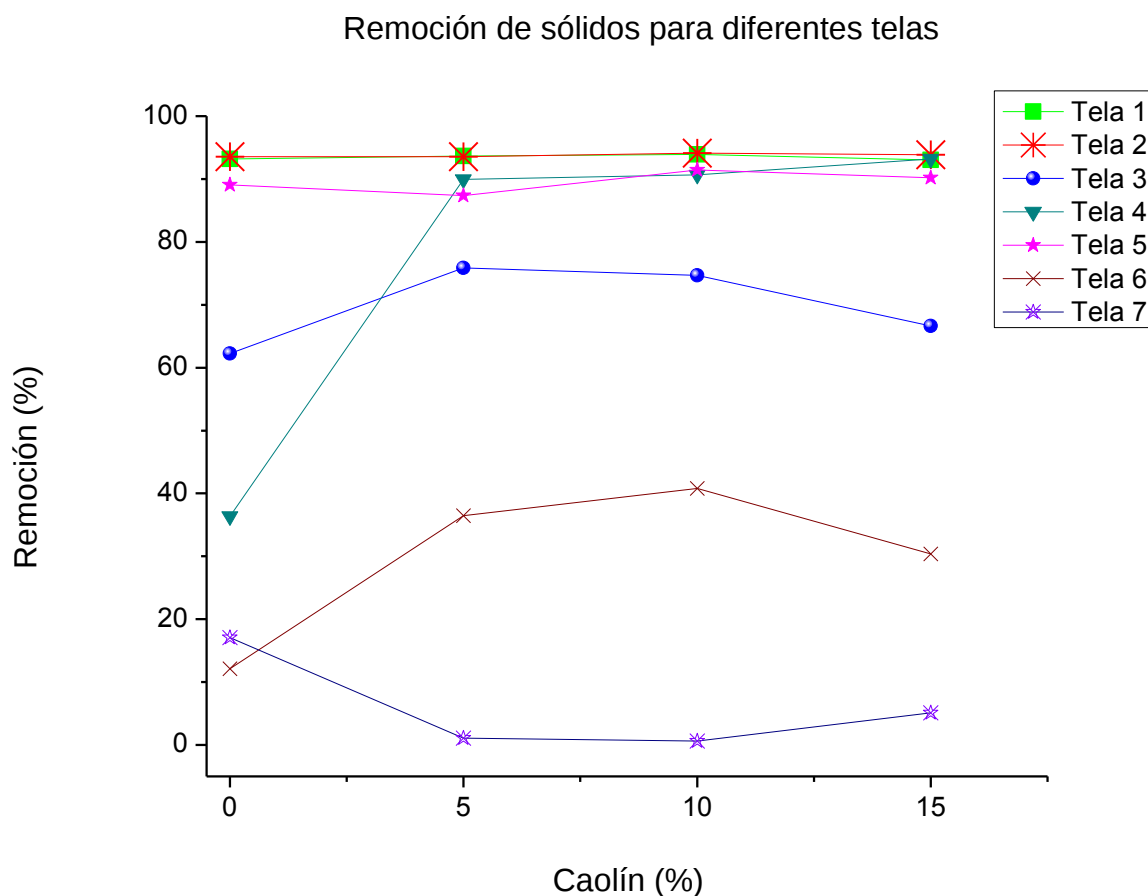


Figura 4.1 Remoción de Sólidos para diferentes materiales filtrantes

En esta gráfica se observa que las telas 1 y 2 fueron las que presentaron mayor porcentajes de remoción, teniendo porcentajes arriba del 93% con la adición de los diferentes porcentajes en peso de caolín, las telas 4 y 5 obtuvieron valores cercanos al 90%, mientras que la tela 3 obtuvo remociones máximas del orden de 75 %. Las telas 6 y 7 fueron las que realizaron la menor remoción, siendo la tela 7 la que obtuvo los valores más bajos, cercanos al 5%.

El tamaño de poro de las telas que obtuvieron mejor desempeño en la remoción de sólidos (telas 1 y 2), permitieron en menor tiempo, la formación de una torta con el espesor necesario para ofrecer una resistencia al paso de los mismos y llevar a cabo de manera correcta la separación, lo anterior es debido a que la resistencia que ofrece la torta suele ser mayor a la que ofrece el material filtrante.

Las telas 4 y 5 obtuvieron valores cercanos al 90% de remoción, lo cual se atribuye a que seguramente presentan tamaños de poro mayores a los de las telas 1 y 2. Se observa también que para la tela 4, la adición de caolín presenta una mejora significativa en cuanto a la separación de sólidos, ya que con un 15% de caolín adicionado, se tuvo 93.17% de remoción de sólidos, mientras que sin la adición de caolín tuvo 36.38% de remoción, lo anterior indica que al adicionar éste, se incrementa el tamaño de los aglomerados, llegando a un valor final, que es superior al tamaño de poro de la tela 4.

Los valores máximos del 75% de remoción para la tela 3, sugieren que su tamaño de poro no permitió la formación adecuada de una torta, a tiempo tal, que ayudará con la retención de los sólidos, obteniendo valores menores a las telas 1, 2, 4 y 5.

Aunque la tela 6 tuvo incremento en el porcentaje de remoción con la adición del filtro ayuda, obtuvo valores menores al 40% de remoción, lo cual denota que la torta se formó tardíamente, debido al tamaño de poro de la tela, lo que permitió el paso libre del fluido durante la mayoría del tiempo en el cual se realizó la prueba.

En el caso de la tela 7, se presentó un efecto adverso al adicionar el filtro ayuda, ya que los filtrados presentaron una elevada cantidad de sólidos, debido a que el tamaño de poro de esta tela, era tal que, durante casi toda la prueba de filtración,

permitía el paso de los sólidos suspendidos junto con el caolín, como consecuencia, no se presentó la formación de una torta con espesor suficiente que ofreciera resistencia al paso de los sólidos.

Para esta misma tela, la adición del 15% de caolín, representó una mayor cantidad de sólidos en el agua filtrada, por lo que el porcentaje de remoción fue menor en comparación con las otras cantidades de caolín adicionadas, por lo tanto, se puede deducir que el tamaño de poro es tan grande, que aún con la adición del 15% de caolín, no se formaron aglomerados de un tamaño suficiente para que pudieran haber sido retenidos por este material filtrante.

En la figura 4.2 se muestra de manera diferente, una comparación entre los porcentajes de remoción obtenidos en las diferentes pruebas realizadas.

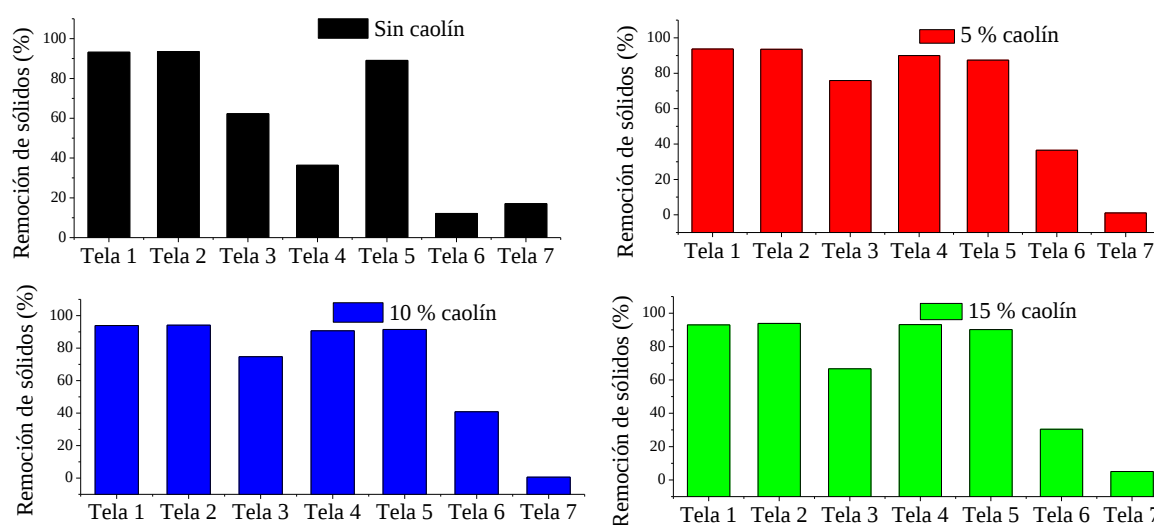


Figura 4.2 Evaluación de caolín como filtro ayuda

En esta figura se puede apreciar que la adición de los diferentes porcentajes de caolín, muestra un impacto en el proceso de filtración, siendo poco significativo para las telas 1, 2 y 5. La tela 1 por ejemplo, sin la adición de caolín tuvo un

93.17% de remoción, mientras que presentó 93.68%, 93.92% y 93.02% de remoción con la adición de 5%, 10% y 15% en peso de caolín, respectivamente. En las telas 3, 4 y 6, se observó un aumento en el porcentaje de remoción de sólidos, al incrementar el porcentaje de caolín.

En la figura 4.2 también se observa que la adición del 5% y 10% de caolín, presenta en la mayoría de las telas incrementos en los porcentajes de remoción, respecto a la muestra sin caolín, mientras que para el 15% existió una mayor variabilidad, debido a esto se puede comprobar la capacidad del caolín como filtro ayuda en la remoción de sólidos especialmente con la adición de 5% y 10% del filtro ayuda.

