



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

“MODELO Y MANUAL DE OPERACIÓN PARA LA
PRUEBA DE TRATABILIDAD DE FILTRACIÓN”

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

PRESENTA:

RUIZ PRIEGO FRANCISCO DAVID

DIRECTOR DE TESIS:

M. I. CRISTIAN EMMANUEL GONZÁLEZ REYES

Ciudad Universitaria, México, D.F., mayo de 2015.



Agradecimientos

*A la Providencia,
que me ha dado todo lo que se podría pedir.*

*A mis padres y hermana,
por ser el pilar de mi vida.*

*A mi abue Ramón,
por todo lo que he podido compartir con él.*

*A mis tíos y primos,
que han sido como padres y hermanos.*

*A mi tutor Cristian,
por su paciencia sin límites y acertados consejos.*

*A mis amigos,
que se han convertido en mi familia adoptiva.*

Índice	
Capítulo I Introducción	
1.1	Introducción 5
1.2	Objetivos 6
Capítulo II Marco teórico	
2.1	Agua Potable 7
2.1.1	Características microbiológicas 7
2.1.2	Características físicas y organolépticas 8
2.1.3	Características químicas 8
2.1.4	Características radiactivas 9
2.2	Coloides 9
2.2.1	Cargas eléctricas en los coloides 10
2.2.2	Origen de los coloides 11
2.2.3	Capacidad de intercambio iónico 12
2.2.4	Color y turbiedad 12
2.3	Coagulación 13
2.3.1	Mecanismos de coagulación 14
2.3.2	Coagulantes empleados 15
2.3.3	Factores que influyen en la coagulación 16
2.3.4	Proceso de coagulación 17
2.4	Floculación 19
2.4.1	Tipos de floculación 20
2.5	Filtración 20
2.5.1	Mecanismos de filtración 21
2.5.2	Factores que influyen en la filtración 24
2.5.3	Filtros rápidos de arena y carbón activado 25
2.5.4	Características del medio filtrante que influyen en la eficiencia 27
2.5.5	Lechos de grava 29
2.6	Hidráulica de la filtración 30
2.6.1	Métodos de control 31
Capítulo III Medios filtrantes	
3.1	Propuestas de medios filtrantes 33
3.2	Materiales a utilizar 34
3.3	Filtros de arena estratificados o de arena uniforme 41
3.4	Eficiencia en los filtros construidos 45
3.4.1	Ensayos para cuantificar la eficiencia de arena..... 46
Capítulo IV Ensayos en los medios filtrantes	
4.1	Conformación de la muestra sintética 58
4.1.1	Adición de color con pinturas artificiales 60
4.1.2	Adición de color con colorantes naturales 64
4.2	Ensayos en los filtros 66
4.2.1	Resumen de los 10 ensayos 93
Capítulo V Diseño del manual de práctica	
5.1	Introducción a la práctica 98
5.2	Manual de práctica 101
Conclusiones	
	106

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

La investigación presentada en esta tesis se realizó con el fin de proveer al Laboratorio de Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la Facultad de Ingeniería de la U.N.A.M. de dos prototipos de medios filtrantes mediante los cuales se pueda ejemplificar tanto la teoría estudiada en aulas como los sucesos prácticos que acontecen en el proceso de filtración para la potabilización de agua para consumo humano.

Esto con el fin de que los alumnos tengan un mayor alcance en el estudio y preparación de las asignaturas referentes a la filtración en el proceso de tratamiento de agua para uso y consumo humano.

Está básicamente estructurada la presente tesis en tres secciones: la primera como marco teórico e introducción a los temas relativos a filtración en la potabilización del agua y los conceptos en los que se apoyan los tratamientos de coagulación, floculación y sedimentación; los cuales son aplicados en el tren de tratamiento. La segunda sección tiene como objetivo la propuesta de un prototipo didáctico para usarse en el laboratorio y el proceso de desarrollo de los mismos. La tercera sección presenta las pruebas realizadas a los prototipos de filtración y la cuantificación de su desempeño al remover tanto color como turbiedad. Y finalmente la cuarta sección presenta el manual de práctica a utilizarse en el laboratorio.

La filtración es usada en prácticamente todas las plantas potabilizadoras de agua en el país, por lo que su estudio es de importancia para poder entender, evaluar y optimizar los diferentes métodos de filtración, tanto en lechos simples de arena, como duales de arena y carbón activado.

El proceso que se siguió para la construcción de la manual de práctica de laboratorio consistió en los siguientes pasos:

1. Conocer los materiales en desuso existentes en el laboratorio que serían las torres que se usaron para contener los lechos filtrantes.
2. Adquisición del medio filtrante grueso y fino a un proveedor foráneo, estos materiales se solicitaron en base a las recomendaciones existentes para filtros de arena rápidos en diferentes literaturas.
3. Limpieza y caracterización granulométrica de los agregados pétreos, realizadas tanto en el laboratorio de Ingeniería Ambiental como en el de Mecánica de Suelos.
4. Construcción de los medios filtrantes en base a las recomendaciones existentes.

5. Realización de las pruebas de tratabilidad e inclusión de la prueba de filtrado.
6. Caracterización de la eficiencia del filtro en remoción de turbiedad y color.

Para poder realizar las pruebas de tratabilidad se requirió diseñar una muestra sintética de agua que tuviera ciertas características como color, turbiedad y pH. Se realizaron 10 ensayos a esta muestra sintética a fin de conocer el comportamiento del proceso de C-F-S-F ante diversas situaciones como fue la variación de pH, color y cantidad de coagulante.

Una vez que se hicieron los ensayos de C-F-S-F, se procedió a redactar el manual de prácticas, el cual contiene un primer apartado en la cual el alumno puede conocer los conceptos necesarios para comprender el proceso de filtración y los parámetros que influyen en el mismo.

Un segundo apartado contiene la guía de laboratorio para realizar el ensayo, esta guía contiene todos los requisitos necesarios para desarrollar la prueba de tratabilidad.

1.2 Objetivos

Objetivo general

Desarrollar un modelo y el manual de operación para la prueba de tratabilidad de filtración con el propósito de realizar ensayos en el laboratorio como parte de las prácticas que ilustran los conocimientos teóricos de la clase de tratamiento de agua para consumo humano de la carrera de Ingeniero Civil de la Facultad de Ingeniería.

Objetivos particulares

- Mediante ensayos de laboratorio estandarizar la conformación de la muestra sintética útil para los fines del proceso de filtrado.
- Diseñar el formato de la práctica de filtración, misma que formará parte del conjunto de prácticas que ilustran la materia de Tratamiento de Agua para Consumo Humano.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 El agua potable

El agua se considera potable cuando el ser humano puede consumirla sin ningún riesgo de efectos agudos o crónicos sobre la salud. El agua suele ser tomada de fuentes naturales de abastecimiento, las cuales no siempre cumplen con las características necesarias para considerarlas potables, por lo que deben de ser sometidas a diversos procesos para garantizar su seguridad en el consumo por parte de la población.

La accesibilidad a éste recurso es vital para el desarrollo de las actividades diarias de la población, y es necesario que el agua cumpla con todos los requisitos de salubridad para evitar el contagio de enfermedades gastrointestinales en el corto plazo y de otro tipo de enfermedades crónicas a largo plazo.

La muestra sintética debe, al finalizar los diferentes procesos de tratamiento, cumplir con las características que establece la Norma Oficial Mexicana número 127 de la Secretaria de Salud, para ser considerada agua potable. Dicha norma rige los parámetros de calidad e indica la necesidad de evaluar cuatro diferentes características: microbiológicas, organolépticas o físicas, químicas y radiactivas; las cuales se detallan en los siguientes apartados.

2.1.1 Características microbiológicas

Se refieren a la presencia de virus, bacterias, protozoarios y helmintos, en general microorganismos patógenos, es decir, dañinos al ser humano. Por practicidad únicamente se identifica la presencia de organismos indicadores termotolerantes, como los coliformes totales y fecales; ya que su presencia sugiere una posible contaminación por descargas sanitarias que muy probablemente contenga microorganismos patógenos. Los límites permisibles indicados en la NOM 127 SSA se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Características bacteriológicas

Organismo	Límite permisible
Coliformes Totales	Ausentes o no detectables
Coliformes Fecales	Ausentes o no detectable

Los organismos coliformes no deben ser detectables en ninguna muestra de 100mL; en sistemas de abastecimiento de localidades con población mayor a 50,000 habitantes, estos organismos deberán

estar ausentes en el 95% de las muestras tomadas en un mismo sitio de la red de distribución, durante un periodo de doce meses de un mismo año.

2.1.2 Características organolépticas

Se refiere a aquellas propiedades del agua que podemos percibir con los sentidos y por lo tanto tienen incidencia en la apariencia estética del agua. Aunque no está establecido en la normatividad mexicana el olor y sabor se pueden evaluar mediante el juicio que establece una muestra de personas a las que solicita apreciar una porción de agua. Mientras que el color y la turbiedad, aunque pueden ser juzgados a simple vista, para su cuantificación se usan aparatos para tal fin, como lo son los colorímetros y los nefelómetros.

La Tabla 2 relaciona los parámetros físicos con los límites permisibles que acepta la Norma Oficial Mexicana 127.

2.1.3 Características químicas

El agua es un solvente universal, por lo tanto se tiene la posibilidad de que una gran cantidad de elementos y compuestos químicos estén presentes en el agua en forma de solución. Un gran número de elementos y compuestos pueden estar presentes en el agua, una porción considerable de estos no son significativos, sólo se consideran los que puedan tener un efecto adverso en la salud del consumidor, si tienen alguna influencia en el proceso de tratamiento o su remoción no es posible mediante un proceso económicamente viable. La Tabla 3 contiene los principales elementos o compuestos y sus concentraciones límite.

Tabla 2. Características organolépticas

Características	Límites permisibles
Olor y sabor	Agradable a la mayoría de los consumidores, mientras que no sean resultado de condiciones objetables desde el punto de vista biológico o químico.
Color	20 Unidades de la Escala Platino Cobalto
Turbiedad	5 Unidades de Turbiedad Nefelométrica

Tabla 3. Características químicas

Reactivo	Límite permisible (mg/L)
Aluminio	0.20
Arsénico	0.05
Cianuros	0.07
Cloro residual libre	0.2-1.50
Cobre	2.00
Fenoles	0.001
Hierro	0.30
Manganeso	0.15
Mercurio	0.001
pH	6.5-8.5 Unidades de pH
Plomo	0.025
Sodio	200.00
Zinc	5.00

2.1.4 Características radiactivas

Son características que denotan la presencia de radón, un gas radiactivo de origen natural. Para expresar la actividad radiactiva de un elemento se utilizan principalmente dos conceptos:

- La concentración, medida en Becquerel por litro., un Becquerel equivale a una desintegración por segundo.
- Dosis efectiva: medida en Sievert, que es la suma de las dosis equivalentes que reciben todos los tejidos y órganos.

La tabla 4 indica los tipos de radiaciones y sus límites máximos que puede tener el agua potable.

Tabla 4. Características radiactivas

Tipo de radioactividad	Límite permisible Bq/L (Bq= Becquerel)
Radiactividad alfa global	0.1
Radiactividad beta global	1.0

2.2 Coloides

Los coloides son uno de los principales componentes del agua captada para abastecer a una población, ya sea la que se toma de una fuente natural, como podría ser un río lago; o un agua residual de alguna industria que se someterá a un proceso de saneamiento.

Dependiendo del tipo y cantidad de coloide se sugeriría un proceso de potabilización; estas partículas son los causantes del color y turbiedad. Su presencia es indeseable debido a que pueden propiciar la proliferación de microorganismos patógenos y el subsecuente riesgo a la población.

Los coloides representan una problemática en la potabilización del agua, ya que tienen tamaños menores a un micrómetro y están cargados eléctricamente en su superficie, razón por la cual no es posible esperar su sedimentación por caída libre, tal como sucede con las partículas discretas. El tiempo de espera para la sedimentación es inviable, tal como se muestra en la tabla 5.

Tabla 5, Tiempo calculado con la Ley de Stokes requerido para sedimentar distintas partículas. Distancia 30 centímetros

Diámetro de partícula	Tipo de partícula	Tiempo
10 mm	Grava	0.3 segundos
1 mm	Arena gruesa	3 segundos
0.1 mm	Arena fina	38 segundos
0.01 mm	Sal	33 minutos
0.001 mm	Bacteria	55 horas
0.0001 mm	Coloidales	230 días
0.00001 mm	Coloidales	6.3 años
0.000001 mm	Coloidales	63 años

2.2.1 Cargas eléctricas en la superficie de los coloides

Las suspensiones coloidales tienden a estabilizarse y desestabilizarse, entre las fuerzas de estabilización y repulsión se pueden mencionar las siguientes:

- a) La carga eléctrica de las partículas.
- b) La hidratación, que comúnmente es importante para los coloides hidrofílicos, aunque en estos casos no tienen importancia.

Las fuerzas de atracción o desestabilización son las siguientes:

- a) Gravedad, no es significativa en la desestabilización de las partículas coloidales, por lo que no se explicará más sobre el tema.
- b) El movimiento browniano, el cual permite que las partículas entren en contacto, lo que constituye un requisito para la desestabilización.
- c) La fuerza de Van der Waals, es una fuerza de origen eléctrico, investigada por primera vez por el químico Johanns Diderick van der Waals. Es la principal fuerza de atracción entre los coloides. Estas fuerzas decrecen con la distancia y esto se debe a la interacción de los dipolos permanentes o inducidos en las partículas.

Para poder remover los coloides es necesario promover su aglutinamiento, de tal forma que se genere un conjunto de mayor tamaño y peso, llamado flóculo, y éste pueda sedimentarse con mayor facilidad.

Las cargas eléctricas presentes en la superficie del coloide se oponen a la formación de flóculos, ya que se encuentran estables y no permiten la atracción entre ellas al repelerse mutuamente. En el

agua, la mayoría de las partículas y moléculas de sustancias húmicas poseen superficies cargadas eléctricamente, esta carga superficial es en la mayoría de los casos negativa y depende de tres procesos:

- a) **Grupos presentes en la superficie sólida**, los cuales pueden donar o recibir protones al reaccionar con el agua. En todos los casos, la carga superficial depende de la concentración de protones (H^+), y por lo tanto del pH del agua. Si el pH aumenta, se disminuye la concentración de protones y la superficie sólida se torna más negativa.
- b) **Grupos superficiales**, que pueden reaccionar en el agua con otros solutos además de protones. La formación de los complejos depende del pH; en general, la carga originada en las partículas depende del pH del agua.
- c) Las cargas pueden ser el resultado de **imperfecciones en la estructura molecular**, como por ejemplo las arcillas suspendidas en aguas turbias. El signo de las cargas resultantes de la reacciones de moléculas imperfectas es negativa. El signo de la carga no depende de las características de la fase acuosa.

La doble capa eléctrica puede definirse como el cúmulo de iones positivos en la región de interfaz sólido-líquido que forma junto con la capa cargada negativamente, llamada también capa compacta. Los iones negativos se aproximan a la capa compacta y atraen a los iones de la capa positiva, formando la capa difusa que engloba también a la capa positiva. Esta capa difusa es resultado de la atracción de iones positivos, de la repulsión electrostática de iones negativos y de la difusión térmica.

2.2.2 Origen de los coloides

El origen de los coloides es muy diverso, aunque sólo se describirán los tres casos más comunes:

Proteínas

Son largas cadenas de aminoácidos, la cual es una molécula grande que tiene en un extremo un grupo amino y en el otro un grupo ácido. Estos dos grupos son polarizables, esto quiere decir que pueden adquirir carga eléctrica dependiendo del pH del agua en la que se encuentran disueltos. Comúnmente dos proteínas se encuentran ya sea en forma catiónica o aniónica y difícilmente se atraerán.

Colorantes

Tienen un origen de carga eléctrica similar al de las proteínas, poseen grupos ionizables en su estructura y por lo tanto pueden adquirir carga eléctrica en función del valor del pH. Un colorante es una sustancia orgánica que tiene como uso dar color a un objeto o a un textil. Algunas estructuras en el interior de la molécula originan el color. Estas estructuras parciales que originan el

color se llaman cromóforos. Los cuales en presencia de ciertos grupos aumentan la intensidad del color.

Sustitución isomórfica

Las arcillas son aluminosilicatos que provocan la turbiedad en las aguas. Son estructuras bidimensionales y está formado por capas de aluminatos y capas de silicatos alternadas. Durante la formación de la arcilla, algunos de los átomos de sílice se remplazan por uno de aluminio, el cual tiene una menor valencia que el aluminio por lo que quedará un sitio cargado negativamente.

De la información descrita anteriormente se identifica que existen diferentes factores que determinan la presencia de las cargas eléctricas en un coloide, desde el origen natural de la partícula, como por ejemplo si es de aluminio o sílice, hasta las características del agua en la que se encuentren en suspensión, tal como el pH, del cual depende la polarización de la partícula.

2.2.3 Capacidad de intercambio iónico

La carga eléctrica desbalanceada se neutralizará de forma natural. Los contraiones son los encargados de balancear a la partícula eléctricamente; estos contraiones tienen carga opuesta a los iones presentes en la superficie de la partícula.

Los contraiones pueden ser intercambiados por otros, los coloides tienen la capacidad de intercambiar los contraiones que tienen presentes en su superficie por otros presentes en el agua. Esta propiedad se llama Capacidad de Intercambio Iónico o Catiónico, dependiendo el signo de la carga se dará un intercambio iónico o catiónico.

2.2.4 Color y turbiedad

Turbiedad

Las sustancias responsables de la turbiedad en el agua son las partículas en suspensión, tales como arcillas, minerales, sedimentos y materia orgánica e inorgánica finamente dividida. Pueden ser coloidales o materia soluble de mayor tamaño. Los más comunes en las aguas turbias son las arcillas; material natural, terroso, de granos muy finos y que se plastifica cuando se satura de cierta cantidad de agua. En su mayoría están compuestas de sílice, aluminio y agua; aunque pueden estar compuestas también de hierro, álcalis y tierra alcalina.

Color

La mayoría de las investigaciones afirman que el color del agua se debe a coloides suspendidos. Se cree que el tamaño de estas partículas varía de 3.5 a 10 μm . Los coloides que provocan color en el

agua son hidrofóbicos, en otras palabras que son partículas con poca afinidad con el agua y que le confieren tonalidad.

El color orgánico en el agua es producido principalmente por los ácido fúlvicos, himatomelánicos y húmicos; llamados también sustancias húmicas. El color puede deberse también a la presencia de iones de hierro y otros metales así como por contaminación doméstica e industrial.

Es importante remover la turbiedad y color si se desea producir agua potable, ya que aguas con estas características producen rechazo por parte del consumidor, ya que pueden presentarse los siguientes casos:

- a) Agua poco estética al no ser cristalina.
- b) El color puede adicionar sabor al agua
- c) Aumenta la cantidad de cloro necesaria
- d) Proporciona nutrientes para bacterias y algas
- e) Algunas industrias requieren agua sin color ni turbiedad

2.3 Coagulación

Si bien la coagulación no es el tema central de esta investigación, se hace referencia a esta debido a que la filtración, en la mayoría de los casos, es precedida por un proceso de coagulación-floculación-sedimentación, esto con el fin de optimizar el desempeño de los filtros.

La coagulación consiste en un proceso de desestabilización química de las partículas coloidales, en este proceso se neutralizan las fuerzas que mantienen a dichas partículas separadas mediante la adición de reactivos químicos, dando inicio al proceso de coagulación y floculación.

La coagulación es uno de los procesos para la clarificación más empleados en el mundo, ya que permite eliminar gran cantidad de sustancias y materias presentes en las aguas turbias a un relativo bajo costo.

En la imagen 1 se aprecia el efecto del coagulante en los coloides, las cargas eléctricas en la superficie se desestabilizan, lo que propicia que el radio efectivo o la distancia entre coloides se reduzca y estos puedan flocularse.

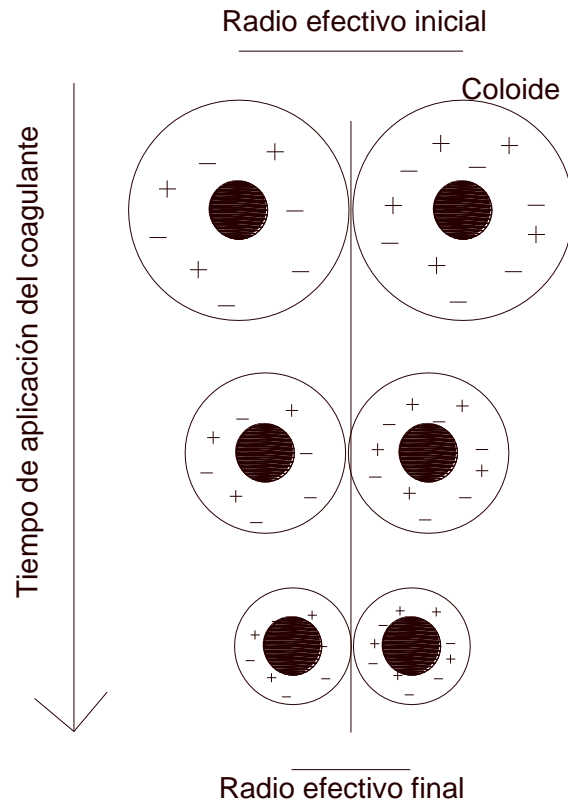


Imagen 1. Coagulación de coloides. Fuente: Elaboración propia

2.3.1 Mecanismos de coagulación

Para lograr la desestabilización de las partículas coloidales se debe recurrir a alguno de los siguientes mecanismos.

Compresión capa doble

Cuando dos partículas están próximas, sus capas difusas interactúan y generan una fuerza de repulsión, la cual depende de la distancia que las separa. Cuando se adiciona un coagulante, la cantidad de los iones de carga opuesta al de las partículas aumenta y propicia que estas se acerquen y se aglomeren.

Absorción y neutralización de cargas

Los coloides poseen carga negativa en sus superficies, las cuales son llamadas primarias y atraen a los iones positivos que se encuentran en solución dentro del líquido y así forman la primera capa adherida al coloide. El potencial electrocinético ZETA rige el desplazamiento y la interacción entre coloides, el cual se localiza en la superficie del plano de cizallamiento. El movimiento browniano de las partículas no es suficiente para poder anular por completo el potencial de las mismas, por lo cual es necesaria una agitación.

Atrapamiento de partículas dentro de un precipitado

Los coloides desestabilizados son atrapados en un floculo cuando la dosis de coagulante es la óptima para cierta concentración de sólidos suspendidos y pH. La presencia en el líquido de algunos aniones junto con los coloides acelera la formación del floculo y su precipitación.

La imagen 2 muestra dos tipos de floculación dependiendo de la cantidad de partículas suspendidas.

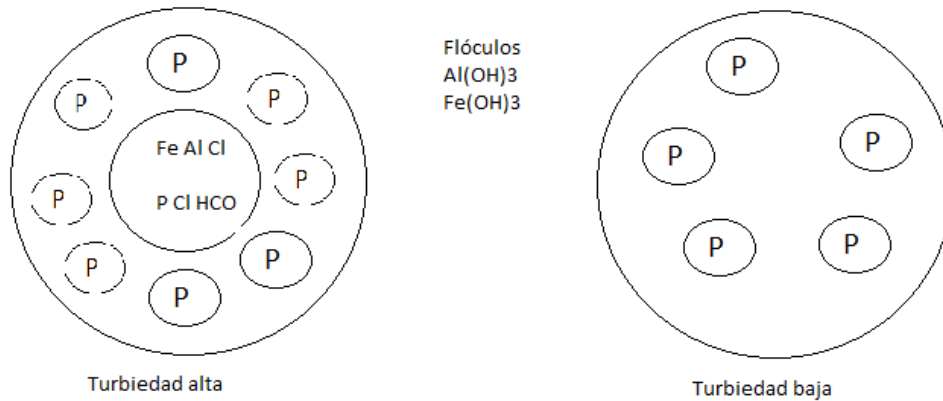


Imagen 2. Formación de floculos

Adsorción y puente

Sucede cuando los coloides están cargados negativamente en un polímero aniónico, de esta manera los coloides se adhieren a una de las extremidades del polímero. La suspensión puede reestabilizarse por una excesiva carga de polímeros.

La imagen 3 muestra como un polímero funciona en aguas con turbiedad. Las cadenas del polímero atrapan a las partículas suspendidas.



Imagen 3. Efecto del polímero en la coagulación

Principalmente la coagulación se produce al manipular las cargas eléctricas presentes en la superficie de la partícula, mediante la adición de una sustancia coagulante y posteriormente

generar un movimiento adicional al que se presenta naturalmente, llamado movimiento browniano. De esta manera los coloides podrán aglomerarse en flóculos, los cuales aumentarán de tamaño y posteriormente se precipitarán.

2.3.2 Coagulantes empleados

Los coagulantes son reactivos químicos que al adicionarse al líquido con partículas coloidales presentes son capaces, mediante reacciones químicas, de desestabilizar a estas partículas y propiciar su aglomeración para ser posteriormente retiradas con mayor facilidad. Estas partículas se aglomeran en una más grande llamada flóculo, el cual es un precipitado voluminoso y pesado, absorbente constituido por el hidróxido metálico del coagulante utilizado.

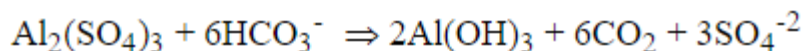
Los coagulantes comúnmente son sales metálicas, como por ejemplo:

- a) Sulfato de Aluminio
- b) Aluminato de Sodio
- c) Cloruro de Aluminio
- d) Cloruro Férrico
- e) Sulfato Férrico
- f) Sulfato Ferroso
- g) Polielectrolitos

Cuando se adicionan estas sales al agua se producen complejas reacciones químicas, las cuales varían dependiendo de la alcalinidad del agua. Estas reacciones producen los hidróxidos de aluminio o hierro que son insolubles y forman los precipitados.

En el momento en que ocurre la polimerización de los agentes coagulantes, estos atrapan los coloides y los integran a la estructura del flóculo formado.

A continuación se especifica un ejemplo de la reacción química que sucede al adicionar un sulfato de aluminio en una solución acuosa que contiene partículas coloidales. Nótese que uno de los reactantes es la alcalinidad.



2.3.3 Factores que influyen en la coagulación

Para poder optimizar la coagulación y que esta a su vez sea un método rápido y económico de clarificación, es necesario considerar los siguientes factores:

El pH es una variable importante en el proceso de coagulación, ya que cada agua tiene un pH óptimo para cierta dosis de coagulante.

Depende del tipo de coagulante a ser utilizado y de la naturaleza de los iones del agua a tratar. Si la coagulación se realiza fuera de un rango de pH ideal, se requerirán dosis muy altas de coagulante. Las sales de aluminio tienen su pH óptimo en un rango de 6.5 a 8.0 y las de hierro de 7.3 a 7.8.

Las sales disueltas contenidas en el agua a procesar influyen en la modificación del pH óptimo, tiempo requerido de floculación, dosis del coagulante a emplear y la cantidad residual dentro del efluente.

La temperatura influye en la energía cinética de las partículas en suspensión, es decir en la velocidad de su movimiento browniano. A temperaturas muy bajas o muy altas se dificulta el proceso de coagulación.

Es un factor de importancia directa en la eficiencia de la coagulación ya que si se adiciona poca cantidad de coagulante, no se neutralizan totalmente las cargas de las partículas y se forman flóculos muy pequeños que no se precipitarán con facilidad y la turbiedad residual será muy elevada, lo que provocará la rápida colmatación de los medios filtrantes que se emplearán en el siguiente paso del tren de tratamiento.

Adicionando una alta cantidad de coagulante invierte la carga de la partícula y se forman muchos microflóculos que evidentemente no podrán sedimentarse en poco tiempo.

La agitación dada al agua durante la floculación determinará si la coagulación fue completa o no. Es ideal que la masa de agua tenga una turbiedad uniforme para que la concentración de coagulante sea uniforme; la agitación debe ser uniforme e intensa en toda la masa de agua.

Se deben identificar dos tipos de mezclado, los cuales son aplicados en el momento de agregar el coagulante y posterior al efecto de éste:

- Mezcla rápida: Su función es dispersar la totalidad del coagulante en el volumen de agua a trata; justo en éste momento se agregan los reactivos químicos un una zona de fuerte turbulencia.
- Mezcla lenta: Se da tiempo suficiente a que el proceso de floculación forme los precipitados de tamaño ideal para ser removidos.

Cada turbiedad tiene una dosis óptima de coagulante, con el cual se obtiene la turbiedad residual menor, esta dosis es la óptima. Cuando existe mucha turbiedad en el agua no es necesario excederse en la dosis de coagulante, ya que la presencia de más partículas facilita la colisión y aglutinamiento entre ellas. Si es muy alta la turbiedad se recomienda utilizar un polímero aniónico para realizar una presedimentación.

2.3.4 Proceso de coagulación

Para realizar la coagulación se requiere de un periodo de tiempo muy corto, en el cual suceden muchas reacciones, las principales de ellas son:

- Hidrólisis de los coagulantes y desestabilización de las partículas suspendidas
- Formación de compuestos químicos poliméricos
- Adsorción de los coloides por las cadenas poliméricas
- Adsorción mutua de coloides
- Acción de barrido

Existen dos tipos de coagulación que dependen de la concentración de partículas suspendidas y de la cantidad de coagulante suministrado al agua, la adsorción y el barrido.

Adsorción

Existe cuando el agua tiene una alta concentración de partículas coloidales; cuando el coagulante se agrega al agua con alta turbiedad, los productos solubles de los coagulantes son absorbidas por las partículas coloidales y forman los flóculos de manera prácticamente instantánea

Barrido

Se forma éste tipo de coagulación en aguas muy claras o con baja turbiedad; en ésta forma de coagulación las partículas son atrapadas al producirse una sobresaturación de precipitados de la sal metálica empleada.

Dependiendo las características de alcalinidad y partículas suspendidas se puede relacionar con el tipo de coagulación necesaria para su clarificación y los requisitos que podría con llevar, la tabla 6 indica las diferentes situaciones que pueden existir en el momento de la coagulación y sus causas.

Tabla 6. Tipos de coagulación

Características del agua	Tipo de coagulación	Requisitos
Baja concentración de coloides, baja alcalinidad	Formación de precipitado Flóculo de barrido	Dosis altas de coagulante, adicionar partículas suspendidas o regular la alcalinidad
Baja concentración de coloides, Alta alcalinidad	Formación de precipitado Flóculo de barrido	Dosis altas de coagulante Adicionar partículas suspendidas
Alta concentración de coloides Baja alcalinidad	Adsorción por polímeros metálicos positivos	Las dosis de coagulante incrementan con la concentración de partículas Nivelar alcalinidad
Alta concentración de coloides Alta alcalinidad	Adsorción por polímeros metálicos positivos y precipitaciones de hidróxidos	Las dosis de coagulante incrementan con la concentración de partículas

El proceso de coagulación-floculación-sedimentación presenta 4 zonas de acuerdo a la dosis de coagulante agregada al muestra sintética, como se puede observar en la imagen 4 en las zonas 2 y 4 es posible efectuar la coagulación.



Imagen 4. Zonas de coagulación.

Zona I: La dosis de coagulante es baja, por lo que no es posible realizar la desestabilización de las partículas y no se produce la coagulación.

Zona II: Al aumentar la dosis de coagulante, se produce una rápida aglomeración de partículas.

Zona III: Con dosis más altas los coloides se reestabilizan y no es posible llevar a cabo el proceso de coagulación.

Zona IV: Los coagulantes al tener una concentración en el agua muy alta rápidamente se precipitan y hacen un efecto de barrido, arrastrando a las partículas suspendidas.

2.4 Floculación

Es el proceso inmediato a la coagulación de la muestra de agua; se debe agitar el volumen de agua coagulado para poder facilitar la formación y crecimiento de los flóculos que se acaban de formar, esto para que aumenten de tamaño y de peso y puedan sedimentarse con facilidad.

La imagen 5 muestra la formación de flóculos en un medio al que se le ha adicionado un coagulante.



Imagen 5. Floculación de partículas

En ocasiones los flóculos no pueden crecer lo suficiente para precipitarse, por lo que es necesario adicionar un floculante, el cual forma un puente entre las superficies de las partículas suspendidas.

El mezclado lento es benéfico para la floculación ya que facilita la colisión entre partículas desestabilizadas y así se aglomeran para formar flóculos.

2.4.1 Tipos de floculación

Existen dos tipos de floculación que son definidas por el tipo de movimiento entre las partículas y el agua en la que están suspendidas. Ambas floculaciones se presentan en el proceso, siendo primero la pericinética y posteriormente la ortocinética. A continuación se describen ambos mecanismos.