La adición del 15% de caolín presentó dispersión en los datos seguramente a que la aglomeración entre los sólidos presentes en el agua residual y el caolín no se presentó completamente.

4.3 Parámetros fisicoquímicos evaluados a presión atmosférica

La turbidez, color, conductividad y pH fueron otros parámetros evaluados a cada filtrado obtenido con el uso de las diferentes telas. Esta evaluación permitió ampliar el análisis de resultados.

4.3.1 Turbidez

La turbidez permitió conocer la calidad de los filtrados obtenidos, dicho parámetro, es también una medida indirecta del grado de remoción de partículas suspendidas que ocasionan la obstrucción de la luz. Los resultados se muestran en porcentaje en Los resultados obtenidos de cada filtrado se presentan en la figura 4.3.

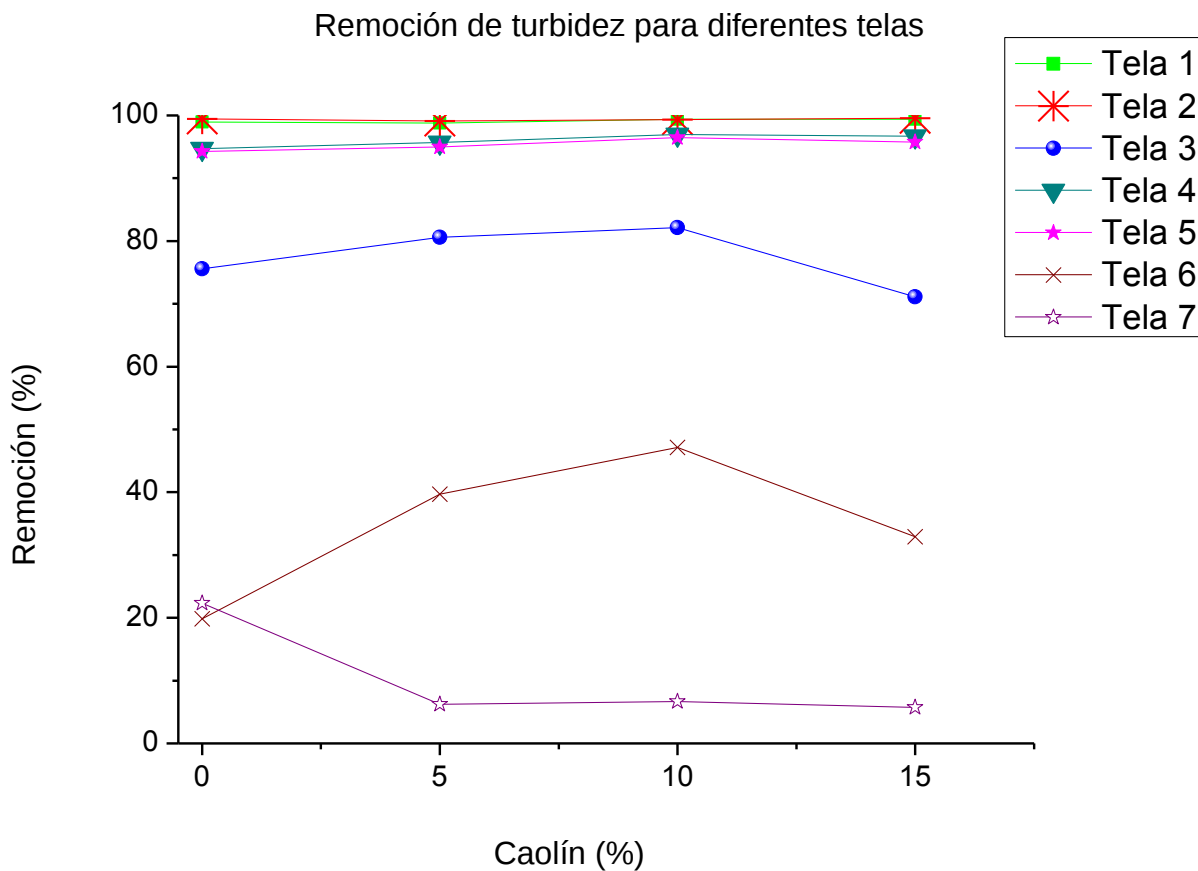


Figura 4.3 Remoción de Turbidez

La gráfica 4.3 permite observar que conforme se incrementa el porcentaje de caolín, disminuyen los valores de turbidez en los clarificados obtenidos esto se observa en los porcentajes de remoción altos. Con la adición del 5 y 10 % del filtro ayuda se tienen incrementos en la remoción de turbidez como lo fue el caso de la remoción de sólidos suspendidos, mientras que para la adición del 15% se tienen dispersos, lo cual se atribuye a que en dichas telas, al incrementar la concentración de caolín, se incrementó el tamaño de aglomerado, formando de esta manera una torta de sólidos que ofrece una resistencia al paso de los mismos, teniendo por lo tanto una mayor remoción. La adición del 15% debió

presentar los resultados dispersos seguramente al anteriormente descrito en los porcentajes remoción de sólidos.

Para la tela 7, también se cumple la relación directamente proporcional entre el porcentaje de remoción y la claridad de los filtrados, solo que para este caso, a medida que se incrementó la cantidad de caolín adicionada, disminuyó el porcentaje de remoción, debido a las razones antes mencionadas, las cuales derivan del tamaño de poro que presenta este material.

Por ende la tela 1, tela 2, tela 4 y la tela 5 son las telas que remueven mayor turbidez, siendo las dos primeras telas las que vuelven a obtener valores más altos en los porcentajes de remoción de entre todas. La tela 3, tela 6 y la tela 7 presentan los valores más bajos. Siendo la tela 7 quien vuelve a tener los incrementos en turbidez con el incremento en la adición de caolín.

La tela 1 y tela 2 ofrecieron los filtrados con menor turbidez, reforzando la idea de que permitieron la formación de la torta en menor tiempo debido a su tamaño de poro, siendo esta la que ofreció mayor resistencia al paso del fluido, obteniendo valores altos en la remoción de turbidez. Demostrando nuevamente ser las telas con mejor desempeño.

4.3.2 Remoción de Color

Con la finalidad de ampliar el análisis de resultados se evaluó también el color aparente, la cual es otra medida indirecta de la remoción de sólidos en el proceso de filtración, como parámetro de calidad de los clarificados. El análisis se basa en el porcentaje de remoción de color que se logra con la adición en porcentaje en peso de caolín en el proceso de filtración.

Los resultados obtenidos con el uso de los diferentes materiales filtrantes se muestran la figura 4.4.

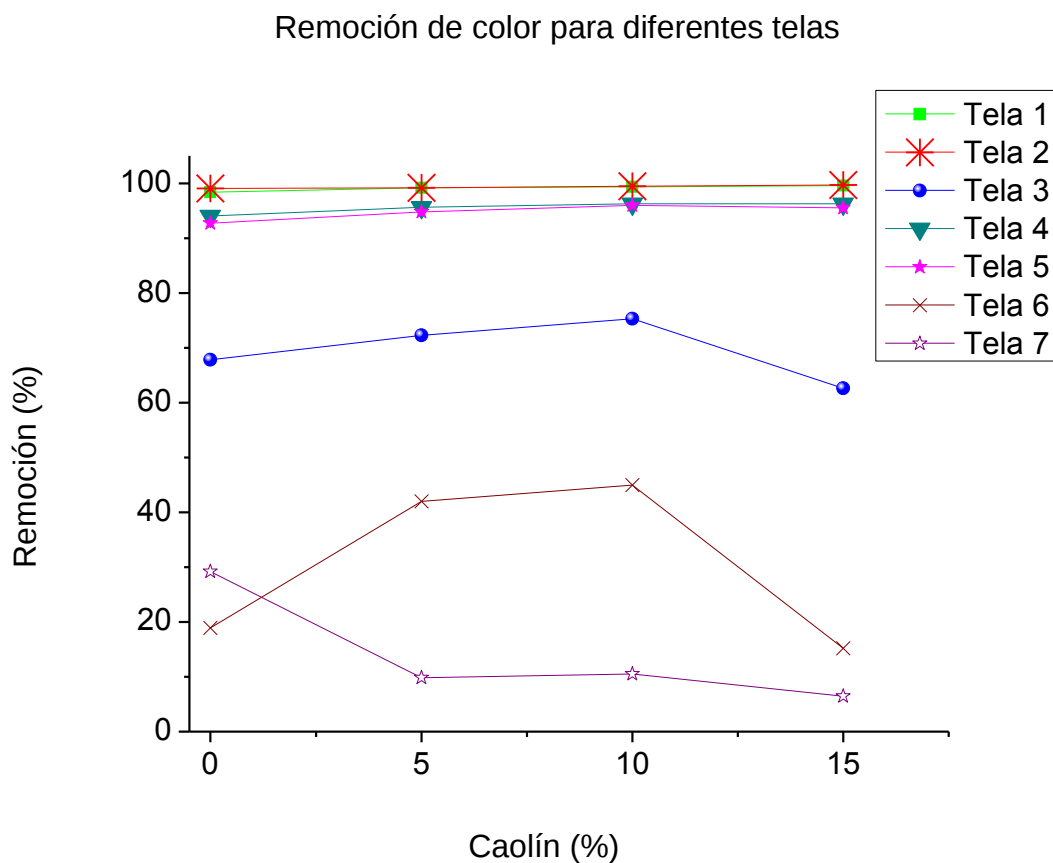


Figura 4.4 Remoción de color

Los valores de la gráfica 4.4 están en función de los porcentajes de remoción logrados con cada una de las telas con la adición de los diferentes porcentajes en peso de caolín, la adición de caolín también causa una remoción de color apreciable. La adición de 5 y 10% de caolín remueven color apreciablemente en la mayoría de las telas. No es el caso de la adición del 15%, el cuál se muestra variable. En la tela 1 y tela 2 también se observa una remoción de color aunque es mínima, aumentando la concentración de caolín.