Pericinética

Es producida por el movimiento browniano de las partículas en el agua y está relacionada con la energía térmica de la misma. El movimiento browniano es un movimiento aleatorio que se observa en las partículas microscópicas que se hallan en un medio fluido. Éste movimiento estocástico se debe a que las superficie de los coloides son golpeadas por las moléculas del agua o medio fluido, las moléculas del agua se mueven debido a la agitación térmica. Mientras mayor sea la temperatura del medio fluido mayor será el movimiento browniano.

Ortocinética

El movimiento inducido por acciones mecánicas en el agua provoca la colisión de las partículas. Se deben tener en cuenta los siguientes parámetros de floculación:

- a) Floculación ortocinética, la cual depende del grado de mezclado.
- b) Gradiente de velocidad, energía necesaria para producir la mezcla.
- c) Número de colisiones entre partículas.
- d) Tiempo de retención en la unidad de floculación.
- e) Densidad y tamaño del flóculo.
- f) Formación de lodos, no deben sedimentarse en las unidades de floculación.

2.5 Filtración

Se puede definir filtro como un material poroso, como el fieltro, el papel, las esponjas, el carbón, la piedra o una masa de arena o rocas a través de las cuales se hace pasar un líquido para clarificarlo de los materiales que lleva en suspensión. Más sencillamente como un sistema cuya función es separar las partes sólidas de un líquido en una mezcla.

La filtración consiste en la remoción de las partículas coloidales presentes en una suspensión acuosa que escurre a través de un medio poroso. En el proceso de potabilización es la operación final de clarificación, y por lo tanto, de ella depende la producción de agua con calidad de acuerdo a los estándares de potabilidad.

Se concibe a la filtración como un requisito de toda agua potable, esta se realiza comúnmente a través de medios conformados por materiales pétreos y en ocasiones por un carbón antracítico. La filtración remueve el material suspendido conocido en la práctica como turbiedad, la cual se compone por suelos, metales, óxidos y microorganismos.

Se considera que la filtración es un requisito en todo proceso convencional de clarificación, esta se realiza comúnmente a través de medios de arena, antracita o carbón activado. La filtración remueve el material suspendido, representado principalmente por la turbiedad, compuestos de flóculos, suelos, metales, óxidos y microorganismos.

Si bien no es un proceso de desinfección, es decir su objetivo principal no es la inactivación de los microorganismos patógenos, muchos de estos suelen ser retenidos por el mecanismo de cernido que se presenta en el proceso de filtrado. Sirviendo finalmente para disminuir la concentración de patógenos en el agua. Los filtros rápidos pueden retener hasta el 98% de bacterias y otros microorganismos grandes como algas y diatomeas; pero los olores y sabores producidos por estos no serán eliminados a menos que se aplique otro proceso destinado a tal fin. Se recomienda que el agua posterior a la sedimentación tenga una turbiedad de 2 UNT, esto con el fin de que los filtros produzcan un agua con turbiedad final de 0.10 UNT; con estos valores se garantiza la inexistencia de huevos de parásitos como la Giardia o Cryptosporidium. Esto en base a la recomendación de la Agencia de Protección Ambiental (EPA). Los huevos de parásito son resistentes a la desinfección con un agente de cloro, por lo que es de vital importancia su remoción en los filtros.

Es un método utilizado en prácticamente todos los procesos de potabilización de aguas superficiales. Dependiendo de la calidad del agua de afluente puede usarse de manera directa, es decir en ausencia de un tratamiento C-F-S, o bien, posterior a estos procesos.

2.5.1 Mecanismos de filtración

Para que se realice el proceso de filtración son necesarios dos mecanismos diferentes pero que se complementan entre sí para mantener a la partícula retenida entre los granos del medio filtrante. Estas dos fuerzas o mecanismos son llamados de transporte y de adherencia.

Fuerzas de transporte

Las partículas por retirar son trasladadas del líquido a la superficie de los granos del medio filtrante. Éste es un fenómeno físico e hidráulico que sigue la ley de la transferencia de masas. Estas partículas permanecen adheridas a la superficie de los granos, donde por los intersticios o espacios entre los granos del medio filtrante, que son distancias sumamente pequeñas se hace posible que las fuerzas que separan a la partícula disminuyan y esta se adhiera al medio filtrante.

Mecanismos de transporte

a) Cernido

Sucede cuando una partícula es de mayor tamaño que los poros del lecho filtrante y queda retenida, generalmente, en las capas superficiales del lecho. Además cuando las partículas son capaces de resistir el esfuerzo cortante del flujo de agua.

b) Sedimentación

La gravedad hace un efecto en las partículas suspendidas durante la filtración, los espacios entre los poros funcionan como pequeñas unidades de sedimentación. Esto sucede en áreas de baja velocidad del filtro.

c) Intercepción

Usualmente el régimen de escurrimiento es laminar, y las moléculas de agua siguen una línea de corriente estable. Debido a que las partículas suspendidas tienen una densidad similar a la del agua, estas serán retenidas en relación a la superficie de los granos del medio filtrante si la línea de corriente está a una distancia menor a la mitad del diámetro de la partícula suspendida.

d) Difusión

Las partículas relativamente pequeñas tienen un movimiento browniano, el cual es producido por un aumento de la energía termodinámica y una reducción de la viscosidad del agua. Por lo tanto la eficiencia es directamente proporcional a la temperatura e inversamente proporcional al diámetro del grano filtrante.

e) Impacto inercial

Dado el escurrimiento de agua, las líneas divergen cerca de los granos del medio filtrante, de modo que las partículas suspendidas colisionan con los granos y quedan atrapadas en la superficie de estos.

f) Acción hidrodinámica

Las partículas relativamente grandes son sometidas a un diferencial en el gradiente de velocidad, por lo que serán giradas y enviadas a zonas de velocidad más baja donde serán capturadas por cernido. No es posible cuantificar la eficiencia de estas diferentes fuerzas de transporte, pero en general puede decirse que la eficiencia de los mecanismos de transporte depende de la intercepción, difusión, sedimentación y acción hidrodinámica.

La imagen 6 muestra la relación entre el tamaño de partícula y la eficiencia en su colección para acciones hidrodinámicas

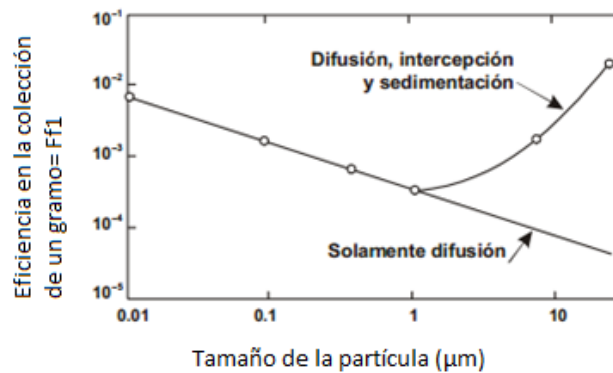


Imagen 6 Acciones hidrodinámicas. Tomado de Apuntes Ing. Yactaco

Se puede concluir de manera general que la eficacia de la recolección de las partículas suspendidas es inversamente proporcional a la velocidad de aproximación, al diámetro de los granos del medio filtrante y a la viscosidad del agua.

Fuerzas de adherencia

Las fuerzas de adherencia dependen de las características superficiales de las partículas suspendidas y de los granos. Las partículas suspendidas pueden adherirse directamente sobre la superficie de los granos o a partículas retenidas con anterioridad. Son atribuidas a dos tipos de fenómenos: la interacción entre fuerzas eléctricas y las de Van der Waals, así como al enlace químico entre las partículas y la superficie de los granos.

Mecanismos de adherencia

a) Interacción de fuerzas eléctricas y de Van der Waals

Los sólidos sumergidos en agua presentan cargas eléctricas en sus superficies, debido a la disociación de iones, cargas no balanceadas, reacciones químicas con iones presentes en la suspensión, sustitución isomórfica en la estructura de cristal. Entre el sólido y el líquido existe una

capa de iones de carga opuesta a aquella carga del sólido suspendido conocida como capa estacionaria, y otra de iones esparcidos llamada carga opuesta o difusa. Esta capa electroquímica doble establece un potencial de repulsión entre las partículas en suspensión con cargas eléctricas semejantes, esta fuerza depende de las características de la suspensión. Las características de la interfaz sólido-líquido se han evaluado en términos del potencial Zeta. Entre los sólidos es posible que se produzcan interacciones por las fuerzas de Van der Waals, de las cuales la dispersión es efectiva en distancias menores a 500 angstroms. Para que los coloides puedan adherirse entre sí y con los granos del medio filtrante, la diferencia entre las fuerzas de repulsión y atracción deben reducirse o anularse de preferencia.

b) Enlace químico entre partículas y la superficie de los granos

Los coloides son desestabilizados por los productos de la hidrólisis que a cierto pH se polimerizan. Las cadenas poliméricas adheridas a las partículas dejan segmentos extendidos en el agua, los cuales pueden ser absorbidos por otras partículas o por sitios vacantes en los granos del filtro, de esta manera nuevas partículas pueden adherirse al medio filtrante.

El uso de ayudantes de filtración o polielectrolitos inyectados en el afluente del filtro pueden aumentar su eficiencia en la remoción de sólidos suspendidos.

A pesar del conocimiento de estos mecanismos de trabajo, al día de hoy no existe un modelo matemático o conjunto de modelos que pueda caracterizar el funcionamiento de un filtro. Siempre es conveniente realizar modelos de filtrado pilotos para conocer sus características.

2.5.2 Factores que influyen en la filtración

La eficiencia de la filtración depende de las características de la suspensión, del medio filtrante, de la hidráulica de la filtración y la calidad del efluente.

Características de la suspensión

a) Tipo de partícula

El tipo de partículas primarias existentes en la muestra sintética influyen en la eficiencia; las algas por ejemplo las algas producen mayor pérdida de carga que las partículas de arcilla o sílice

b) Tamaño de partícula

El tamaño crítico de las partículas suspendidas es de 1 μm , bajo éste tamaño se crean pocas oportunidades de contacto entre la partícula suspendida y el medio filtrante. Se pueden usar coagulantes o polímeros para ajustar el tamaño de las partículas suspendidas para obtener una eficiencia mayor.

c) Densidad de partícula

Cuanto mayor sea la densidad de las partículas suspendidas en el agua, mayor será la eficiencia de remoción de partículas con tamaño mayor al tamaño crítico.

d) Dureza de los flóculos

Los flóculos débiles se romperán y fragmentarán en flóculos más pequeños, los cuales atravesarán el medio filtrante sin haber remoción.

e) Temperatura del agua

A mayor temperatura se encuentra una mayor eficiencia de la remoción. Ya que la difusión se vuelve un mecanismo importante para partículas bajo el tamaño crítico.

f) Concentración de partículas en el filtro

Cuando se empiezan a colectar partículas en el lecho filtrante, la eficiencia aumenta ya que estas partículas retenidas anteriormente colectan las nuevas partículas suspendidas.

g) Potencial Zeta

Cuando las partículas suspendidas y los granos del medio filtrante tienen el potencial zeta del mismo signo, la interacción entre las capas dificulta la adherencia y por lo tanto la eficiencia.

h) pH del agua

Influye en la capacidad de intercambio iónico entre las partículas suspendidas y los granos del medio filtrante. pH bajo 7.0 disminuye el intercambio de cationes y aumenta el intercambio de aniones sobre las superficies positivas; viceversa para pH mayor a 7.0.

2.5.3 Filtros rápidos de arena y carbón activado

En teoría, el tamaño y espacio libre entre las partículas de un medio filtrante debe de variar de grueso a fino en el sentido del flujo. Con el fin de remover en la zona de medio fino el material más pequeño. De esta forma se aprovecha mejor toda la altura del lecho filtrante, se incrementa la tasa y carrera de filtración y se mejora la calidad del efluente.

En los medios de arena convencionales, la permeabilidad debe aumentar con la profundidad del lecho; ya que los granos de arena se acomodan de forma inconveniente al ser el filtro retrolavado, esto se debe a que los granos más finos se depositan sobre los granos más gruesos, los cuales por su tamaño se sedimentan con mayor rapidez. Cuando un filtro se retrolava y los granos de mayor tamaño se acumulan en la zona inferior del lecho y los finos en la parte superior, se pierde su capacidad de retención de flóculos, ya que la mayoría de estos serán retenidos en las primeras secciones del lecho filtrante, creando así una rápida saturación o colmatación del filtro limitando su carrera de filtración y pudiendo generar zonas de presión negativa en el lecho filtrante, lo cual no es deseado.

El hecho de obtener una estratigrafía conveniente de mayor a menor tamaño de diámetro se consigue con el empleo de dos o más medios filtrantes de diferente granulometría; además de la diferencia de diámetro de partícula se sugiere que las arenas más finas tengan una densidad mayor que las más grandes para conseguir una estratificación de mayor a menor granulometría en el sentido de flujo del agua es necesario que los diferentes estratos tengan diferentes densidad cuando éste es retrolavado, así los granos más pequeños se sedimentarán en la zona inferior del lecho filtrante más rápido que los grandes.

Arenas sílicas

Es el mineral más común de la tierra, compuesto por dióxido de silicio o sílice, SiO_2 . Puede encontrarse en el mundo como componente de rocas o en forma de depósitos puros, es el principal constituyente de las rocas ígneas como el granito, riolita y la pegmatita.

Los usos y aplicaciones de éste tipo de arena son grandes en las industrias ya que contiene propiedades físicas y químicas muy importantes, como son la dureza, resistencia química, alto punto de fusión y transparencia.

Las arenas sílicas contienen un polvo fino, el cual puede causar daño pulmonar grave e irreversible si es respirado durante tiempos de exposición prolongados.

De acuerdo a diferentes bibliografías, la arena debe tener una solubilidad al ácido clorhídrico del 40% en 24 horas, menor del 5%, densidad relativa mayor al 2.5 y debe ser limpia y bien graduada.

Carbón activado

Según el estándar D388-84 de la ASTM, se clasifica un carbón como antracítico cuando tiene propiedades no aglomerantes y cumple las especificaciones mencionadas en los siguientes párrafos.

Es un carbón poroso que tiene la capacidad de adsorber partículas coloidales presentes ya sean en gases o líquidos. Todas las partículas de carbón tienen la capacidad de adsorber de forma efectiva dado que al “activarse”, es decir al hacerlo poroso mediante diversos mecanismos, éste aumenta su área específica, por lo que aumenta su capacidad de retención de partículas.

Los átomos de carbón que forman el sólido de carbón están ligadas entre sí mediante enlaces covalentes. Cada átomo comparte un electrón con otros cuatro átomos de carbono. Los átomos no superficiales distribuyen sus cuatro electrones en todas direcciones, mientras que los superficiales, ligados con otros cuatro átomos deben compartirlos en un espacio menor, por lo que se produce un desequilibrio de fuerzas. Éste desequilibrio es lo que permite atrapar las partículas suspendidas en el adsorbato.

Esta fuerza es conocida como Fuerza de London, la cual es un tipo de fuerza de Van der Waals. Esta fuerza es efectiva para retener al adsorbato, pero no tan fuerte como para considerar que se forma

una unión química irreversible que forme una nueva estructura molecular. Esto permite que el carbón activado puede “reactivarse” después de una determinada carrera de filtración.

Las moléculas adsorbidas en el carbón usualmente son covalentes y no iónicas; éstas últimas tenderían a recibir o donar electrones a los átomos de carbono. Los enlaces entre átomos de carbono e hidrógeno son covalentes, y es por esta razón que el carbón activado es un buen adsorbente de partículas orgánicas.

Según la AWWA, los materiales adsorbentes deben tener valores de dureza de 2.7 o mayor en la escala de Mohs, densidad relativa mayor al 1.4, solubilidad menor al 1% y coeficiente de uniformidad menor de 1.7, altura de lecho de 60-70 cm, tamaño efectivo de 0.70mm o mayor.

En forma general se puede decir que cualquier carbón puede activarse; su eficiencia al activarse dependerá del orden de sus moléculas de carbono ya que éste orden condiciona la facilidad de generar poros en la superficie del carbón.

Los carbones pueden clasificarse con base en el grado de coquización u orden de sus moléculas de carbono. Mientras menos orden haya en la estructura del carbón se tendrán carbones muy suaves y fáciles de activarse.

Otros materiales que pueden usarse como carbones activados son las maderas poco duras, carbones minerales como los ligníticos, bituminosos y de antracita, cáscaras o huesos vegetales como las conchas de coco, huesos de aceituna o durazno y las cáscaras de nuez.

El carbón puede activarse mediante procesos térmicos o químicos. Los procesos térmicos consisten en provocar que el carbón se oxide parcialmente y producir la creación de poros, pero evitando la gasificación del material y por ende la pérdida de carbón necesario. El carbón debe someterse a temperaturas de entre 600 y 1100 °C y en una atmósfera controlada mediante el ingreso de vapor de agua o nitrógeno.