Los valores más bajos en remoción de color los obtienen la tela 6 y la tela 7, ésta última presenta los valores bajos en. El mismo comportamiento que se tuvo en la remoción de turbidez se observa con las telas de mejor desempeño para la

remoción de color, siendo la tela 1 y la tela 2 las que obtienen mejores resultados. La tela 4 y la tela 5 presentan valores cercanos a las telas 1 y 2 aunque siguen siendo mayores.

La relación que existe entre el color y turbidez se refleja también en la semejanza de las tendencias que siguen las líneas en las figuras 4.3 y 4.4. Se sugiere el mismo comportamiento respecto a la formación del aglomerado. La resistencia mayor que ofrecieron las telas 1 y 2 al paso de los sólidos debido a su tamaño de poro permitieron la formación de la torta en menor tiempo, disminuyendo el color.

4.3.3 Conductividad

Los datos obtenidos para este parámetro se muestran en la figura 4.5

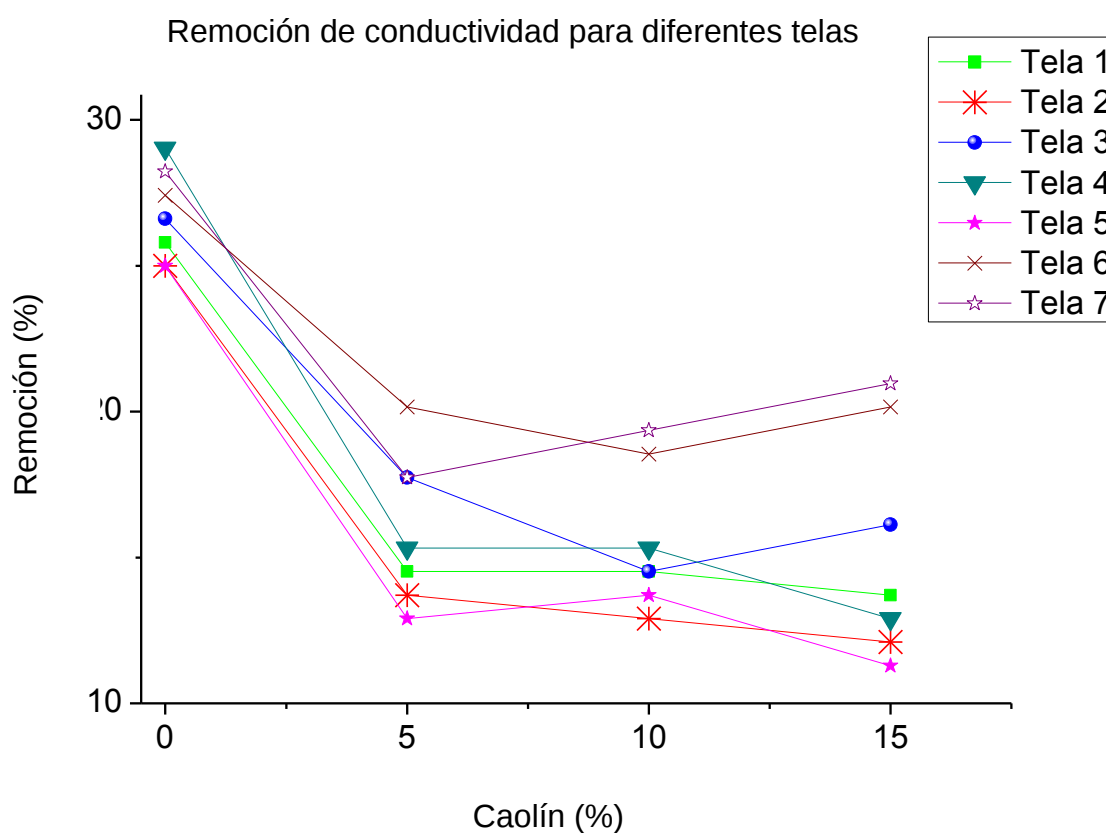


Figura 4.5 Remoción de Conductividad

Los valores que se presentan están en función del porcentaje de remoción de conductividad que se logró durante la filtración.

Se observa que la adición de caolín ocasiona un aumento en la conductividad. Las tres concentraciones de caolín obtienen valores muy cercanos, los tres bastante alejados de los filtrados obtenidos sin la adición del filtro ayuda. La tela 1, tela 2 y tela 5 presentan los valores más bajos en porcentajes de remoción de conductividad mientras que la tela 6 y la tela 7 obtienen los valores más altos. El resto de las telas obtienen valores intermedios entre los dos casos anteriormente descritos.

La figura 4.5 muestra que al llevar a cabo la filtración la conductividad disminuye, seguramente se debe a que los silicatos presentes en la arcilla del agua residual quedaron retenidos en la torta. Los silicatos son compuestos inorgánicos y los compuestos inorgánicos suelen ser mejores conductores que los orgánicos en soluciones.

El caolín usado también está formado por compuestos inorgánicos como el óxido de sílice y el óxido de aluminio. Esto se refleja en el aumento en la conductividad que se tiene con la adición del filtro ayuda ya que al agregar el 5%, 10% y 15% de caolín existe un aumento considerable respecto al 0% de caolín de los filtrados obtenidos.

La tela 1, tela 2 y la tela 5 obtuvieron los valores más bajos seguramente a que en el filtrado, que fueron los más claros, sólo permitieron el paso de compuestos inorgánicos mientras que las tela 6 y la tela 7, quienes obtuvieron los valores más altos en remoción y más altos en color y turbidez, debieron contener compuestos orgánicos e inorgánicos en sus filtrados. Los valores intermedios del resto de las telas debieron presentar el mismo fenómeno.

4.3.4 pH

La medición del pH fue otro parámetro importante de los filtrados obtenidos, dicha medición se realizó con la finalidad de observar los efectos que causa la adición

de caolín no sólo en la remoción de sólidos, turbidez, color y conductividad. La siguiente tabla contiene los valores de pH obtenidos:

Tabla 4.1 Valores de pH después de filtrar

Medio Filtrante	Valores de pH			
	0% W	5% W	10% W	15% W
Tela 1	8.09	8.19	7.69	7.69
Tela 2	8.24	8.45	8.73	8.47
Tela 3	7.99	7.95	8.00	7.69
Tela 4	7.69	7.86	8.07	7.69
Tela 5	8.01	7.60	8.62	7.98
Tela 6	7.45	8.37	7.92	7.47
Tela 7	7.76	7.77	7.96	7.57

El agua residual descargada de los sedimentares de la planta potabilizadora contiene residuos desprendidas de la adición del coagulante, floculante, polímero catiónico y la sílice activada. La adición del coagulante (sulfato de aluminio) ocasiona la liberación de iones H^{+1} , lo que ocasiona que su pH sea un tanto ácido (6.45).

La adición de caolín al agua residual generó un aumento en los valores de pH como se observa en la tabla 4.1, aunque sus valores son dispersos tienden a ser básicos, seguramente a que el caolín tiene un pH de 8. El objetivo de realizar las pruebas de filtración a presión atmosférica y con diferentes materiales de filtración, fue seleccionar el mejor material y realizar con éste una siguiente etapa de pruebas, variando la concentración de sólidos en el agua residual y la presión,

pero debido a que las tela 1 y la tela 2 presentaron resultados similares, la segunda etapa de pruebas se llevó a cabo con los dos materiales de filtración antes mencionados.