Los procesos químicos suceden antes de que la materia prima se carbonice. Se emplean agentes deshidratantes como el ácido fosfórico que rompe las uniones que ligan la retícula de átomos. Posteriormente el material se carboniza a temperaturas cercanas a 500 °C, finalmente se lava para eliminar los restos de reactivo y otros productos.

Cuando se activa químicamente el carbón siempre quedarán residuos del ácido usado en el proceso de activación, por lo que los primeros caudales de agua filtrada tendrán un pH bajo; sucede lo contrario en caso de que se haya usado un reactivo alcalino para la activación.

Si se activó térmicamente el carbón, los primeros litros filtrados tendrán un pH aumentado; esto se debe a que los vegetales tienen cantidades importantes de sodio, potasio, calcio y otros elementos que después del proceso de carbonización permanecen en el carbón formando óxidos, estos al

entrar en contacto con agua se convierten en hidróxidos y posteriormente al disolverse en agua aumentan el pH.

2.5.4 Características del medio filtrante que influyen en la eficiencia

El tipo de medio filtrante debe elegirse en función de la calidad del agua filtrada deseada, duración de carrera de filtración y facilidad de lavado. Un medio filtrante ideal es aquel de granulometría determinada que requiere la menor cantidad de agua para ser lavado y que es capaz de remover la mayor cantidad de partículas suspendidas.

Tradicionalmente se ha usado arena como medio filtrante, si bien se evita la arena de granulometría menor por tener carreras de filtración más cortas. Se opta por estratificar un filtro, colocando las arenas de granulometría de mayor a menor tamaño en sentido del flujo de agua. Así se evita una rápida colmatación en la superficie del filtro y la existencia de presiones negativas en el lecho del filtro.

Los lechos duales de arena y carbones antracíticos tienen mejor desempeño que los filtros simples de arena. El medio filtrante se debe elegir en base a la economía, accesibilidad de materiales, calidad buscada y disponibilidad de personal calificado para operar las instalaciones.

El lecho filtrante debe ser claramente especificado granulométricamente mediante los siguientes parámetros:

a) Tamaño efectivo

Es una relación porcentual en peso acumulado que pasa a través de una serie de mallas granulométricas; el tamaño efectivo indica al tamaño de grano límite que representa el 10% de los granos de menor tamaño

b) El coeficiente de uniformidad

Es una relación entre el D10 o tamaño efectivo y el D60 o el tamaño de malla que deja pasar el 60% del peso del medio filtrante. Mientras más grande sea el CU menos uniforme es la muestra. Si el valor del coeficiente de uniformidad es 1, quiere decir que todos los granos de una muestra de arena son iguales. Mientras que si el valor aumenta, se explica con la razón de que hay más variación entre los granos de los estratos más pequeños en comparación con los granos de los estratos de arena más grandes.

c) Tamaños máximos y mínimos de grano

Indican los tamaños límite de los granos que puede tener el lecho filtrante. Los cuales son obtenidos directamente de la curva granulométrica creada para cierta arena a utilizar.

d) La altura de los lechos

Se especifica tanto para la arena sílica como para el carbón activado, dependiendo el tipo de filtro existirá cierta altura de lecho para cada granulometría de arena sílica, así como una relación entre material pétreo y carbón activado.

Para casos de filtros duales de arena y antracita o carbón activado, se deben considerar las siguientes indicaciones, con el fin de evitar un grado de intermezcla que afecte la porosidad de la región de contacto entre diferentes capas de material:

- El D90 de la antracita y el D10 de la arena deben mantener una relación cercana a 3.0.
- El D90 y D10 de la arena deben mantener una relación cercana a 2.0.

Para definir granulométricamente tanto la arena como la antracita o carbón activado, se deben de usar mallas de la serie Tyler.

2.5.5 Lechos de grava

Éste lecho dependerá de sistema de drenaje usado, del tamaño y profundidad de la capa superior de arena o antracita. Tiene como fin dar un soporte al lecho de arena y evitar que sus granos entren al sistema de drenaje, así como distribuir uniformemente el agua de retrolavado en toda el área transversal del filtro.

Un lecho de grava ideal es uno en el cual ésta es casi esférica en forma y existe un incremento uniforme en tamaño desde el techo hasta el fondo. Éste lecho puede variar entre 15 y 60 cm, siendo de 45cm la prescrita para filtros rápidos. La capa del fondo debe extenderse por lo menos 10cm sobre el punto de salida más alto del agua de lavado proveniente del sistema de drenaje. La grava debe ser dura, redondeada, con densidad relativa menor a 2.5. La tabla 7 muestra el lecho de grava sugerido por Romero Rojas.

Tabla 7. Estratos de grava

Estrato	Espesor
1" - ¾"	7.5 cm
¾" - ½"	7.5 cm
½" - ¼"	7.5 cm
¼" - 3/8"	7.5 cm
3/8" - 1/16"	7.5 cm

La tabla 8 presenta las proporciones de grava en un lecho filtrante de acuerdo a las guías publicadas por CEPIS.

Tabla 8. Estratos de grava

Estrato	Espesor
1 ½" - ¾"	20 cm
¾" - ½"	6 cm
½" - ¼"	6 cm
¼" - 1/8"	7.5 cm

La tabla 9 resume las características de filtros de diferentes lechos encontradas en la bibliografía, tanto para filtros rápidos, como lentos y duales.

Tabla 9. Características de los medios filtrantes

Características	Lentos de arena	Rápidos de arena	Duales
Tasa de filtración	$2-5 \frac{m^3}{m^2 d}$	$120 \frac{m^3}{m^2 d}$	$180-480 \frac{m^3}{m^2 d}$
Medio	<i>Arena muy fina</i>	<i>Arena estratificada</i>	<i>Arena y antracita</i>
Distribución del medio	<i>No estratificado</i>	<i>Grueso a Fino</i>	<i>Grueso a fino</i>
Duración de carrera	<i>20-60 días</i>	<i>12-36 horas</i>	<i>12-36 horas</i>
Profundidad medio	<i>0.6-1.0 m</i>	<i>0.60-0.75m</i>	<i>Antracita: 0.4-0.6m Arena 0.15-0.30m</i>
Profundidad grava	<i>0.30 m</i>	<i>0.30-0.45m</i>	<i>0.30-0.45m</i>
D10	<i>0.15-0.35</i>	<i>0.45-0.55</i>	<i>Antracita= 2 D10 Arena</i>
CU	<i>Cercano a la Unidad</i>	<i>1.0-2</i>	<i>Antracita= Menor a 1.7</i>

2.6 Hidráulica de la filtración

Existen parámetros hidráulicos que deben considerarse durante el filtrado y que influyen en su eficiencia:

Carga hidráulica disponible

Es la altura del agua sobre nadante en el filtro, es un valor empírico que influye en la duración de la carrera de filtración. Los filtros de tasa declinante producen carreras de filtración más largas que los de tasa constante para la misma pérdida de carga en el medio filtrante y la misma tasa de filtración promedio. Los filtros de tasa constante necesitan una carga hidráulica superior a los de tasa declinante para obtener la misma carrera de filtración.

La carga hidráulica depende de factores como espesor y granulometría del medio filtrante, economía, calidad deseada. Con cargas hidráulicas disponibles mayores se tienen carreras de filtración más largas, pero el medio filtrante sufre una compactación que dificulta el retrolavado.

Método de control del filtro

Los más empleados son tasa constante y declinante. En los de tasa constante, el filtro es forzado, hacia el final de su carrera de filtración a operar con la misma tasa de filtrado que cuando inició su carrera. Aquí se obtiene una calidad de afluente menor que una obtenida mediante un control que no fuerce a la unidad a trabajar con una tasa mayor a su capacidad de filtración, definida por el nivel de colmatación del medio filtrante, Estos son los filtros de tasa declinante, donde cada unidad tomará el caudal que es capaz de filtrar.

Calidad del efluente

Es una propiedad ajena a las características del filtro; depende del uso que se le dará al agua filtrada y a la existencia de una operación eficiente. Se recomienda que la Turbiedad del efluente no sea mayor a 5 [UTN] y el color tampoco presente magnitudes mayores a 5 [UC]. Comúnmente un filtro retiene el 99% de microorganismos.

No es conveniente estudiar estos parámetros por separado para conocer el comportamiento del filtro.

2.6.1 Métodos de Control

Tasa constante y nivel variable

El nivel de agua sobrenadante al lecho filtrante variará desde un valor mínimo, cuando el lecho filtrante se encuentra limpio y aumentará conforme el medio filtrante se colmate con los sólidos suspendidos capturados.

Cuando se alcance el nivel máximo indicado el lecho filtrante deberá ser lavado. El nivel mínimo deberá estar siempre sobre el lecho filtrante.

Éste tipo de control de operación presenta ventajas y desventajas

Ventajas

- a) Si el caudal de muestra sintética es constante, la tasa de filtración se mantiene constante sin emplear equipos especiales
- b) El hecho de tener un vertedor sobre la capa filtrante elimina la posibilidad de tener presiones negativas en el interior del lecho filtrante.
- c) La pérdida de carga de un filtro es visual y depende solamente del operador verificar la ocurrencia del nivel máximo permitido para realizar el retrolavado

d) Con un vertedor es fácil calcular el caudal de entrada.

Su única desventaja comparándolo con otros sistemas de control de filtración constante, es la altura del nivel de operación máximo por la existencia del vertedero de entrada que debe tener descarga libre.

Tasa constante y nivel constante

El nivel de operación del agua en los filtros de gravedad no varía mucho a lo largo de la carrera de filtración. La carga hidráulica disponible es constante.

Para poder mantener estos parámetros constantes, es necesario un dispositivo controlador que genere una pérdida de carga igual a la diferencia entre la carga hidráulica disponible y la suma de las pérdidas de carga en el lecho filtrante y líneas de drenaje y accesorios. Conforme la carrera de filtración aumenta, aumenta la pérdida de carga en el medio filtrante y por lo tanto el dispositivo mencionado debe reducir la pérdida de carga para mantener la igualdad.

Cuando el dispositivo alcanza su valor mínimo de pérdida de carga se debe de realizar el lavado del lecho filtrante. Ya que a partir de éste momento el aumento de la pérdida de carga del lecho filtrante no podrá ser compensada por el dispositivo de control.

Es posible que en ocasiones los efluentes no sean iguales a los afluentes, esto se debe al incremento en el nivel de agua sobre el lecho filtrante, en éste caso pueden colocarse dispositivos para regular el caudal para igualar los afluentes con los efluentes.

Carga constante y tasa declinante

Éste método consiste en aquel donde la carga hidráulica es aplicada con la misma magnitud a todo lo largo de la carrera de filtración, por lo que a lo largo de la carrera el caudal se irá reduciendo. Éste método de control proporciona la calidad del caudal tratado superior que en los otros métodos de control.

En la unidad filtrante se identifican 3 niveles de operación, comúnmente de nominados N1, N2 y N3. N1 representa el nivel mínimo de operación, es decir cuando el filtro o es nuevo o ha sido recientemente lavado. Siendo el nivel N2 el máximo de operación, cuando la carga hidráulica alcanza esta situación el filtro debe ser lavado ya que ha sido colmatado lo suficiente. El nivel N3 es el que se presenta en el lavado, cuando el lecho expandido por el agua en flujo contrario alcanza el nivel máximo de gasto en contrasentido.

Éste método es recomendable sobre la tasa constante y nivel variable por su poca inversión en equipos controladores, aunque el caudal tratado a lo largo de la carrera de filtración disminuye, es preferible también debido a que el volumen de agua producido es mayor por unidad de pérdida de carga.

CAPÍTULO III

MEDIOS FILTRANTES

3.1 Propuesta de medios filtrantes

Con el objetivo de ilustrar los conocimientos teóricos referentes al proceso de filtración se busca que la prueba de filtración considere dos tipos de filtros:

- Lecho simple de arena
- Lecho dual de arena y carbón activado

La Norma Oficial Mexicana 127 indica que el carbón activado es el mejor medio filtrante para la remoción de color debido a su capacidad de adsorción; si bien la antracita posee estas cualidades no se ha decidido usarla ya que la Norma no la menciona.

Con base en las recomendaciones contenidas en distintas publicaciones, como por ejemplo del Ing. Víctor Yactaco, John C. Crittenden y guías de la institución CEPIS, acerca de las características de los medios filtrantes, se ha establecido la granulometría para el modelo del filtro y altura de los lechos filtrantes. La tabla 10 muestra las características de los medios filtrantes propuestos.

Tabla 10 Características de los filtros construidos

Características	Lecho simple de arena	Lecho de arena y carbón activado
Profundidad	70 centímetros	Arena: 20 centímetros Carbón Activado: 50 centímetros
Tamaño efectivo	0.50 mm	0.50 mm
Coefficiente de uniformidad	1.3	1.3
D60	0.65 mm	0.65 mm
Estratificación Arena	De gruesa a fina	Arena: De gruesa a fina Carbón activado: sin estratificar
Área transversal	26.5 cm ²	26.5 cm ²
Lecho de grava	25 centímetros	20 centímetros
Método de control	Tasa declinante, nivel constante	Tasa declinante, nivel constante
Tasa de filtración	0.76 $\frac{L}{s}$	0.95 $\frac{L}{s}$

3.2 Materiales a utilizar

Para poder construir los modelos de filtración se utilizaron tanto materiales existentes en el laboratorio como materiales comprados a diferentes proveedores, tales como arena sílica de distintas granulometrías, grava sílica, materiales de limpieza, herramientas y diversos artículos, esto en función de las necesidades a lo largo del desarrollo del proyecto. Las imágenes 7, 8 y 9 muestran los materiales que se encontraban en el laboratorio.



Imagen 7. Tubos para filtros delgados

Para decidir las características granulométricas de la arena que conformará el filtro, se trazó la curva granulométrica de acuerdo a las recomendaciones. Los parámetros que definieron la curva granulométrica fueron el tamaño efectivo, el coeficiente de uniformidad y el D60.

Tabla 11. Características granulométricas de la arena sílica.

Tamaño Efectivo (D10)	0.50 mm
Coeficiente de Uniformidad	1.3
Tamaño retiene 40% (D60)	0.65 mm

El tamaño efectivo o D10 se define como el diámetro de grano que queda retenido justo dejando por encima un 90% del peso total del material, es decir, el 10% pasa una malla de tamaño D10.



Imagen 8. Recipiente de filtro grueso



Imagen 9. Carbón activado

El coeficiente de uniformidades una relación del D60 entre el D10. Valores cercanos a la unidad indican muestras de arena con poca variación en los diámetros de los granos más grandes y más pequeños. Números de C.U. más elevados indican gran disparidad en los tamaños de granos de arena.

El D60 tiene una definición similar, el 40% de los granos tienen un diámetro mayor y el 60% un diámetro menor. El D60 puede ser calculado multiplicando los valores de D10 y CU. Los cuales son especificados por la bibliografía.

Con el valor de D10 y D60 se traza la curva granulométrica y con esta se definen los porcentajes en peso de diferentes granulometrías de arena que conforman la masa total del lecho. Para el trazado de la curva granulométrica se procedió de la siguiente forma:

1. Sobre un sistema cartesiano que tiene el eje de las ordenadas en unidades decimales y eje de las abscisas en unidades logarítmicas, se ubicó el punto (0.50, 10%) y (0.65, 60%), dichos puntos significan el D10 en el eje X y el porcentaje que retiene en el eje Y.
2. Unir los dos puntos anteriores. De éste modo se ubican en la gráfica los intervalos de diámetro de grano, siendo posible conocer los porcentajes de peso que representan del total de la masa de arena.

La imagen 10 es curva granulométrica construida con los datos de arena sílica deseada para construir el filtro.

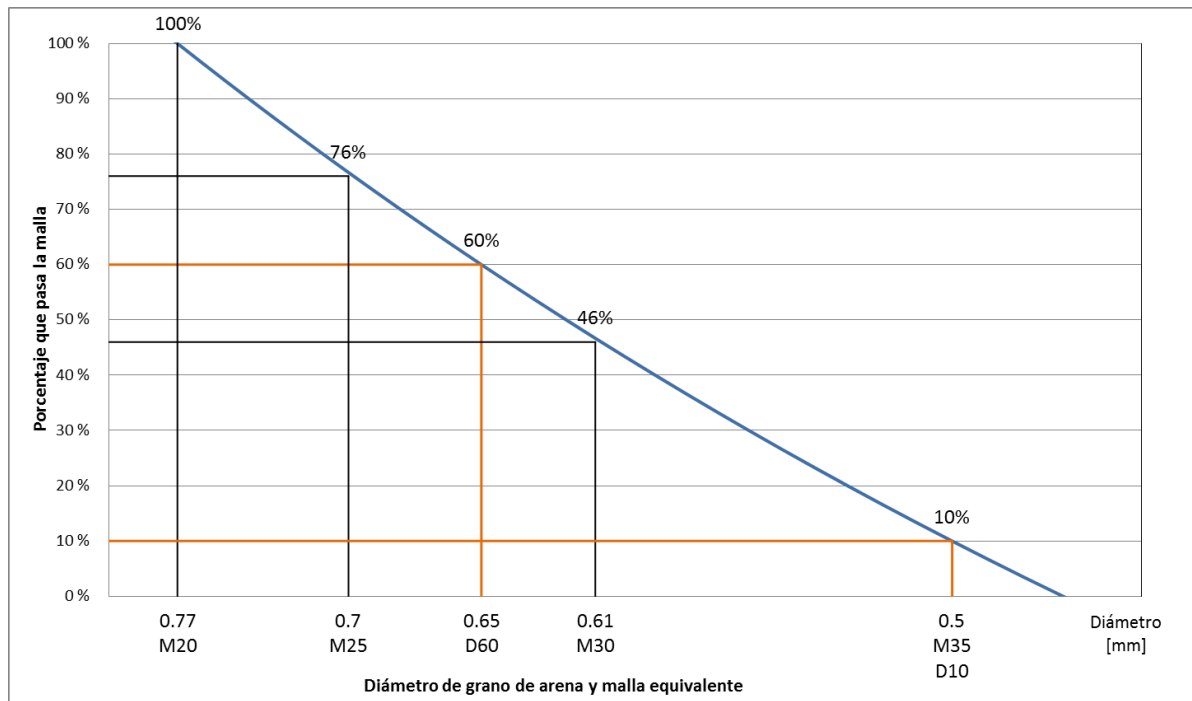


Imagen 10. Curva granulométrica de la arena requerida

Nótese que en el eje de las abscisas de la gráfica mostrada en la imagen 10 se expresa el diámetro de grano, adicionalmente se expresa el D10 y el D60, además el número de malla correspondiente, por ejemplo la M30, que significa la malla 30, la cual tiene una separación de hilos de 0.61 mm.

El proveedor de la arena fue la empresa Sílica Red S.A. de C.V., la cual se encuentra establecida en Minatitlán, Veracruz. Se decidió éste proveedor debido a que maneja todas las granulometrías requeridas, tanto de arena sílica como de grava.

Ya que podría haber pérdidas de arena y grava al momento de hacer el tamizado, se compró más material del requerido. La tabla 12 resume la compra realizada.

Tabla 12. Materiales pétreos comprados

Granulometría	Cantidad de arena
Arena 20-25	28 kilogramos
Arena 25-30	35 kilogramos
Arena 30-35	43 kilogramos
Arena 35-40	12 kilogramos
Grava 1" – 3/4"	9 kilogramos
Grava 3/4" – 1/2"	9 kilogramos
Grava 1/2" – 3/4"	9 kilogramos
Grava 3/4" – 1/8"	9 kilogramos
Grava 1/8" – 1/16"	9 kilogramos

Todo éste agregado pétreo fue recibido en la bodega de la empresa ubicada en la calle 10 de abril de 1919, Col. Alborada en la Delegación Xochimilco. La imagen 11 fue tomada durante el traslado del material.



Imagen 11. Traslado del material

Posteriormente se almacenó hasta que llegase el momento de utilizar las diferentes granulometrías de arena y grava en cubetas en el Laboratorio de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, como se muestra en la imagen 12.



Imagen 12. Material almacenado en cubetas

Una vez recibido el material a simple vista se notaba que el material estaba mezclado con otros tamices y no correspondía con las características granulométricas pedidas; razón por la cual se procedió a someterlo a un proceso de lavado y tamizado.

El lavado se hizo en el Laboratorio de Ingeniería Sanitaria y Ambiental tallando la arena con agua de la llave y detergente líquido o en polvo.

Mientras que el tamizado se realizó, en principio, en el Laboratorio de Geotecnia de la División de Ingenierías Civil y Geomática, y posteriormente en el Laboratorio de Ingeniería Sanitaria y Ambiental.

El proceso de tamizado y lavado no fue fácil, ni rápido, ya la cantidad de arena y grava tomó un tiempo muy largo, cerca de dos semanas y media en total para cribar los 165 kilogramos de grava y arena.

La imagen 13, 14 y 15 muestran el proceso de tamizado de la arena; en la imagen 13 se observa la arena en bandejas metálicas para ser metidas al horno durante 24 horas a 105°C; mientras que la 14 y 15 muestran las máquinas agitadoras de tamices manual y eléctrica respectivamente.



Imagen 13. Arena en bandejas



Imágenes 14 y 15. Máquina manual y eléctrica

Una vez limpio el material y clasificado de acuerdo a las necesidades se calculó la densidad de la arena. Para el cálculo de la densidad de la arena se tomó en una probeta graduada de 1000 mL una muestra, de esta forma se asegura el volumen que se está trabajando; se coloca arena hasta los 100 mL en la probeta y posteriormente en un vaso de precipitados se colocaron esos 100 mililitros o centímetros cúbicos para medir su masa y con ello calcular la densidad.

En la imagen 16 se observa una muestra de arena en la báscula analítica.

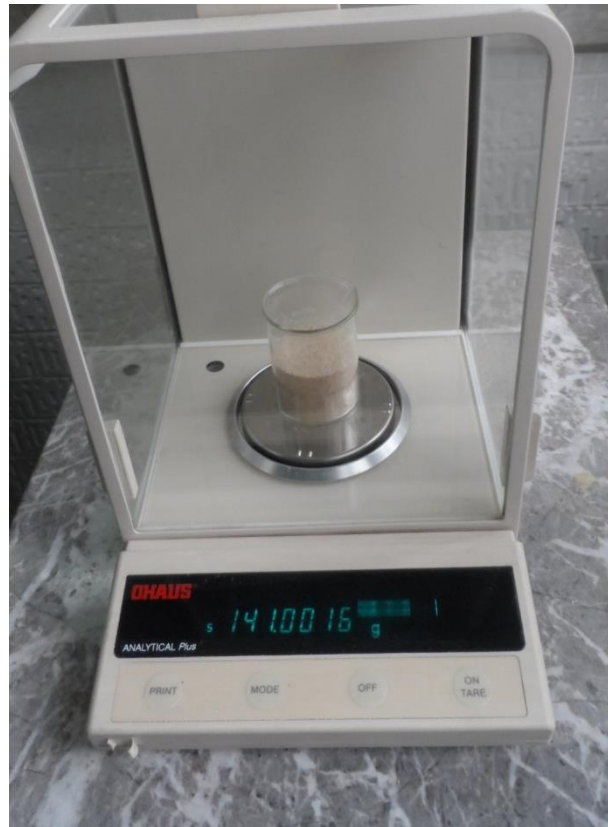


Imagen 16. Báscula analítica

La tabla 13 resume las densidades calculadas para cada granulometría de arena

Tabla 13. Densidad de arenas

Arena	Densidad
Arena 20-25	1.51 $\frac{gr}{cm^3}$
Arena 25-30	1.50 $\frac{gr}{cm^3}$
Arena 30-35	1.50 $\frac{gr}{cm^3}$
Arena 40-45	1.50 $\frac{gr}{cm^3}$

3.3 Filtro de arena estratificada y de arena uniforme

En principio la idea planteada era de hacer dos filtros de arena, uno estratificado y otro con los diferentes porcentajes de arena en una mezcla de arenas uniforme, es decir sin tamizarla en capas que fueran de mayor a menor grosor en la dirección del flujo de agua. Los diferentes autores consultados sugieren que los filtros se estratifican dependiendo de su coeficiente de uniformidad, ya que la mayoría de ellos sugieren coeficientes de entre 1 y 2, siendo preferentemente lo más cercano a 1; esto con el fin de evitar una rápida colmatación del filtro, mas no indican sí estratificar o no afecta la eficiencia del filtro.

La arena seleccionada poseía un coeficiente de uniformidad de 1.3, lo cual cumple con las recomendaciones, pero no se encuentra lo suficientemente cerca o lejos del valor de 1 como para afirmar que debe estratificarse, por lo que se decidió hacer dos filtros con las mismas características granulométricas pero uno estratificado y el otro con arena uniforme; posteriormente se ensayaron y observaron sus eficiencias.

Con la información y la duda expuesta en el párrafo anterior se procedió a la construcción de los dos filtros de arena, uno con arena tamizada y el otro sin tamizar o arena uniforme, se probó su eficiencia en la remoción de color y turbiedad mediante la filtración de agua sintética fabricada en el laboratorio, dicha muestra sintética fue sometida a la prueba de jarras con una dosis de coagulante óptimo, la cual fue obtenida en pruebas realizadas en semestres anteriores.

El filtro que resultara más efectivo de los dos se conservaría, mientras que el otro sería desarmado y se sustituiría con el filtro dual de arena y carbón activado.

Se decidió usar los tubos delgados en vez del grueso ya que conforme se avanzó en los trabajos se observó que la cantidad de agua que se requiere para probar el filtro es considerable. Además, no hubiera sido posible producir la cantidad de agua sintética para poder operarlo; mientras que con los tubos delgados es posible obtener, como resultado de una sola prueba de jarras, la cantidad necesaria para probar el filtro.

El objetivo inicial del proyecto era utilizar el recipiente grueso y el hecho de desecharlo porque no hubiera sido posible fabricar suficiente muestra sintética en una sola prueba de coagulación-floculación-sedimentación, implicó no utilizar gran parte del material comprado, lavado y tamizado.

En la siguiente tabla 14 presenta los diferentes estratos de grava y arena y sus cantidades ya sea en peso para el filtro estratificado o en porcentaje para el filtro de arena uniforme. Las unidades del filtro estratificado se expresan en centímetros ya que éste está conformado por diferentes capas de arena con diferentes alturas; mientras que en el filtro no estratificados se expresan en porcentajes ya que indican una cantidad de peso de cierta granulometría de arena sobre el total de la masa del medio filtrante.

Tabla 14. Materiales pétreos usados

Granulometría	Filtro estratificado	Filtro arena uniforme
Arena 20-25	16.8 cm	10 %
Arena 25-30	21 cm	24 %
Arena 30-35	25.2 cm	36 %
Arena 35-40	7 cm	40 %
Grava 1" – ¾"	5 cm	4 cm
Grava ¾" – ½"	5 cm	4 cm
Grava ½" – 3/8"	5 cm	4 cm
Grava 3/8" – 1/8"	5 cm	4 cm
Grava 1/8" – 1/16"	5 cm	4 cm

Las imágenes 17, 18, 19, 20, 21 y 22 muestran el llenado de los tubos con los estratos de grava y arena



Imágenes 17 y 18. Colocación de grava



Imágenes 19 y 20. Colocación de arena en filtros delgados



Imágenes 21 y 22. Colocación de arena en filtros delgados

La imagen 23 muestra los filtros de arena estratificada y arena uniforme construidos.



Imagen 23. Filtros terminados

3.4 Eficiencia en los filtros construidos

Los medio filtrantes deben ser ensayados para conocer su desempeño para remover partículas suspendidas, esto dependerá de las características granulométricas del lecho filtrante principalmente y las características hidráulicas.

Para realizar los ensayos en los filtros se realizó una muestra sintética, la cual fue sometida al proceso de coagulación, floculación y sedimentación; para posteriormente ser filtrada en ambos dispositivos y cuantificar la eficiencia del medio filtrante tanto para color como para turbiedad.

En el siguiente apartado se describe como fue el proceso para cuantificar la eficiencia del proceso clarificador mediante la coagulación-floculación-sedimentación-filtración. Para ellos se usó la prueba de jarras y el filtrado del agua sedimentada, el proceso se detalla en el siguiente apartado.

3.4.1 Ensayos para cuantificar la eficiencia de los filtros de arena

La prueba de jarras es un proceso unitario y la principal prueba hecha en laboratorio para determinar las dosis óptimas de coagulantes para cierta muestra sintética que será tratada en una planta potabilizadora.

Se trata de una simulación del proceso de coagulación-floculación-sedimentación-decantación que se lleva a cabo en la realidad en una planta de tratamiento.

Previo a la realización de éste trabajo se tomaron datos experimentales que ya se habían efectuado diversas pruebas de jarras con una muestra sintética similar a la elegida, con excepción del color que le confiere la yerbabuena. Las pruebas previas fueron realizadas modificando el pH mediante la adición de ácido clorhídrico y sosa caustica, generando pH de 6, 7, 8 y 9.

Como se puede observar en la imagen 24, los pH que mejoran la eficiencia de la coagulación-floculación-sedimentación para remover turbiedad son los de 7, 8, 9. Con los cuales la turbiedad residual es entre 1.6 y 2.8 [UTN]. De la gráfica la dosis de coagulante que da los mejores resultados es de 6 mL/L de Sulfato de Aluminio para los 3 casos.

Para el caso del color, no se tomaron en cuenta los resultados obtenidos en el laboratorio en pruebas anteriores a éste proyecto ya que el color medido anteriormente es color aparente, provocado por la presencia de turbiedad, y nunca se le adicionó al agua un colorante para conferirle color verdadero que es el que se busca eliminar.

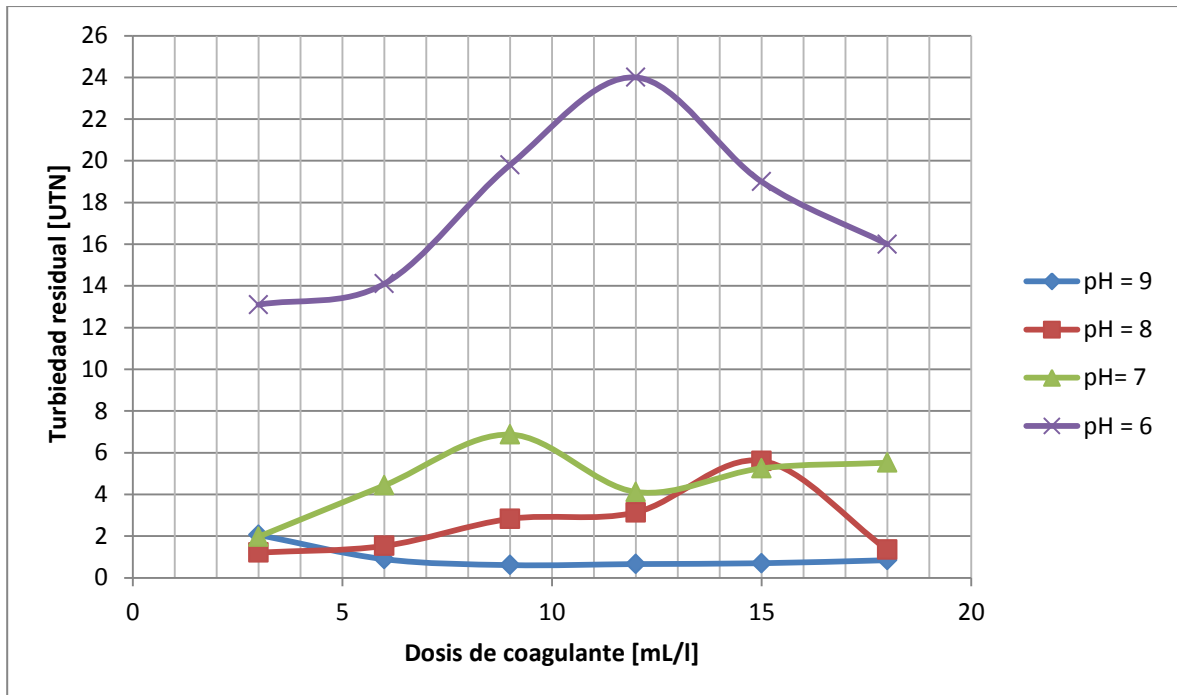


Imagen 24. Gráfica coagulante vs turbiedad residual

Material y equipo necesario para la prueba de jarras

- Equipo de pruebas de jarras
- Sulfato de aluminio
- Balanza analítica
- Medidor de pH
- Nefelómetro
- Espectrofotómetro Hach Dr 2000
- Reactivos: Caolín, Carbonato de sodio, cloruro de calcio
- Sosa caustica
- Ácido sulfúrico
- Agua de la llave
- Colorante
- Vasos de precipitado
- Agitador con píldora

En caso de que no se tenga sulfato de aluminio líquido, será necesario mezclar 5.7 gramos del coagulante en cristal en un litro de agua destilada, se debe agitar preferentemente en la máquina con píldora hasta que los cristales estén completamente disueltos.