En la figura 4.6 se adhieren las fotos que se tomaron con ayuda de un esteroscopio de los diferentes materiales filtrantes son sistema de adquisición de imágenes:

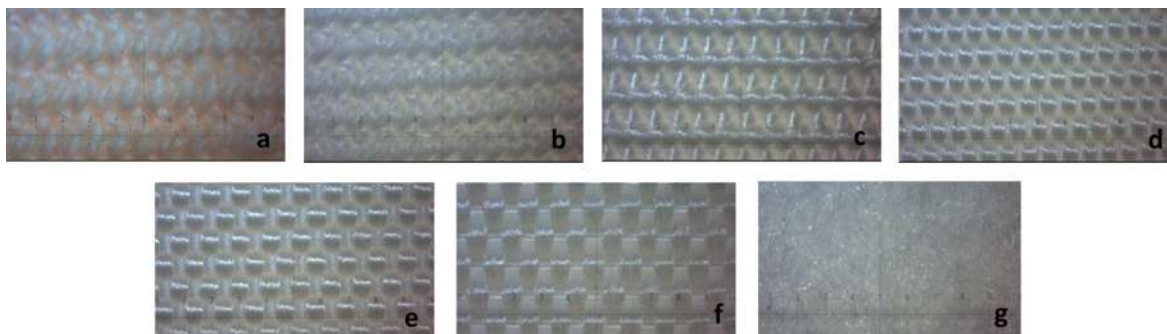


Figura 4.6 Imágenes de los diferentes medios filtrantes

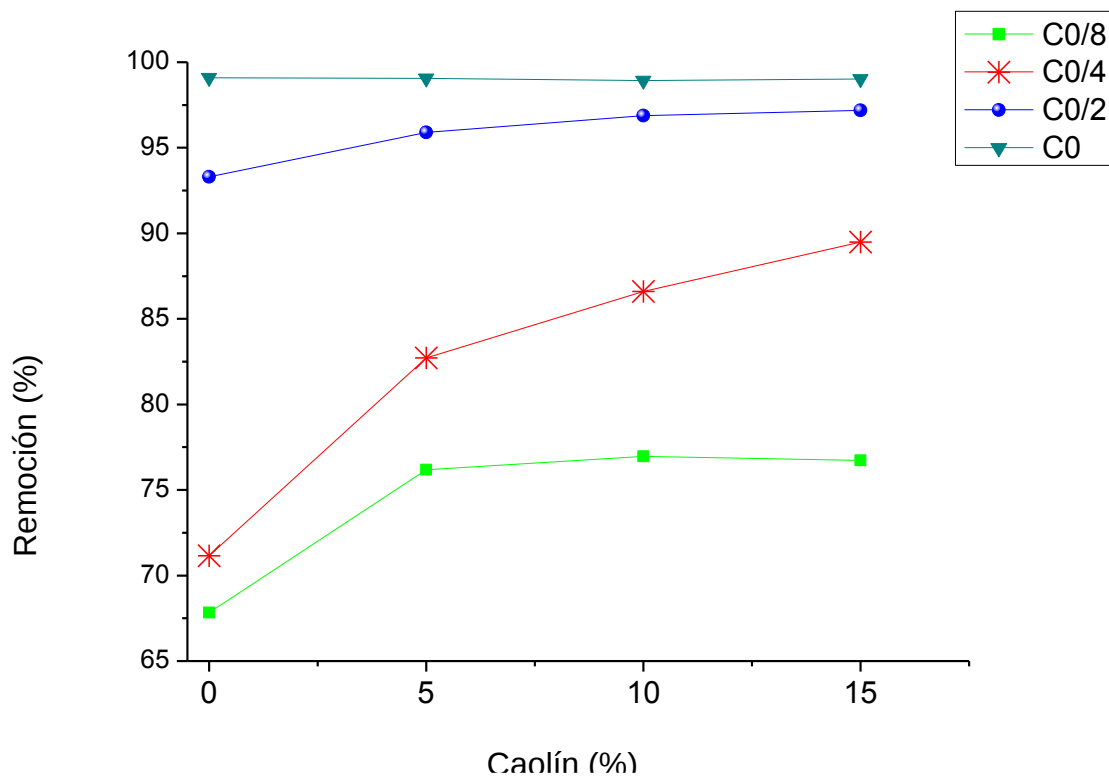
a= 100% Algodón 321 (tela 1), b= 100% Poliéster S-22 (tela 2), c= Polipropileno (tela 3), d= Nylon 840-466 (tela 4), e= Poliéster F-4629 (tela 5), f= P. P. 3000 (tela 6) y g= Poliéster ahujado (tela 7)

Se observa que los tejidos de los medios filtrantes son diferentes. La tela 1 y la tela 2 presentan un tejido mucho más compacto.

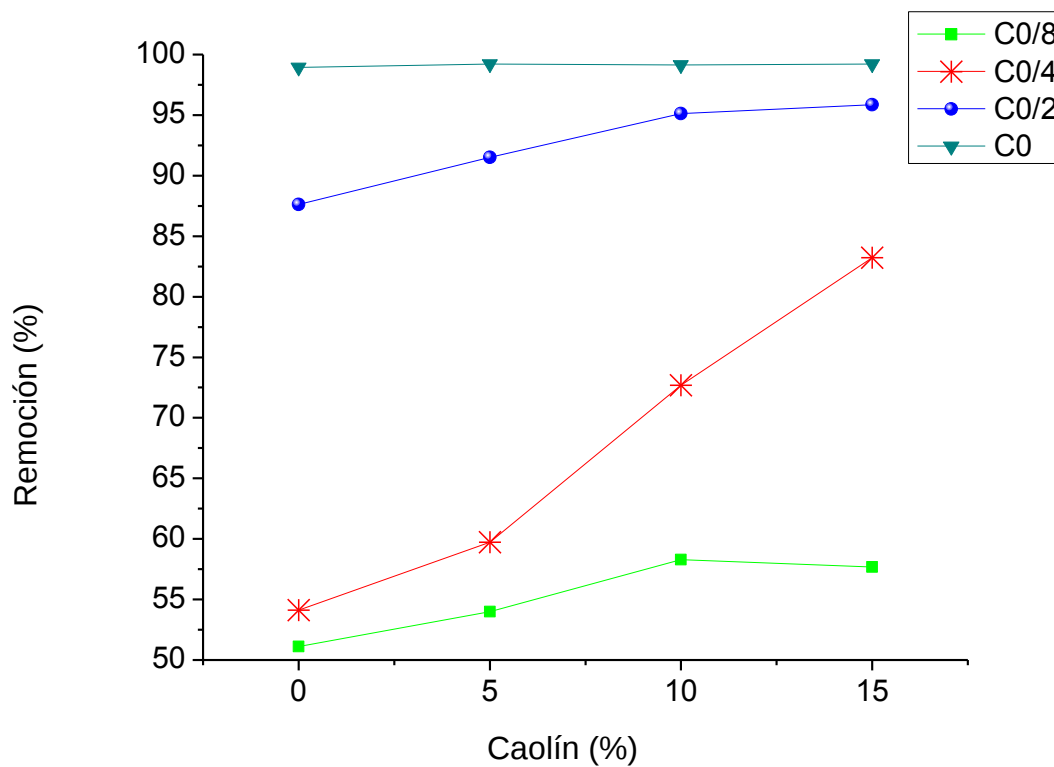
4.4 Remoción de sólidos a vacío

Las pruebas de filtración se realizaron a 15 in Hg de vacío con cuatro concentraciones de agua residual ($C_0/8 = 5.51$ g/L, $C_0/4 = 11.2$ g/L, $C_0/2 = 22.04$ g/L y $C_0 = 49.44$) y de las respectivas adiciones de caolín (0, 5, 10 y 15%), con la finalidad de observar el impacto que genera el filtro ayuda en la remoción de sólidos en cada una de las concentraciones del agua residual, apreciar el efecto del uso de las diferentes concentraciones de caolín y la selección de la tela con mejor desempeño. Se siguió el procedimiento antes plasmado para la obtención del porcentaje de remoción de sólidos, los resultados obtenidos se muestran en la figura 4.6.

Remoción de sólidos a vacío para tela 1



Remoción de sólidos a vacío para tela 2



$C_{0/8} = 5.51 \text{ g/L}$, $C_{0/4} = 11.2 \text{ g/L}$, $C_{0/2} = 22.04 \text{ g/L}$ y $C_0 = 49.44$

Figura 4.7 Remoción de sólidos a vacío para tela 1 y tela 2

En esta figura se puede observar, que para ambas telas y todas las concentraciones de sólidos, conforme se incrementa el porcentaje de caolín, se eleva el porcentaje de remoción de los mismos, lo anterior se debe a que la presencia de caolín coadyuva a la aglomeración de los sólidos, por ende se forma de una mejor manera una torta de filtración que opone resistencia al paso de estos y como consecuencia existe una mejor filtración.

En la misma figura también queda plasmado que a medida que se incrementa la concentración de sólidos, se incrementan los porcentajes de remoción, esto se debe a que a bajas concentraciones, tarda en formarse la torta de filtración, permitiendo el paso de muchos sólidos al inicio de la operación, caso contrario, a altas concentraciones, la formación de la torta es rápida, permitiendo que desde un principio se lleve a cabo de manera correcta la separación, Por esta misma razón, la figura denota que el incremento en el porcentaje de remoción con las diferentes concentraciones de caolín, es poco significativo para las concentraciones de C_0 y $C_0/2$.

De las dos telas, la tela 1 obtiene los valores más altos en los porcentajes de remoción de sólidos especialmente en las concentraciones de $C_0/8$, $C_0/4$ y $C_0/2$ como se observa en la figura 4.7. Para C_0 los valores son muy cercanos en ambas telas. Los porcentajes tan cercanos que se obtuvieron para el 15% respecto a los de 5% y 10% con $C_0/8$ seguramente se debió a que la baja presencia de sólidos que se tiene con esta concentración de agua residual no permitió la interacción con el 15% de caolín. Esto también se observó en las pruebas realizadas a presión atmosférica, en donde el 15% de filtro ayuda obtiene valores menores o muy cercanos al 5 y 10%.

Los porcentajes de remoción menores que se obtienen con la tela 2 respecto de la tela 1, con las concentraciones $C_0/8$ y $C_0/4$ se debieron seguramente a que la tela 2 tuvo un tamaño de poro un tanto mayor a la tela 1. Debido a que la operación se

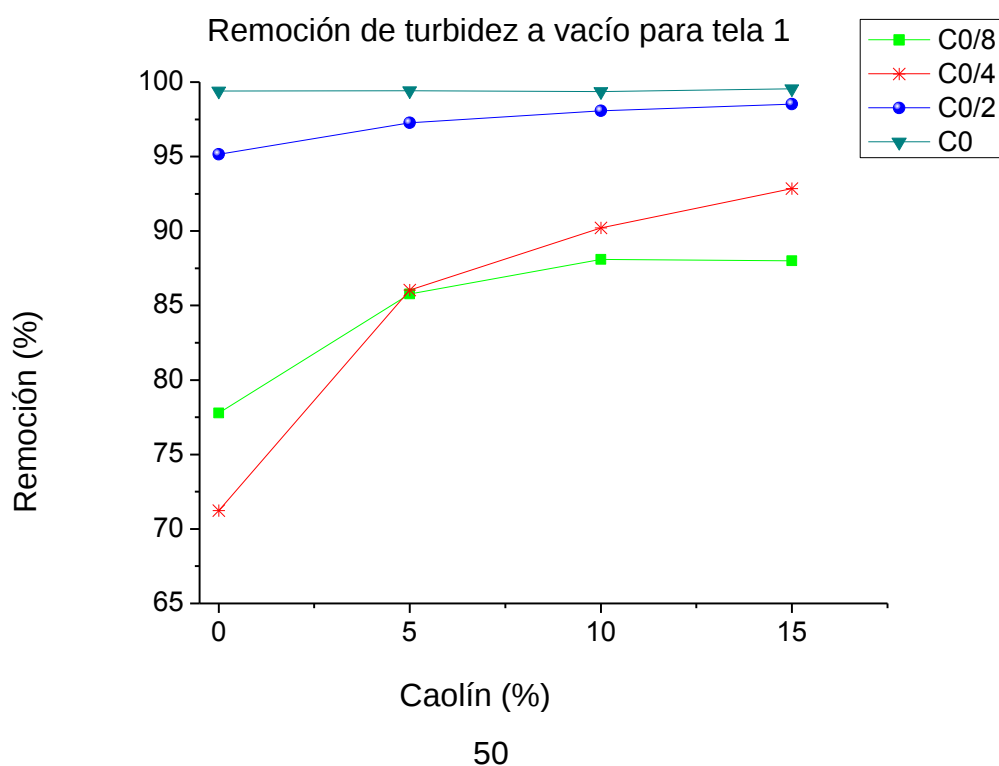
llevó a cabo a vacío, la velocidad de filtrado aumentó ocasionando la no formación de la torta. En los casos de $C_0/2$ y C_0 ambas telas presentaron porcentajes muy cercanos pero la tela 1 obtuvo los valores más altos. La cercanía en estos valores seguramente fue debido a la resistencia mucho mayor que ofreció la torta superando la del medio filtrante que para estas operaciones se suele despreciar ya que es mucho menor para fines de cálculos.

4.5 Parámetros fisicoquímicos evaluados a vacío

Los parámetros evaluados a los filtrados obtenidos a presión atmosférica también se analizaron con las pruebas realizadas a vacío, lo cual permite tener un estudio más completo de los resultados obtenidos.

4.5.1 Remoción de Turbidez a vacío.

Los datos que se obtuvieron para este parámetro se muestran en la figura 4.7. Están en función de los porcentajes de remoción logrados en cada filtrado.



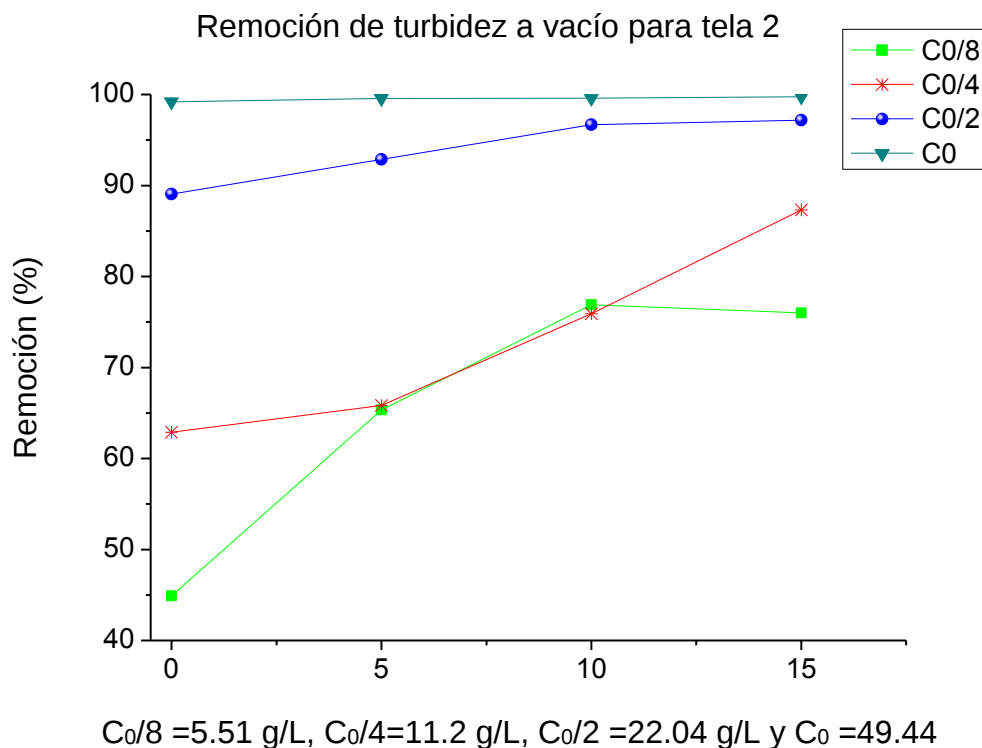


Figura 4.8 Remoción de Turbidez a vacío para tela 1 y tela 2

Como se observó con las pruebas realizadas a presión atmosférica la figura 4.8 muestra que, para las diferentes concentraciones de sólidos y para ambos materiales filtrantes, los valores de turbidez tienen una relación proporcional con el porcentaje de caolín, lo cual se atribuye a que éste ayuda a la aglomeración de los sólidos, logrando formar una torta que ofrece mayor resistencia y como consecuencia tener mayor remoción, derivando en filtrados menos turbios.

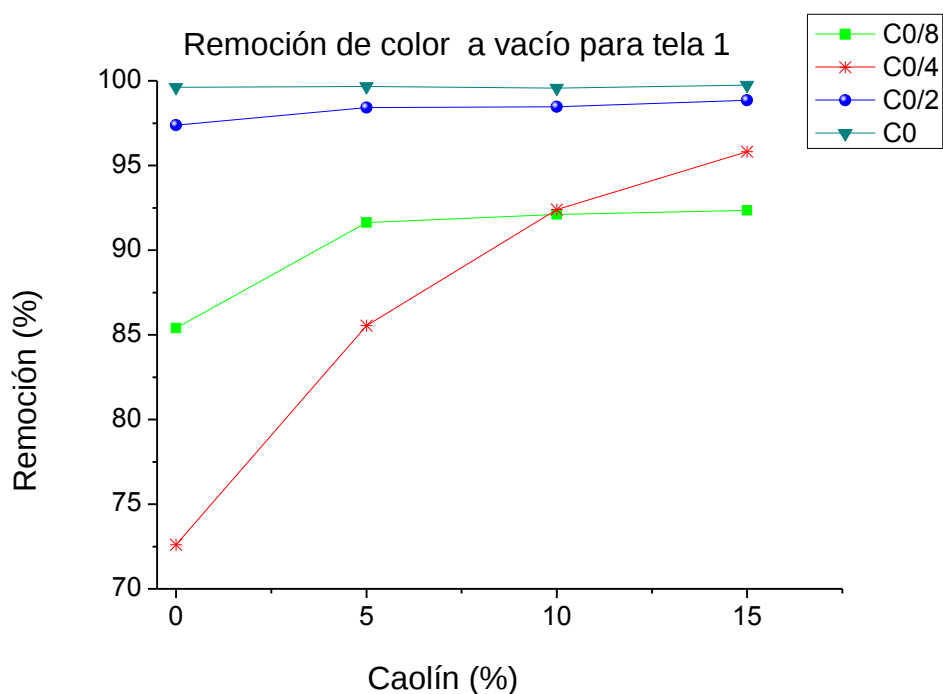
Las tendencias que siguen las líneas de turbidez con la adición de los diferentes porcentajes de caolín son muy parecidas a las líneas de remoción de sólidos, con esto se refuerza la idea de que seguramente existe interacción entre el caolín y la arcilla presente en el agua residual permitiendo la aglomeración de los silicatos presentes.