La sosa caustica o hidróxido de sodio se usará para aumentar el pH de la solución en caso de ser necesario, y el ácido sulfúrico para reducir el pH.



Imagen 25. Espectofotómetro HACH Dr 2000



Imagen 26. Medidor de pH

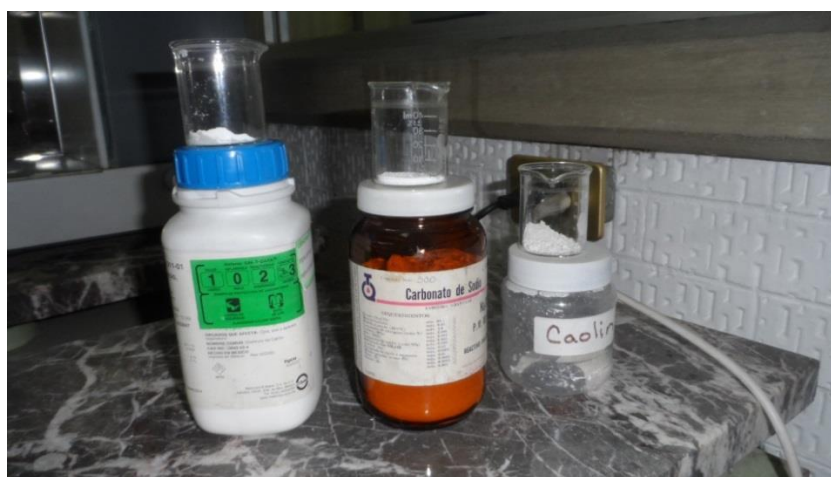


Imagen 27. Reactivos para dar turbiedad al agua



Imagen 28. Turbidímetro o Nefelómetro



Imagen 29. Mezcladora con píldora

Para identificar cuál de los dos filtros ofrecía mejores resultados y por ende ser considerado para efectuar la práctica de filtrado, a ambas alternativas se le hicieron ensayos que consistían en fabricar 6 litros de muestra sintética y hacer pasar 3 litros en cada medio filtrante.

El agua sintética se diseñó en el laboratorio con la adición de varios reactivos. Para poder realizar la prueba de jarras se requieren los siguientes materiales:

- Paso 1: En la báscula analítica colocar 1.65 g de cada reactivo.
- Paso 2: Colocar 6 litros de agua de la llave en la agitadora con píldora y los 1.65 gr de cada reactivo, dejar mezclar a 350 rpm durante 3 minutos.
- Paso 3: Tomar pH, turbiedad y color aparente de la muestra de agua fabricada.
- Paso 4: Trasvasar a un recipiente con vertedero y posteriormente colocar un litro en la probeta graduada y después vaciar en un vaso de precipitados de un litro. Repetir esto hasta tener los 6 litros.

- Paso 5: Ajustar la máquina mezcladora de Jarras a 100 rpm.
- Paso 6: Agregar al mismo tiempo 6 mL/L de sulfato de aluminio a cada vaso de precipitado
- Paso 7: Dejar mezclar a 100 rpm durante un minuto, a 40 rpm durante 15 minutos y sedimentación durante 15 minutos.
- Paso 8: Después de la sedimentación decantar las aguas sobrenadantes a los lodos en un recipiente grande.
- Paso 9: Tomar turbiedad, pH y color verdadero.
- Paso 10: Colocar la mitad del agua decantada en cada filtro.
- Paso 11: Tomar muestras a la salida del filtro cada 45 segundos y tomar parámetros de pH, turbiedad y color a cada muestra.

En la imagen 30 puede apreciarse la muestra sintética siendo ensayada en la máquina de jarras.

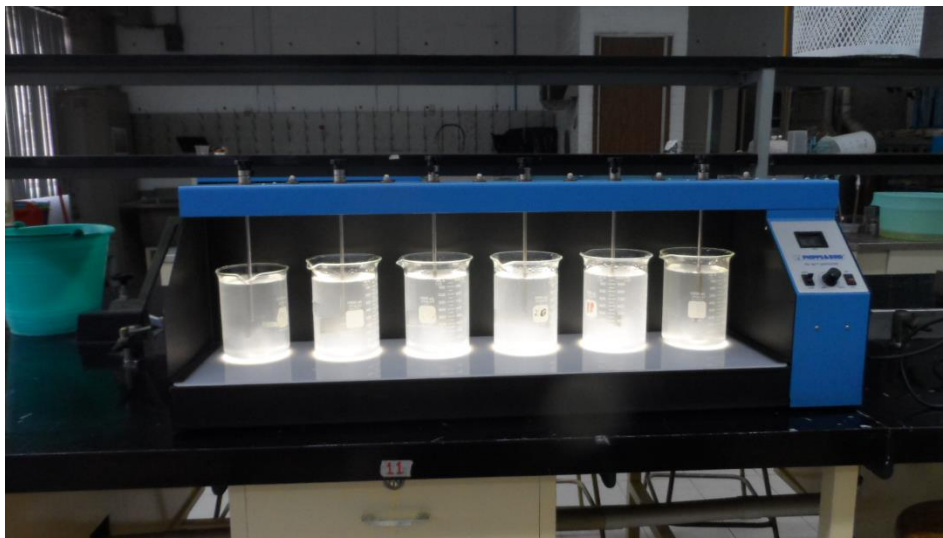


Imagen 30. Equipo para la prueba de Jarras

Las pruebas I y II, descritas a continuación, se realizaron con el objetivo de conocer la eficiencia de los filtros estratificados y de los filtros sin tamizar. Con estos resultados se puede decidir cuál filtro tiene mejor desempeño. Se desarrollaron de acuerdo al proceso de prueba de jarras pero el agua después de sedimentar sus flóculos fue decantada y hecha pasar por los dos filtros. Se adiciona 6 mL/L de coagulante.

Prueba I**Parámetros muestra sintética**

pH: 8.8

Turbiedad: 262 [UTN]

Color: 250 [UC]

Parámetros después prueba de Jarras

pH: 7.2

Turbiedad: 15.4 [UTN]

Color: 5 [UC]

Muestras a la salida de los filtros a cada 45 segundos

Tabla 15. Resultados Prueba I Filtro de arena estratificada

Tiempo [s]	pH	Color [UC]	Turbiedad [UTN]	Eficiencia en remoción de turbiedad	Eficiencia en remoción de color
45	7.1	4	0.812	95%	20%
90	7	2	0.572	96%	60%
135	7.1	1	0.386	97%	80%
180	7	1	0.386	97%	80%
225	7	1	0.437	97%	80%
270	7	1	0.31	98%	80%
315	7	1	0.347	98%	80%
360	7	1	0.389	97%	80%
405	7	1	0.353	98%	80%
450	7	1	0.364	98%	80%

Tabla 16. Resultados prueba I Filtro de arena uniforme

Tiempo [s]	pH	Color [UC]	Turbiedad [UTN]	Eficiencia en remoción de turbiedad	Eficiencia en remoción de color
45	7	3	1.06	93%	40%
90	7	3	0.522	97%	40%
135	7	2	0.612	96%	60%
180	7	2	0.57	96%	60%
225	7	1	0.525	97%	80%
270	7	1	0.584	96%	80%
315	7	1	0.573	96%	80%
360	7	1	0.591	96%	80%
405	7	1	0.521	97%	80%
450	7	1	0.534	97%	80%

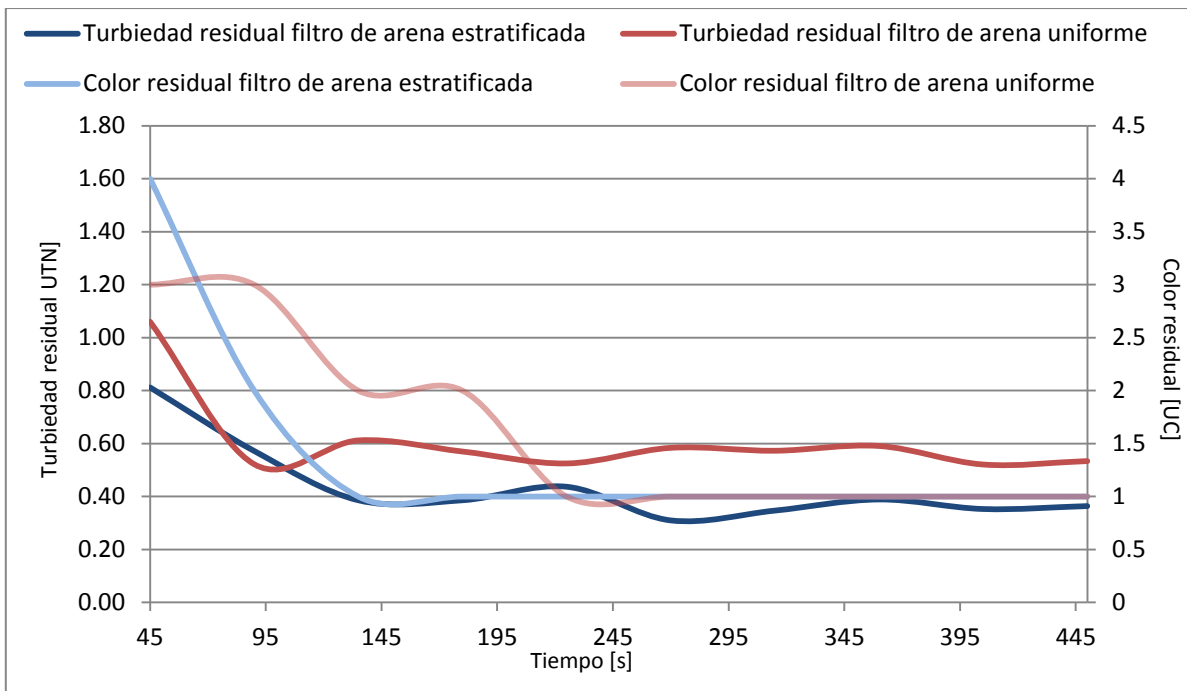


Imagen 31. Gráfica resultados Prueba I

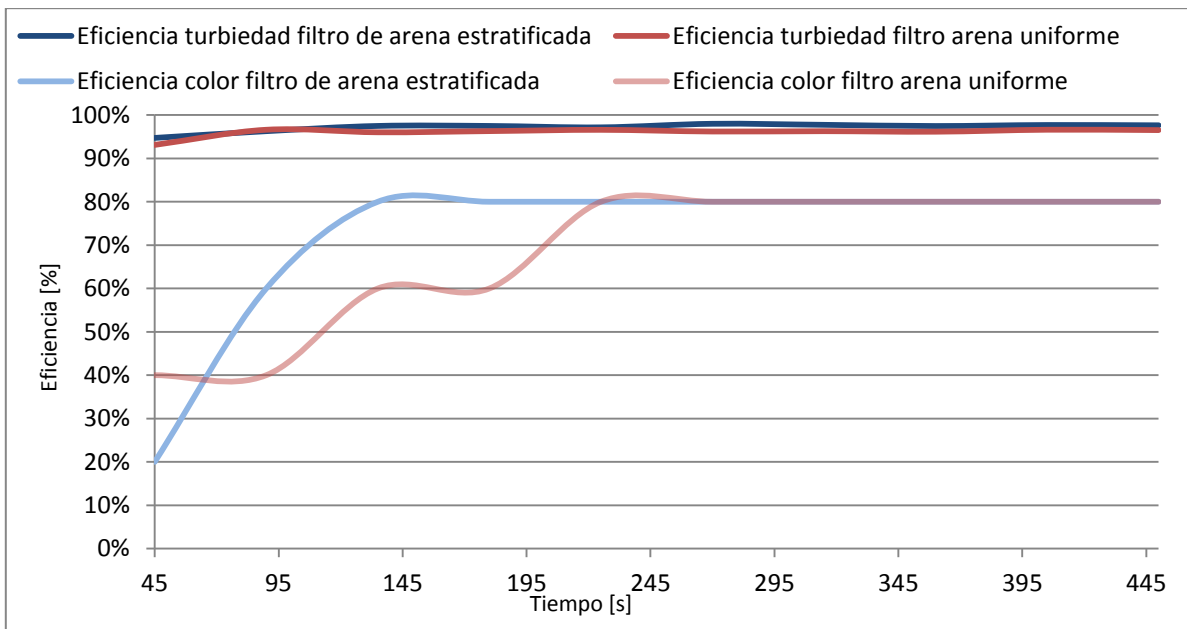


Imagen 32. Gráfica resultados Prueba I

Como se puede ver en las imágenes 31 y 32, los filtros estratificados o tamizados tienen un desempeño ligeramente mejor que los no tamizados.

En la imagen 33 se muestra el aspecto del agua posterior a las diferentes etapas del proceso de clarificación, la muestra sintética se ubica a la izquierda de la imagen, inmediatamente a esta se presenta el agua obtenida después de la sedimentación de los flóculos, en el siguiente tubo se muestra agua filtrada en el medio estratificado y a la extrema derecha agua filtrada en el medio no estratificado.

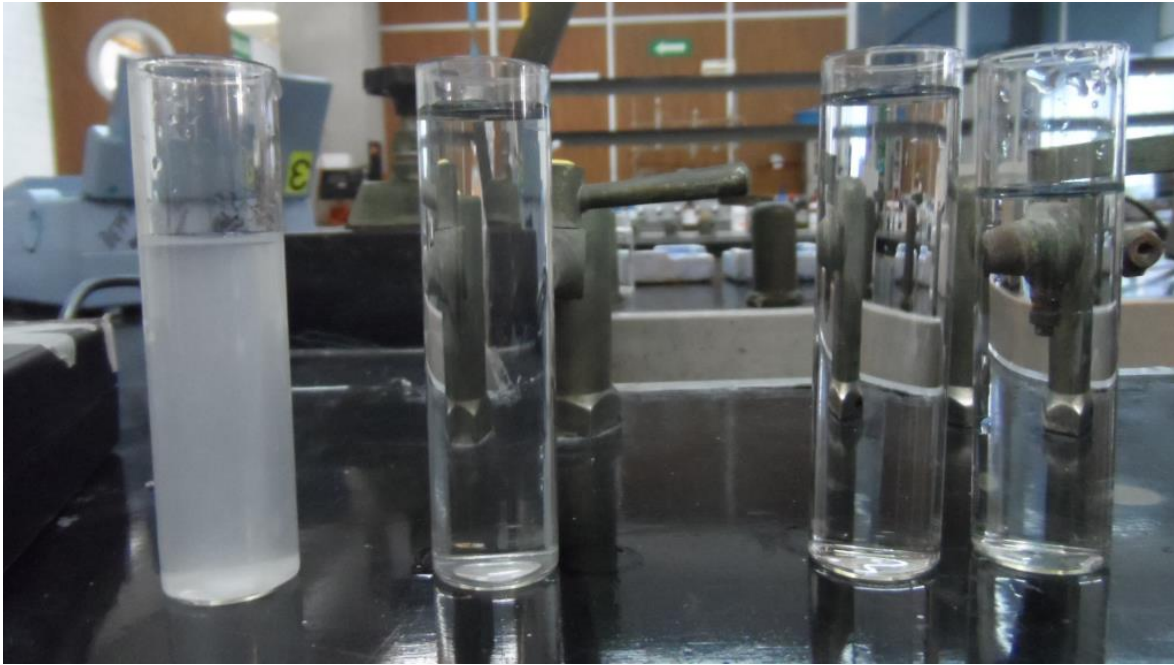


Imagen 33. Muestra sintética, después de C-F-S y después de los dos filtros

Prueba II

Parámetros agua sintética

pH: 8.8

Turbiedad: 285 [UTN]

Color aparente: 250 [UC]

Parámetros después prueba de Jarras

pH: 7.1

Turbiedad: 13.2 [UTN]

Color: 5 [UC]

Muestras a la salida de los filtros cada 45 segundos

Tabla 17. Resultados prueba II Filtro de arena estratificada

Tiempo [s]	pH	Color [UC]	Turbiedad [UTN]	Eficiencia en remoción de turbiedad	Eficiencia en remoción de color
45	7.1	10	10.7	19%	-100%
90	7	5	2.16	84%	0%
135	7	3	1.54	88%	40%
180	7	3	0.893	93%	40%
225	7	3	0.821	94%	40%
270	7	3	0.731	94%	40%
315	7	3	0.652	95%	40%
360	7	3	0.66	95%	40%
405	7	3	0.523	96%	40%
450	7	3	0.575	96%	40%

Tabla 18. Resultado prueba II Filtro de arena uniforme

Tiempo [s]	pH	Color [UC]	Turbiedad [UTN]	Eficiencia en remoción de turbiedad	Eficiencia en remoción de color
45	7	15	5.4	59%	-200%
90	7.1	5	2.3	83%	0%
135	7	5	1.3	90%	0%
180	7	5	0.98	93%	0%
225	7	5	0.891	93%	0%
270	7	5	0.856	94%	0%
315	7	5	0.931	93%	0%
360	7	5	0.844	94%	0%
405	7	5	0.867	93%	0%
450	7	5	0.892	93%	0%

De estas dos pruebas se pudo comprobar la eficiencia de un filtro estratificado de acuerdo a los porcentajes de granulometría y por otro lado uno con la misma especificación de granulometrías pero estas siendo mezcladas.