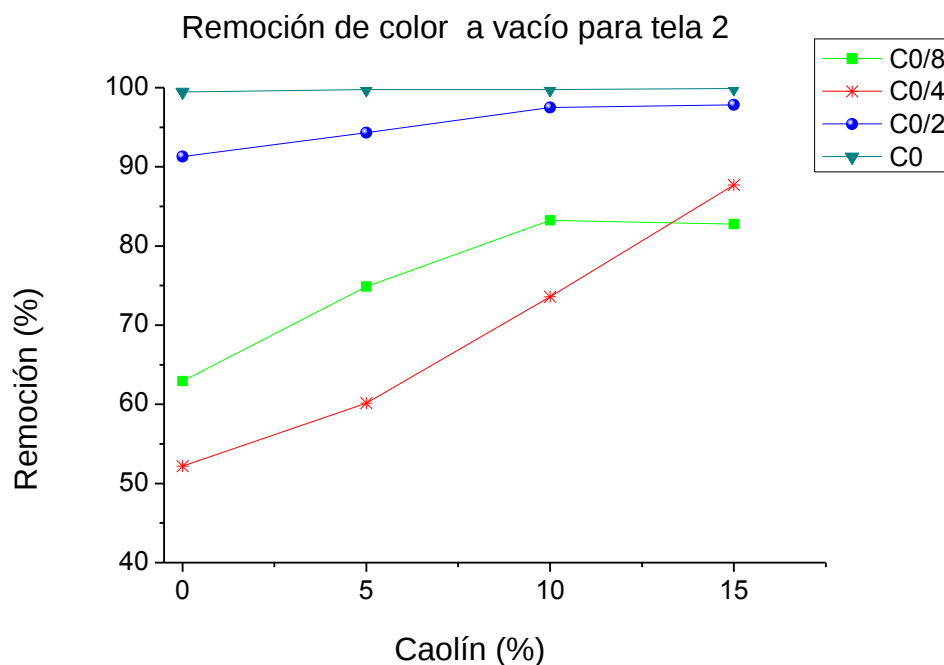
También los valores bajos de turbidez que se obtuvieron con C_0 reafirman la teoría anteriormente planteada para la remoción de sólidos obteniéndose estos valores debido a la formación de la torta que se presentó durante la filtración, siendo esta la que ofreció mayor resistencia, logrando así filtrados con mayor claridad. Aunque $C_0/4$ presentó valores mucho mayores que $C_0/8$ en porcentajes de remoción de sólidos, $C_0/8$ obtiene valores menores de turbidez en los filtrados, esto se debe a que los porcentajes de remoción obtenidos para ambas concentraciones no tienen la misma base, presentando los filtrados de $C_0/4$, mayor concentración de sólidos.

La figura 4.8 también muestra que la tela 1 obtuvo los valores más altos en los porcentajes de remoción con todas las concentraciones de agua residual, esto se atribuye a su tamaño de poro, que ofrece una mayor resistencia y permite la formación de una torta de mayor espesor.

4.5.2 Remoción de Color a vacío

La remoción de color fue otro parámetro evaluado en las pruebas realizadas a vacío. Los datos se presentan en figura 4.8.





$C_{0/8} = 5.51 \text{ g/L}$, $C_{0/4} = 11.2 \text{ g/L}$, $C_{0/2} = 22.04 \text{ g/L}$ y $C_0 = 49.44$

Figura 4.9 Remoción de color a vacío para tela 1 y tela 2.

Se observa en la figura 4.8 que las tendencias de las líneas son semejantes a las que se tienen en la gráfica de remoción de turbidez., con la adición del filtro ayuda el color disminuye, en todas las concentraciones de agua residual en ambas telas y como se presentó en la remoción de turbidez sólo el 15% en $C_{0/8}$ se obtiene un valor cercano al 5% y 10%. Se aprecia que las concentraciones de agua residual también poseen tendencias semejantes a las de remoción de turbidez. C_0 obtuvo los valores más altos seguido de $C_{0/2}$, $C_{0/8}$ y $C_{0/4}$ en porcentajes de remoción de turbidez.

La presencia de una mayor cantidad de sólidos con C_0 y $C_{0/2}$ debió permitir la formación de una torta de mayor espesor, fenómeno que seguramente también gobernó en la remoción de sólidos y la remoción de turbidez. La actividad del caolín es apenas apreciable en las concentraciones más altas (C_0 y $C_{0/2}$)

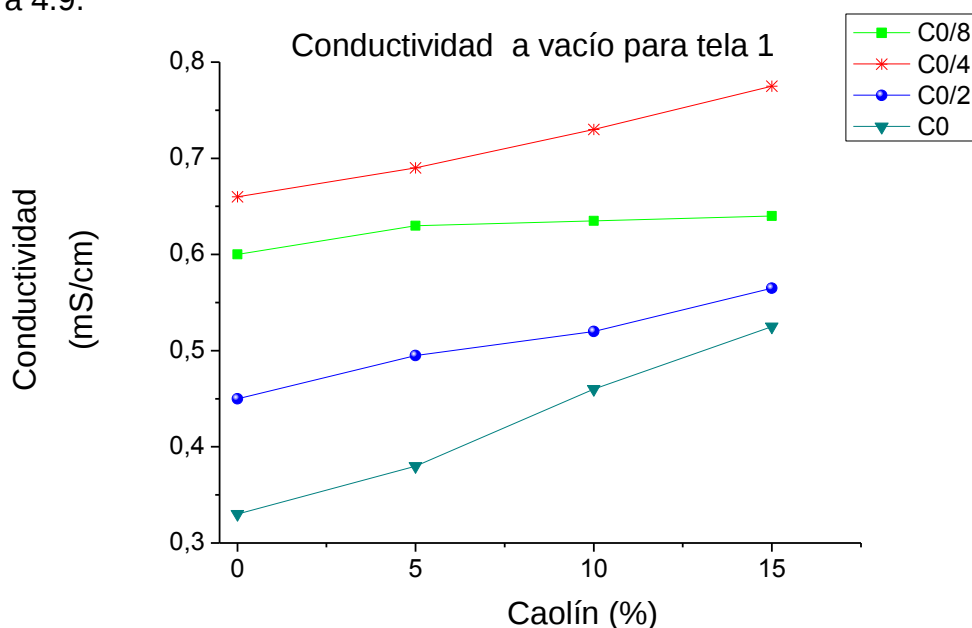
seguramente a que la gran cantidad de sólidos tiene mayor actividad en la formación de la torta que la que ofrece el caolín.

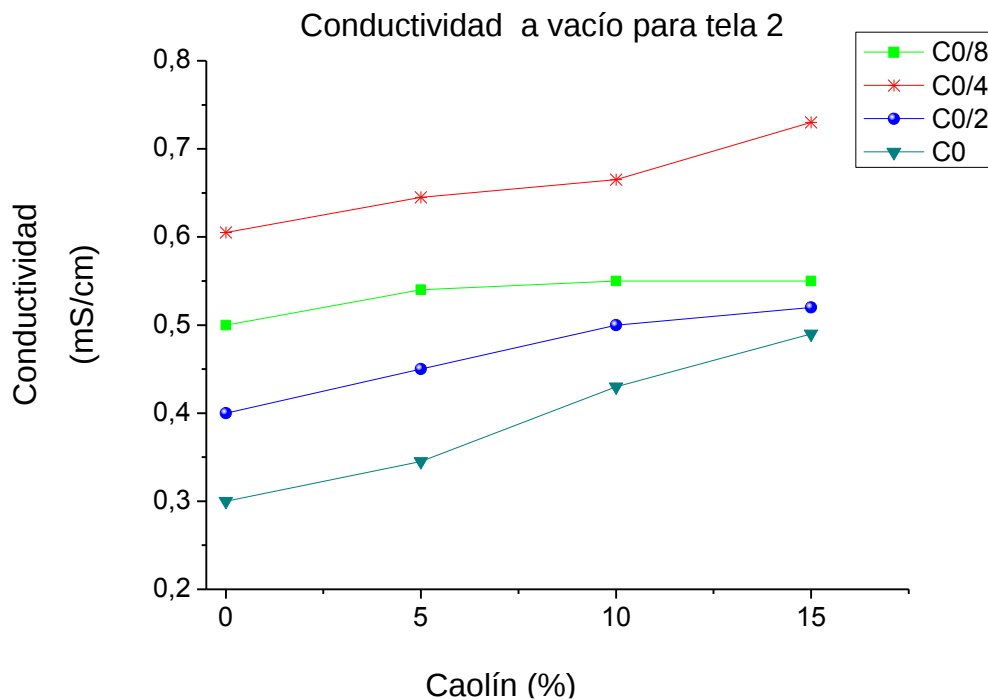
De nuevo C₀/4 obtuvo valores menores que C₀/8 probablemente por que contenía mayor presencia de sólidos, además de que en los primeros segundos de inicio del proceso de la filtración, el vacío generó el paso de mayor cantidad de sólidos ocasionando una menor remoción de sólidos.

Se sugiere la misma idea para la obtención de los valores más altos de la tela 1 respecto de la tela 2, el tamaño de poro en el primer momento de la filtración definió la formación de la torta, siendo la tela 1 quien ofreció mayor resistencia al paso del flujo, por lo tanto la tela 1 obtiene los valores más altos en remoción de color, como en los valores obtenidos en las pruebas de remoción de turbidez y sólidos, respecto de la tela 2.

4.5.3 Conductividad

Con la finalidad de tener una caracterización más completa de los filtrados la medición de la conductividad fue otro parámetro importante como fue en el caso de las pruebas realizadas a presión atmosférica. Los valores se presentan en la figura 4.9.





$C_{0/8} = 5.51 \text{ g/L}$, $C_{0/4} = 11.2 \text{ g/L}$, $C_{0/2} = 22.04 \text{ g/L}$ y $C_0 = 49.44$

Figura 4.10 Conductividad a vacío para tela 1 y tela 2

La figura 4.9 no contiene los valores en función de los porcentajes de remoción debido a que sus valores eran negativos y no era ilustrativo en la gráfica.

La figura 4.9 muestra que la adición de caolín, causa un aumento en los valores de conductividad, para las diferentes concentraciones de agua residual y en el caso de las dos telas.

Las líneas de la gráfica presentan una pendiente distinta a las que se presentaron con los valores de turbidez y color, pero ambos con efectos debido a la adición de caolín. $C_{0/4}$ obtiene los valores más altos, $C_{0/8}$ en segunda posición, le sigue de $C_{0/2}$ y por último se tiene a C_0 con los valores más bajos en ambas telas. Los valores de conductividad que obtiene la tela 1 son más grandes que las de la tela 2 en todas las concentraciones de agua residual, con y sin la adición del filtro ayuda.

El incremento que se presentó con la adición de caolín seguramente se debe a la presencia de compuestos inorgánicos (óxido de sílice y óxido de aluminio) los cuales son buenos conductores permitiendo aumentar los valores de conductividad, tal como el fenómeno que se manifestó con las pruebas a presión atmosférica. Además los compuestos inorgánicos presentan en el caolín se ionizan en presencia del agua y logran filtrarse debido a la polaridad del agua.

C₀/4 obtiene los valores más altos seguramente a que esta concentración es la que presentó mayor cantidad de sólidos en los filtrados, estos sólidos están formados de compuestos orgánicos e inorgánicos, siendo estos últimos los que aportan los valores de conductividad. C₀/8 siendo una concentración menor, en los filtrados también debieron contener menor cantidad de sólidos y por ende de silicatos. C₀/2 y C₀ presentaron los valores más bajos seguramente a que retuvieron mayor cantidad de sólidos en la torta.

4.5.4 pH

Los datos para este parámetro se muestran en la tabla 4.2.

Tabla 4.2 Valores obtenidos de pH a vacío

Caolín % W	Valores de pH							
	C ₀ /8=5.51 g/L		C ₀ /4=11.2g/L		C ₀ /2=22.04g/L		C ₀ =49.44g/L	
	Tela 1	Tela 2	Tela 1	Tela 2	Tela 1	Tela 2	Tela 1	Tela 2
0 % W	7.92	8.16	6.3	6.39	6.52	7.21	6.95	6.70
5 % W	7.99	8.07	6.61	6.34	7.18	7.31	6.78	6.71
10 % W	7.77	7.65	6.47	6.45	7.36	6.86	6.84	6.71
15 % W	8.1	7.42	6.77	6.93	7.14	6.78	6.90	6.78

Los valores obtenidos de pH muestran mucha variabilidad. Los valores más altos de pH la presentaron Co/8 en ambas telas. El resto de las concentraciones de agua residual obtienen valores entre 6 y 8 con las dos telas. Se sugiere el mismo comportamiento de las pruebas realizadas a presión atmosférica en las que la presencia de iones (Al^{+3} y SO_4^{-2}) ocasiona la liberación de iones H^+ , permitiendo tener valores cercanos a la acidez, pero con la adición del caolín cambia su pH acercándose a valores básicos.

4.6 Selección de la tela con pruebas realizadas a vacío

Como se señaló en el marco teórico de este trabajo, las resistencias que se presentan en el proceso de filtración son ofrecidas por el medio filtrante y la torta formada durante este proceso. Se realizaron mediciones de tiempo contra volumen de filtrado, para la concentración de sólidos con finalidad de conocer estas resistencias, los datos se muestran la tabla 4.3.

Tabla 4.3 Valores de tiempo (s) contra tiempo/volumen (s/m³)

Tela 1			Tela 2		
V (m ³)x10 ⁴	t (s)	t/V (s/m ³) x10 ⁻⁴	V (m ³)x10 ⁴	t (s)	t/V (s/m ³) x10 ⁻⁴
0.75	2778.5	3704.67	0.75	1303.5	1738.00
1	3695	3695.00	1	1757	1757.00
1.25	4743.5	3794.80	1.25	2286.5	1829.20
1.5	6370.5	4247.00	1.5	3033.5	2022.33
1.75	8220.5	4697.43	1.75	3850	2200.00
1.88	12720	6765.96	1.88	5103	2714.36

La figura 4.10 muestra los datos graficados de la tabla 4.3.

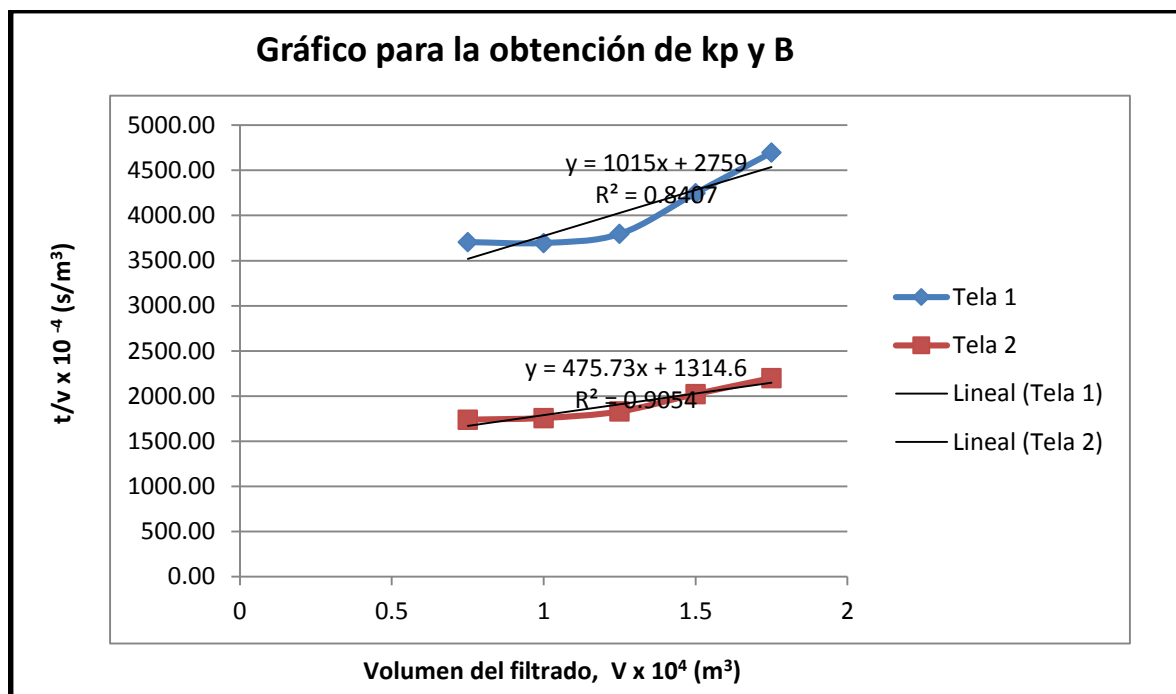


Figura 4.11 Filtración a vacío (50.79 kN/m²), C_0 , 10% caolín a $T=21.5$ °C. t/V vs V .

La gráfica describe la ecuación $y = mx + b$, forma en que se tiene la ecuación 18, la pendiente y la intersección de las dos ecuaciones nos permitirán conocer los valores de resistencias de la tela 1 y 2. Los valores leídos son los siguientes:

$$\text{Pendiente} = \frac{K_P}{2}$$

$$\text{Intersección} = B$$

La tabla 4.4 muestra los valores leídos de la gráfica:

Tabla 4.4 Kp/2 y B de la tela 1 y tela 2

	Tela 1	Tela 2
kp /2	1.02E+11	4.76E+10
kp (s/m⁶)	1.40E+11	1.20E+11
B (s/m³)	2.76E+07	1.31E+07

A partir de las ecuaciones 13 y 14 obtendremos α y Rm respectivamente.

$$Kp = \frac{\mu \alpha c_s}{A^2(-\Delta p)} \quad \longrightarrow \quad \alpha = \frac{Kp A^2(-\Delta p)}{\mu c_s} \quad (19)$$

$$B = \frac{\mu Rm}{A(-\Delta p)} \quad \longrightarrow \quad Rm = \frac{BA(-\Delta p)}{\mu} \quad (20)$$

Además se conocen los valores de las constantes para la solución de las ecuaciones:

$$(-\Delta p) = 50.79 \frac{KN}{m^2}$$

$$A = 6.36 E - 3 \text{ m}^2$$

$$c_s = 49.44 \frac{Kg \text{ sólidos}}{m^3 \text{ de filtrado}}$$

$$\mu = 9.79 E - 4 \frac{Kg}{s \text{ m}}$$

Sustituyendo valores en la ecuación 19 y 20 se calculan las resistencias de la tela 1 y 2.