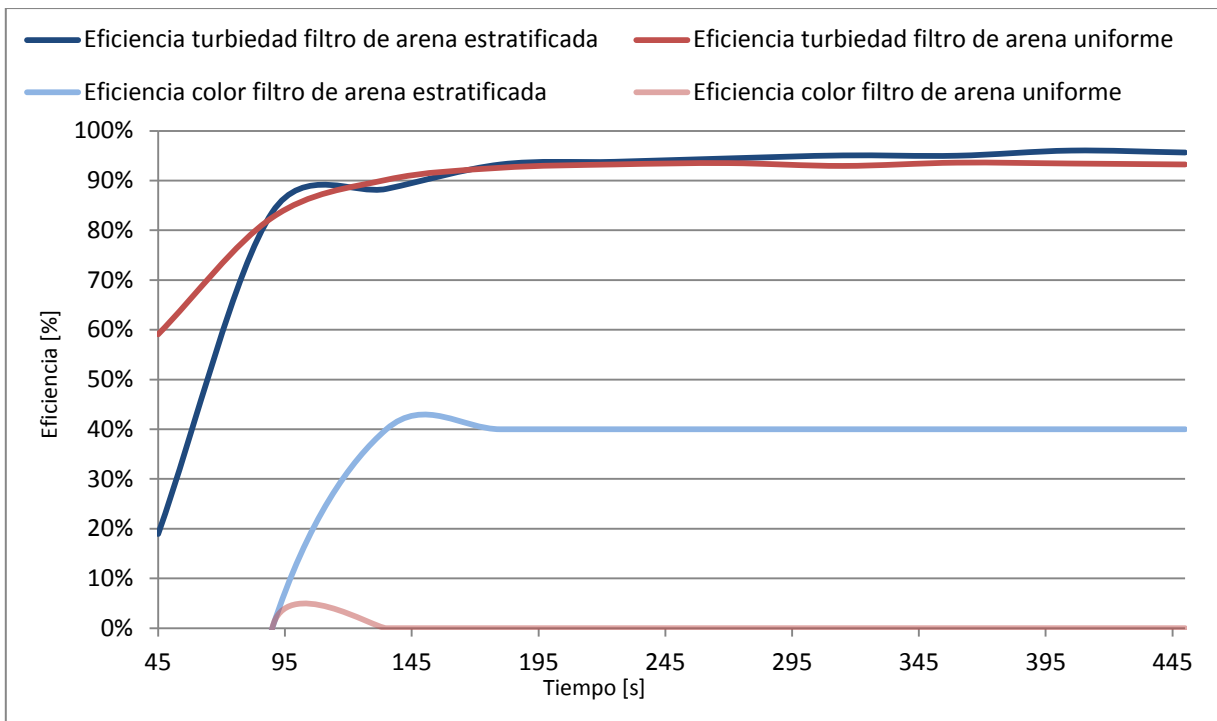


Imagen 34. Gráfica resultados Prueba II

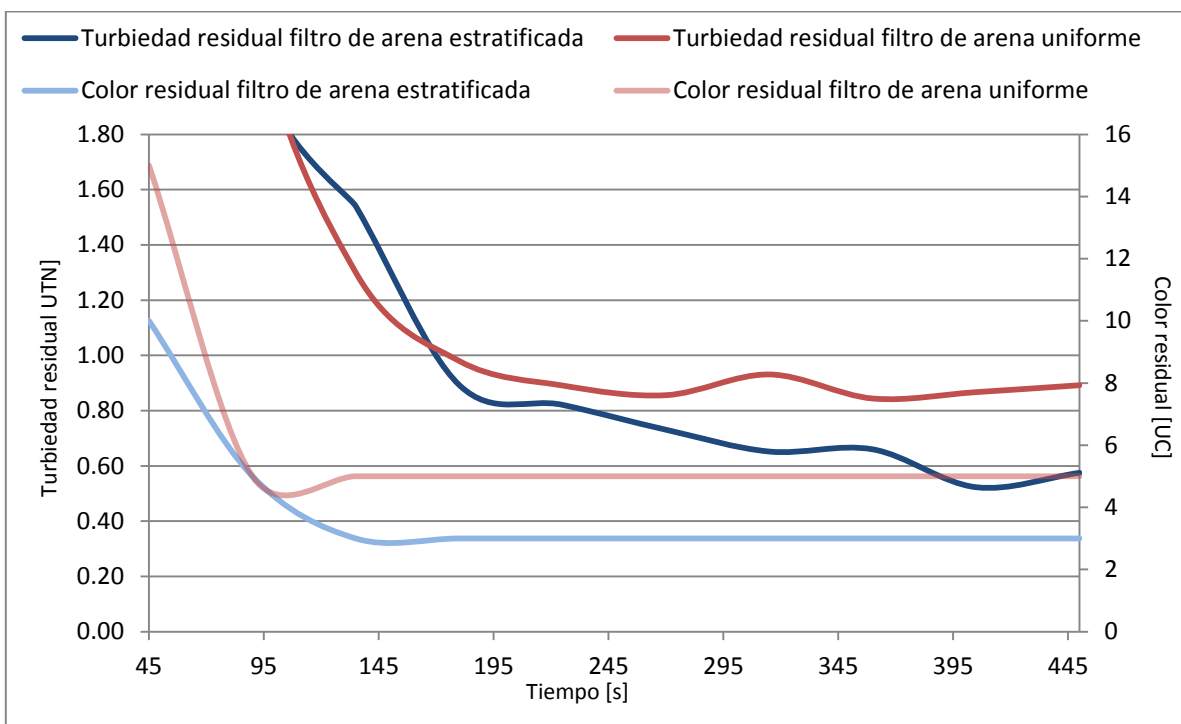


Imagen 35. Gráfica resultados Prueba II

Se ha comprobado que los filtros son casi igual de eficientes para remover turbiedad, sin embargo se recomienda estratificarlos para aumentar la permeabilidad del filtro conforme a la profundidad del lecho de arena y así aumentar la carrera de filtración.

Como se había dicho anteriormente, el filtro que fuera menos efectivo sería desmontado, el cual resultó ser el filtro no tamizado, de esta manera el tubo que usaba el filtro no tamizado fue vaciado para poder usar y construir el filtro dual de arena y carbón activado.

En el laboratorio existía carbón activado, el cual solo debió de ser colocado un tiempo en agua para que se saturara y pudiera decantarse, colocándose con facilidad en el tubo disponible.



Imagen 36. Preparación del carbón activado

En la tabla 19 se muestra la conformación de ambos filtros, indicando el grosor y granulometría de cada estrato.

Tabla 19. Conformación de los diferentes estratos pétreos de ambos filtros

Granulometría	Filtro estratificado	Filtro dual
Arena 20-25	16.8 cm	4.8 cm
Arena 25-30	21 cm	6 cm
Arena 30-35	25.2 cm	7.2 cm
Arena 35-40	7 cm	2 cm
Grava 1" – ¾"	5 cm	4 cm
Grava ¾" – ½"	5 cm	4 cm
Grava ½" – 3/8"	5 cm	4 cm
Grava 3/8" – 1/8"	5 cm	4 cm
Grava 1/8" – 1/16"	5 cm	4 cm
Carbón activado	0 cm	50 cm



Arena 20-25 16.8 cm
Arena 25-30 21 cm
Arena 30-35 25.2 cm
Arena 35-40 7cm
Grava $\frac{1}{8}$ " - $\frac{1}{16}$ "
Grava $\frac{3}{8}$ " - $\frac{1}{8}$ "
Grava $\frac{1}{2}$ " - $\frac{3}{8}$ "
Grava $\frac{3}{4}$ " - $\frac{1}{2}$ "
Grava 1 " - $\frac{3}{4}$ "

Carbón Activado 50cm
Arena 20-25 4.8 cm
Arena 25-30 6 cm
Arena 30-35 7.2 cm
Arena 35-40 2cm
Grava $\frac{1}{8}$ " - $\frac{1}{16}$ " 4cm
Grava $\frac{3}{8}$ " - $\frac{1}{8}$ " 4cm
Grava $\frac{1}{2}$ " - $\frac{3}{8}$ " 4cm
Grava $\frac{3}{4}$ " - $\frac{1}{2}$ " 4 cm
Grava 1 " - $\frac{3}{4}$ " 4 cm

Imagen 37 y 38. Colocación del carbón activado y diagrama de los diferentes estratos pétreos

En las imagen 37 se muestra el lecho de arena estratificado y la colocación del carbón activado en el tubo que contendrá al filtro.

En la imagen 38 se muestra un esquema donde se indica el grosor de cada estrato de material pétreo y carbón activado.

La imagen 39 muestra los filtros duales y de arena contruidos.



Imagen 39. Filtro simple y dual definitivos

Con el filtro simple de arena y el filtro se proseguirá a determinar las características de la muestra sintética, que se especificará en el manual de prácticas para poder ejemplificar los procesos de filtrado y adsorción, así como la preparación de la muestra.

CAPÍTULO IV

ENSAYOS EN LOS MEDIOS FILTRANTES

4.1 Conformación de muestra sintética

Para que la muestra sintética sea útil y ejemplifique el proceso de filtrado debe poseer características de calidad medibles y que puedan ser evaluadas en laboratorio utilizando el equipo para la determinación de turbiedad, color y pH, tanto antes de la prueba de jarras como después, así como antes y después de la filtración, ya sea en el filtro dual como en un filtro simple de arena.

La muestra sintética utilizada para la configuración de los filtros, y que fue producida mediante ensayos en el equipo de prueba de jarras, únicamente presentaba turbiedad y un pH dado, ya que los reactivos adicionados solo tienen el objetivo de modificar estas características. Sin embargo, para poder ejemplificar la remoción de color mediante un proceso convencional de C-F-S-F, se decidió que era necesaria la adición de algún reactivo que modificara su color, de tal forma que este fuese medible y se identificara la variación de esta característica posterior a cada uno de los procesos.

Se investigaron diferentes sustancias, teniendo tres opciones; debido a que el color únicamente es posible medirlo mediante la escala platino cobalto, se debe elegir un colorante que sea aproximado a las tonalidades de dicha escala.

La primera sustancia considerada para colorear la muestra sintética fue el hexacloroplatinato de potasio (K_2PtCl_6), el cual es usado para calibrar los colorímetros y espectrofotómetros, como el utilizado en el laboratorio, esta sustancia se indica en la NMX-AA-045-1981; expedida por la Secretaría de Economía. Se encontraron varios proveedores de dicho reactivo, pero su costo era excesivo y el tiempo de entrega era cercano a los dos meses; por lo tanto se decidió buscar otras alternativas para poder cuantificar la eficiencia de las pruebas en la remoción de color.

El primer equipo considerado para la determinación del color fue el espectrofotómetro HACH mostrado en la imagen 40, que para indicar el color de una muestra debe ser calibrado con utilizando el hexacloroplatinato de potasio (K_2PtCl_6), razón por la cual se decidió emplear otro colorímetro más sencillo, como el mostrado en la imagen 41, con menor precisión, pero que se adaptaba a las necesidades del proyecto, éste colorímetro consiste en dos tubos, uno de ellos se llena con agua destilada y el otro con la muestra a estudiar, debajo de ellos hay un foco y sobre ellos una serie de discos con diferentes tonalidades de la escala Pt/Co. Se hace colocar un valor de la escala del disco sobre el agua destilada hasta que esta iguale la tonalidad de la muestra.



Imagen 40. Espectrofotómetro desechado



Imagen 41. Colorímetro de discos

Al ser descartado el uso del hexacloroplatinato de potasio (K_2PtCl_6) fue necesario establecer un mecanismo para la adición de color a la muestra sintética. Para tal efecto se consideraron varias alternativas, la primera consistió en la adición de una sustancia comercial que tuviese dicho objetivo en particular, es decir, que su uso sea exclusivo para la coloración. Un producto que cumple con estas características es el colorante artificial.

Colorantes naturales

Los colorantes naturales o tintes naturales son aquellas sustancias coloreadas obtenidas de plantas y animales aptas para la tintura de fibras textiles, muros, artesanías y una gran cantidad de objetos que el ser humano ha coloreado a lo largo de la historia.

Estos colorantes pueden clasificarse en 2 diferentes grupos (vegetales y animales) y a su vez estos se dividen subfamilias en base a su estructura molecular. Teniendo en cada familia componentes afines a su comportamiento y propiedades genéricas. Para fines del proyecto sólo se definirá la subfamilia cloroflica del grupo vegetal.

Los compuestos clorofílicos tienen presente en los cloroplastos de las células vegetales, los cuales son orgánulos donde se efectúa la fotosíntesis de las plantas. Son pigmentos que poseen una porfirina que lleva incorporada un átomo de magnesio en el centro del núcleo tetrapirrólico.

Colorantes artificiales

Los colorantes sintéticos o artificiales son resultado del desarrollo de procesos químicos en los cuales sustancias naturales experimentan cambios en sus propiedades fisicoquímicas que les confieren mejor adherencia a superficies y su permanencia en el lugar donde ha sido aplicado el colorante. Comúnmente son sustancias insolubles, por eso tienen una presentación de polvo fino coloreado.

Los colorantes tienen en sus moléculas un grupo cromóforo y otro grupo auxocromo. El primer grupo presenta átomos con uno o más enlaces insaturados y que su presencia provoca la generación de color en el medio en el que sean aplicados. El grupo auxocromo son agrupaciones de átomos con carga positiva, su función es intensificar la acción del grupo cromóforo dentro de la misma molécula del colorante. Este grupo está compuesto por átomos o radicales libres con carga positiva que hace desplazar los picos de absorción de luz de los grupos insaturados hacia longitudes de onda larga además de aumentar sus intensidades.

En el siguiente apartado se describe el uso de un colorante artificial aplicado para la coloración de la muestra sintética.

4.1.1 Uso de colorante artificial

La segunda alternativa considerada para conferirle color a la muestra sintética fue el uso de pinturas textiles. Se hicieron dos pruebas con colorante azul, una con 1.65 gramos de pintura textil, que corresponde con la masa de los demás reactivos y una posterior con una concentración de 0.1 g por 6 litros de agua de la red. Esta primera prueba con un color intenso tuvo el objetivo de identificar visualmente la eficiencia en la remoción de color posterior al filtrado.

El color obtenido en esta segunda prueba fue muy alto, no era posible cuantificarlo mediante el uso del espectrofotómetro ni en el colorímetro Hach, por lo que se decidió disminuir la cantidad de colorante utilizado. Así que en la siguiente prueba se consideró agregar solamente 0.1 gramos de colorante, pero como se observa en la imagen 42 el color aún es muy alto, por lo que aún con esta dosis su uso es inviable.



Imagen 42. Ensayo a muestra sintética con colorante textil

Sin embargo para que la presencia de color, previa y posterior a las pruebas fuese medible, se decidió elegir un color más cercano a la escala Pt-Co, razón por la cual se cambiaría el azul por un colorante café.

Por otra parte, dado que la disposición del agua con colorantes textiles genera impactos ambientales severos, dada la dificultad de la eliminación de coloides de color, la alternativa del uso de colorantes artificiales fue descartada.

La eficiencia en la remoción de color posterior al proceso de C-F-S-F aplicada a la muestra sintética con una dosis de 1.65g de colorante azul generó los resultados siguientes.