Tela 1:

$$\alpha_1 = \frac{K_p A^2 (-\Delta p)}{\mu c_s} = \frac{(1.40 \text{ E} + 11)(6.36 \text{ E} - 3)^2 (50.79 \text{ E} + 3)}{(9.79 \text{ E} - 04)(49.44)} = 5.943 \text{ E} + 12 \text{ m/Kg}$$

$$Rm_1 = \frac{BA(-\Delta p)}{\mu} = \frac{(2.76 \text{ E} + 7)(6.36 \text{ E} - 3)(50.79 \text{ E} + 3)}{9.79 \text{ E} - 04} = 6.6 \text{ E} + 11 \text{ 1/m}$$

Para la tela 2 se realizan los mismos cálculos:

$$\alpha_2 = \frac{K_p A^2 (-\Delta p)}{\mu c_s} = \frac{(1.20 \text{ E} + 11)(6.36 \text{ E} - 3)^2 (50.79 \text{ E} + 3)}{(9.79 \text{ E} - 04)(49.44)} = 5.094 \text{ E} + 12 \text{ m/Kg}$$

$$Rm_2 = \frac{BA(-\Delta p)}{\mu} = \frac{(1.31 \text{ E} + 7)(6.36 \text{ E} - 3)(50.79 \text{ E} + 3)}{9.79 \text{ E} - 04} = 2.088 \text{ E} + 11 \text{ 1/m}$$

En la tabla 4.5 se tiene una tabla con los valores obtenidos:

Tabla 4.5 Resistencia de la torta y el material filtrante.

Resistencias	Tela 1	Tela 2
α (m/Kg) Torta	5.943E+12	5.094E+12
Rm (1/m) Material Filtrante	6.6E+11	2.088E+11

Se observa en la tabla 4.4 que la resistencia de para la torta formada por cada una de las telas obtuvieron valores cercanos. Los valores de resistencia de la torta son mucho mayores que los obtenidos por el material filtrante para los dos casos, además se aprecia que la resistencia de la tela 1 es mayor que el de la tela 2.

Los valores mucho mayores de resistencia obtenidos por la torta de ambas telas respecto de los generados por los medios filtrantes, concuerdan con las ideas planteadas en el marco teórico en la que la resistencia del medio filtrante es despreciable debido a su valor tan pequeño frente al obtenido por la torta.

El valor de la resistencia de la tela 1 concuerda con las ideas planteadas en la discusión sobre los porcentajes de remoción de sólidos, color y turbidez en donde se plante que esta permite mayor retención de sólidos.

Se agrega la tabla 4.5 con los valores de resistencia de la torta obtenidos para el resto de las pruebas.

Tabla 4.6 Resistencia de la torta en pruebas a vacío.

Porcentaje en W de Caolín	Medios Filtrantes	Resistencia de la torta		
		$C_0/4=11.2 \text{ g/L}$	$C_0/2= 22.04 \text{ g/L}$	$C_0= 49.44 \text{ g/L}$
		α	α	α
0% W Caolín	Tela 1	2.732E+12	3.5785E+12	4.718E+12
	Tela 2	1.454E+12	3.5888E+12	4.622E+12
5% W Caolín	Tela 1	3.428E+12	3.8278E+12	5.901E+12
	Tela 2	3.412E+12	3.7493E+12	5.388E+12
10% W Caolín	Tela 1	5.221E+12	3.9209E+12	5.943E+12
	Tela 2	4.721E+12	3.9023E+12	5.094E+12
15% W Caolín	Tela 1	5.338E+12	4.0597E+12	5.207E+12
	Tela 2	5.166E+12	4.1496E+12	5.242E+12

La tabla 4.5 ofrece con mayor detalle la diferencia que existe respecto al valor de las resistencias entre la tela 1 y la tela 2 con la adición de porcentaje en peso de caolín en las diferentes concentraciones en sólidos del agua residual.

Además en esta tabla, se observa el impacto que genera el uso del caolín. 5%, 10% y 15% en W de Caolín obtienen valores de resistencia mayores que sin el uso del caolín, principalmente con el uso del 10% de caolín en todas las concentraciones en sólidos de agua residual para las dos telas. Esto seguramente a la aglomeración que generó la adición del caolín.

5. CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos, se puede aceptar la hipótesis planteada en el presente trabajo, ya que mediante la adición de un caolín como filtro ayuda, se obtuvieron mayores tamaños de aglomerado de la arcilla presente en el agua residual de una planta potabilizadora, lo cual produjo una mayor capacidad de remoción mediante el proceso de filtración.

Los resultados también muestran que la concentración de sólidos en el agua residual es un factor determinante para llevar a cabo la separación de una mejor manera. Debido a este factor, los efectos de la adición de caolín son poco apreciables para las concentraciones de C_0 y $C_0/2$, mientras que son significativos para las concentraciones de $C_0/4$ y $C_0/8$. Esto se debe seguramente al espesor de la torta que es mucho más grande en las concentraciones más grandes que en los que la presencia del caolín es mínima.

Se puede concluir que el material filtrante que finalmente se puede utilizar es el “100% algodón 321” (tela 1), ya que por lo general presenta mejores porcentajes de remoción en las mismas condiciones que el “100% Poliéster S-22” (tela 2), de la misma manera presenta mayores valores en porcentajes de remoción sólidos, color y turbidez en los clarificados además mayor valor en las resistencias de la torta.

6. Bibliografía

- CONAGUA. (2010). *Comision Nacional de Agua, Subdirección General de Administración del Agua*.
- AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION . (1999). Turbidity through the treatment proceses. *EPA Guidadance Manual Turbity Provisions*.
- Cabezas Yanez, L. Y. (2011). Diseño de un Sistema de Tratamiento de Lodos provenientes de EPMAPA -Santo Domingo. *Escuela Superior Politecnica de Chimborazo*.
- Castillo, D. (08 de Agosto de 2012). No habrá interrupción total en el servicio de agua en Morelia: OOAPAS. *MiMorelia.com*.
- Cerdeño del Castillo, F., & Pérez Lorenzo, A. (2006). *Viabilidad técnica de uso de lodos de Estaciones de Tratamiento de Aguas Potables (ETAO) en fabricación de materiales cerámicos para la construcción*. España.
- Foust, A. S. (1960). *Principios de operaciones unitarias. Primera Edición*.
- Garcés Arancibia, F., Diaz Aguirre, J., & Dellepiane Navarro, O. M. (1996). Acondicionamiento de lodos producidos en el tratamiento de agua potable. *Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*.
- Geankoplis, C. J. (1998). *Procesos de transporte y principios de procesos de separación*. CECSA.
- González, J. D. (2012). *Evaluación de la capacidad de filtración del material "fieltro" para partículas de 0.75 Nm de diámetro en un filtro prensa*. Morelia.
- McCabe, W. L. (2007). *Operaciones básicas de ingeniería química. Septima Edición*. Mc Graw Hill.

- NOM-127-SSA1-1994. (s.f.). *MODIFICACION a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental. Agua para uso y consumo.*
- Olvera, P. N., & Hernández, L. E. (Enero de 2014). El Caolín y sus aplicaciones industriales. *Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías.*
- ONU. (2014).
- Rodda; Shiklomanov. (2006). El agua, una responsabilidad compartida. *UNESCO.*
- Romero, J. A. (1999). *Calidad del Agua.* Alfaomega.
- Romero, J. A. (1999). *Potabilización del Agua.* Alfaomega.
- Salud, S. d. (2000). Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental. Agua para uso y. *Diario Oficial de la federación.*
- Schulz, C. R., & Okun, D. (1980). *Tratamiento de Aguas Superficiales para Países en Desarrollo.* New York: McGraw-Hill.
- Secretaria de Comercio y Fomento Industrial. (2000). Análisis de Agua-Determinación de la Conductividad Electrolítica-Método de Prueba. *Diario Oficial de la Federación.*
- Secretaría de Economía. (2001). NMX-AA-034-SCFI - Análisis de agua-Determinación de Sólidos y Sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-Método de prueba. *Diario Oficial de la Federación.*
- Secretaría de Economía. (2001). NMX-AA-038-SCFI - Análisis de Agua-Determinación de Turbiedad en Aguas Naturales, Residuales y Residuales Tratadas-Método de Prueba. *Diario Oficial de la Federación.*
- Secretaría de Economía. (2001). NMX-AA-045-SCFI - Análisis de Agua-Determinación de Color Platino Cobalto en Aguas Naturales, Residuales y Residuales Tratadas-Método de Prueba. *Diario Oficial de la Federación.*
- Secretaría de Economía. (2011). NMX-AA-008-SCFI - Análisis de prueba-Determinación del pH- Método de prueba. *Diario Oficial de la Federación.*

- Weng, C.-H., Lin, D.-F., & Chiang, P.-C. (2003). Utilization of sludge as brick materials. *Advance Environmental Resercher*, 679-685.
- Yunus A. Cengel, A. J. (s.f.). *Transferencia de calor y masa fundamentos y aplicaciones. Cuarta Edición*. McGraw-Hill.