Prueba con pintura textil Color azul**Parámetros muestra sintética**

Color azul 1.65 gramos en 6 litros

pH: 8.7

Turbiedad: 305 [UTN]

Color aparente: Fuera de rango

Parámetros después prueba de jarras

pH: 7.2

Turbiedad: 19.2 [UTN]

Color: Fuera de rango

Muestreos a la salida de los filtros cada 45 segundos

Tabla 20. Resultado agua con pintura textil filtro de arena

Tiempo [s]	pH	Color [UC]	Turbiedad [UTN]	Eficiencia turbiedad
45	7	Fuera de rango	7.8	59.38%
90	7	Fuera de rango	8.2	57.29%
135	7	Fuera de rango	4.3	77.60%
180	7	Fuera de rango	1.2	93.75%
225	7	Fuera de rango	1.01	94.74%
270	7	Fuera de rango	0.983	94.88%
315	7	Fuera de rango	0.932	95.15%
360	7	Fuera de rango	0.871	95.46%
405	7	Fuera de rango	0.943	95.09%
450	7	Fuera de rango	0.911	95.26%

Tabla 21. Resultado agua con pintura textil filtro dual

Tiempo [s]	pH	Color [UC]	Turbiedad [UTN]	Eficiencia turbiedad
45	3.5	10	5.4	71.88%
90	3.5	5	2.3	88.02%
135	3.5	5	1.2	93.75%
180	3.5	3	0.678	96.47%
225	3.5	3	0.543	97.17%
270	3.5	3	0.529	97.24%
315	3.5	3	0.598	96.89%
360	3.5	3	0.546	97.16%
405	3.5	3	0.582	96.97%
450	3.5	3	0.532	97.23%

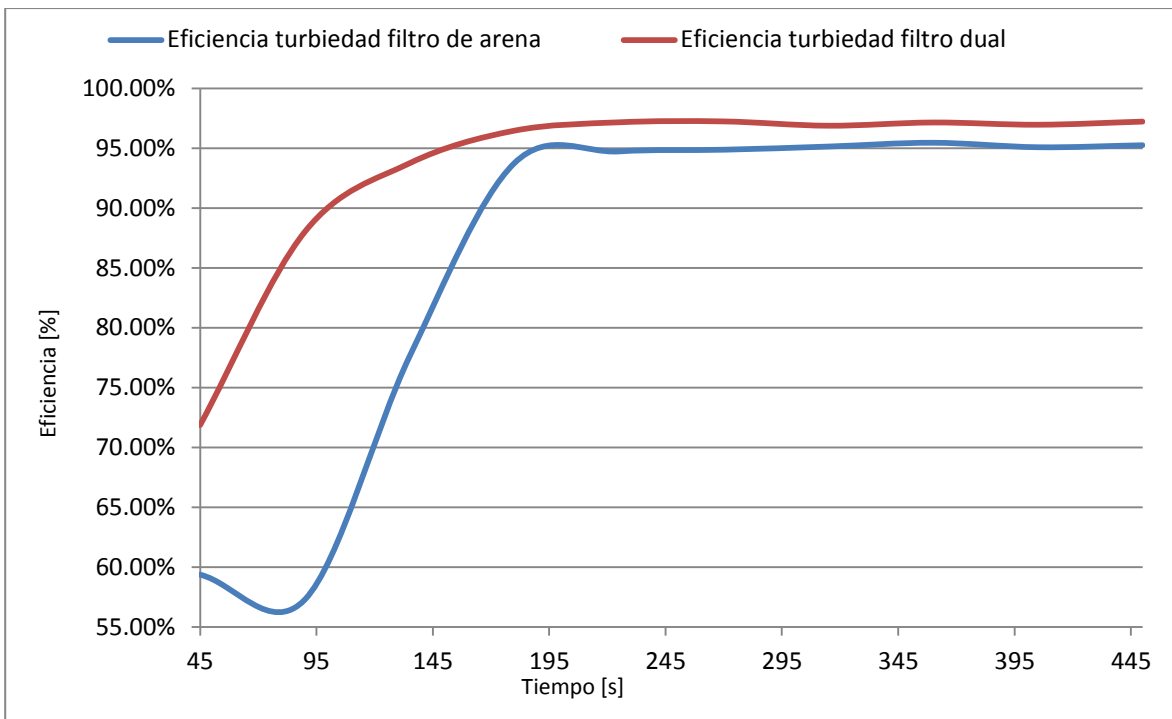


Imagen 43. Resultados ensayo con pintura textil

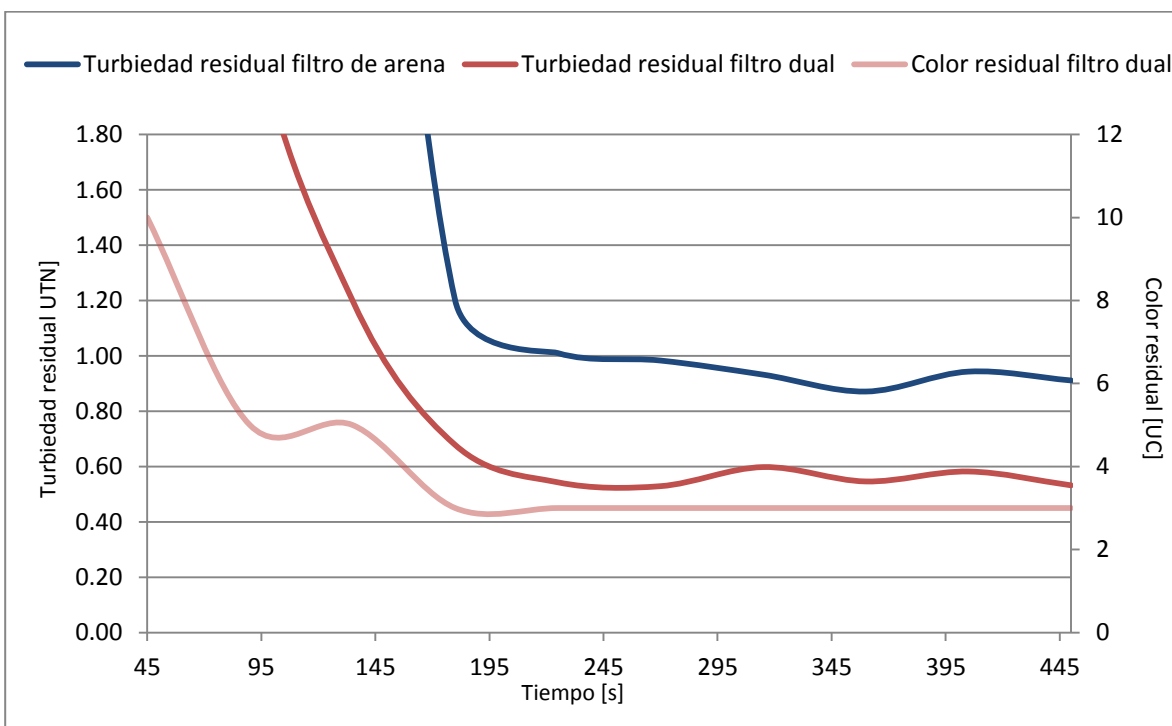


Imagen 44. Resultados ensayo con pintura textil

Como se observa en la tabla 21 el pH del efluente del proceso de filtrado utilizando el filtro dual presenta valores de pH muy bajo, esto se debe a que el carbón fue activado químicamente y hasta el momento de la prueba no se había utilizado, tal como se describe en el apartado 2.5.3, el cual habla sobre los lechos de carbón activado.

Si bien la muestra sintética integrada por colorante artificial ha sido descartada para utilizarse en la prueba de filtración, la experiencia de hacer la prueba de tratabilidad realizando la coagulación, floculación, sedimentación y filtración mostró que los filtros duales de arena y carbón activado son muy eficientes en la remoción del color y la turbiedad, mientras que los de arena son mayormente eficientes en la remoción de turbiedad.

La imagen 45 muestra en el primer tubo la muestra sintética, el segundo tubo el agua filtrada en arena, el tercer tubo el agua después de la sedimentación de flóculos y finalmente el cuarto tubo muestra el agua filtrada en el medio dual.

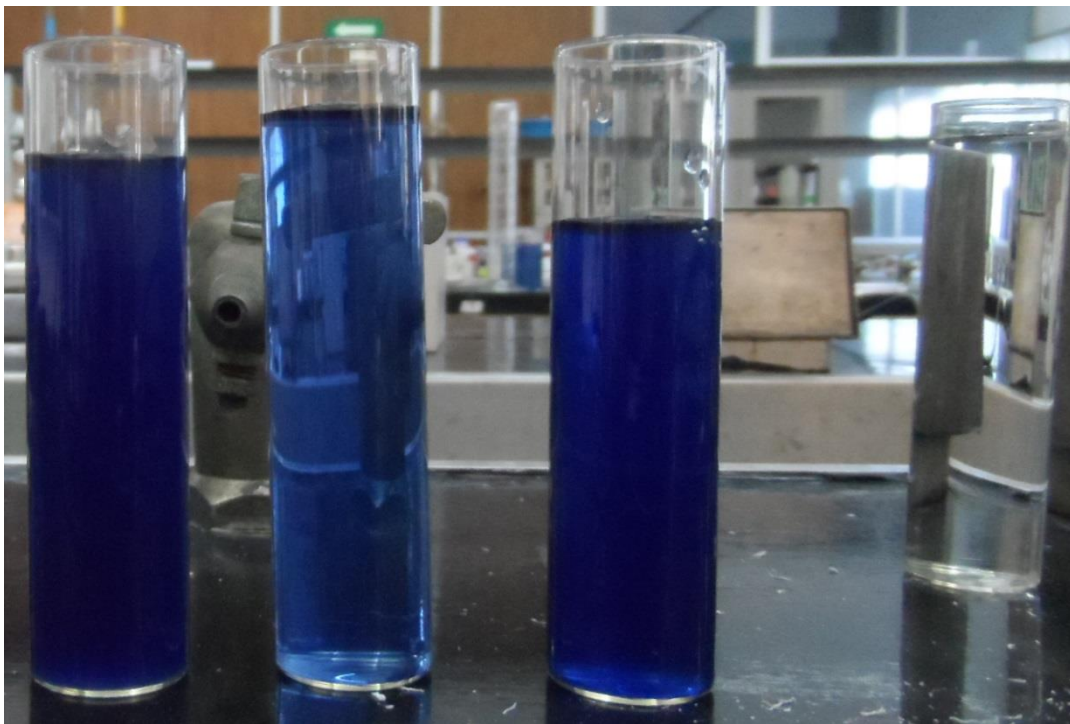


Imagen 45 resultados ensayo con colorante artificial

4.1.2 Uso de colorantes naturales

Después de utilizar la pintura textil se observó que el color generado no era cuantificable mediante el uso del colorímetro de discos en la escala Pt/Co, debido a ello se decidió añadir color mediante la mezcla con materia orgánica, tal como sucede en la naturaleza en la mayoría de los casos. Para esto

se seleccionaron tres diferentes plantas comestibles que se pueden adquirir fácilmente en un supermercado. Esto debido a que la prueba debe ser fácilmente reproducible.

Para la adición de color se eligieron flores de manzanilla, yerbabuena y jamaica. El aspecto que adquirió el agua en cada caso se muestra en la imagen 46.

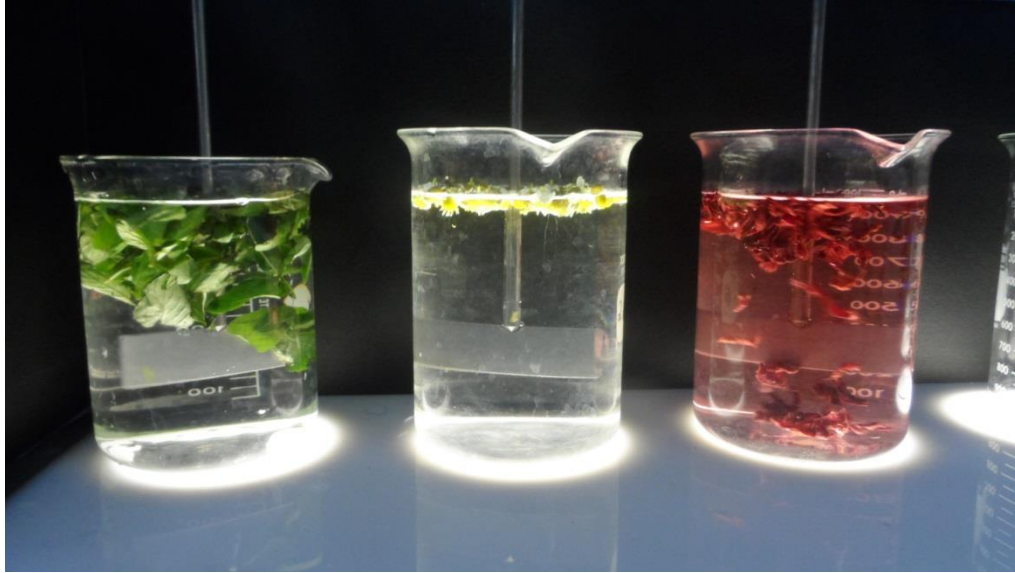


Imagen 46. Distintas plantas comestibles para adicionar color al agua

Para efectuar la prueba se colocaron 10 gramos de cada planta en un vaso de precipitados con un litro de agua de la red y se hicieron agitar por unos 15 minutos. La jamaica suelta un color elevado, el cual difiere de la escala platino cobalto (Pt/Co), por lo que su uso fue descartado. A su vez la manzanilla requiere que durante su adquisición se seleccione el producto más fresco, por lo que también fue descartada.

La yerbabuena dio muy buenos resultados, ya que suelta un color cercano a la escala Pt/Co y no se requiere un producto fresco.

Una vez elegida la infusión, la prueba de generación de colorantes se repitió para distintas masas de yerbabuena, colocando 5, 10, 15 y 20 gramos en un litro de agua, calentando hasta el punto de hervor, con el fin de producir el máximo color posible. El aspecto que adquiere el agua al ser infundada con distintas dosis de yerbabuena puede observarse en la imagen 47.

Después de las pruebas descritas se estandarizó que para poder fabricar 6 litros de colorante, se deben calentar 4 vasos de precipitado con un litro de agua de la red, cada uno con 10 gramos de yerbabuena, incluido el tallo. Se calienta hasta que inicie el hervor e inmediatamente se retira de la parrilla.

Los 4 litros de infusión se dejan en reposo hasta que la temperatura sea manejable, para después ser diluidos con otros 2 litros de agua de la red.



Imagen 47. Diferentes dosis de yerbabuena

Una porción de los 6 litros resultantes serán empleados para fabricar la muestra sintética, la cual se compone de la siguiente forma:

- 5 litros de agua de la red
- 1 litro de infusión
- 1.65 gramos de caolín
- 1.65 gramos de carbonato de sodio
- 1.65 gramos de cloruro de calcio

4.2 Resultados de los ensayos

Una vez estandarizada la conformación de la muestra sintética se hace necesario establecer la dosis requerida para una eficiente remoción de turbiedad y color y que sea reproducible en la práctica de filtración. La eficiencia en la remoción de turbiedad y color está asociada con el pH (ver imagen 24), por lo que se determinará el valor que genere los mejores resultados.

Para la determinación de la eficiencia en la remoción de turbiedad y color que generan diferentes dosis de coagulante asociado al valor del pH se realizaron 10 ensayos, cuyos resultados son:

Prueba 1**Parámetros muestra sintética**

pH: 8.2

Turbiedad: 160 [UTN]

Color aparente: 35 [UC]

Dosis coagulante: 6 mL/L

Parámetros después prueba de Jarras

pH: 8.2

Turbiedad: 9.9 [UTN]

Color: 35 [UC]

Resultados a la salida del filtro cada 45 segundos**Tabla 22. Resultados prueba 1. Filtro de arena**

Tiempo [s]	pH	Color [UC]	Turbiedad [UTN]	Eficiencia en remoción de turbiedad	Eficiencia en remoción de color
45	8.2	35	1.2	88%	0%
90	8.5	35	1.5	85%	0%
135	8.4	35	1.7	83%	0%
180	8.4	35	1.1	89%	0%
225	8.4	35	1.34	86%	0%
270	8.4	35	1.15	88%	0%
315	8.4	35	1.1	89%	0%
360	8.4	35	1.06	89%	0%
405	8.4	35	0.998	90%	0%
450	8.4	35	0.897	91%	0%

Tabla 23. Resultados prueba 1. Filtro dual

Tiempo [s]	pH	Color [UC]	Turbiedad [UTN]	Eficiencia en remoción de turbiedad	Eficiencia en remoción de color
45	3.5	5	0.45	95%	86%
90	3.5	5	0.3	97%	86%
135	3.5	5	0.38	96%	86%
180	3.5	5	0.3	97%	86%
225	3.5	5	0.26	97%	86%
270	3.5	5	0.224	98%	86%
315	3.5	5	0.234	98%	86%
360	3.5	5	0.324	97%	86%
405	3.5	5	0.254	97%	86%
450	3.5	5	0.276	97%	86%

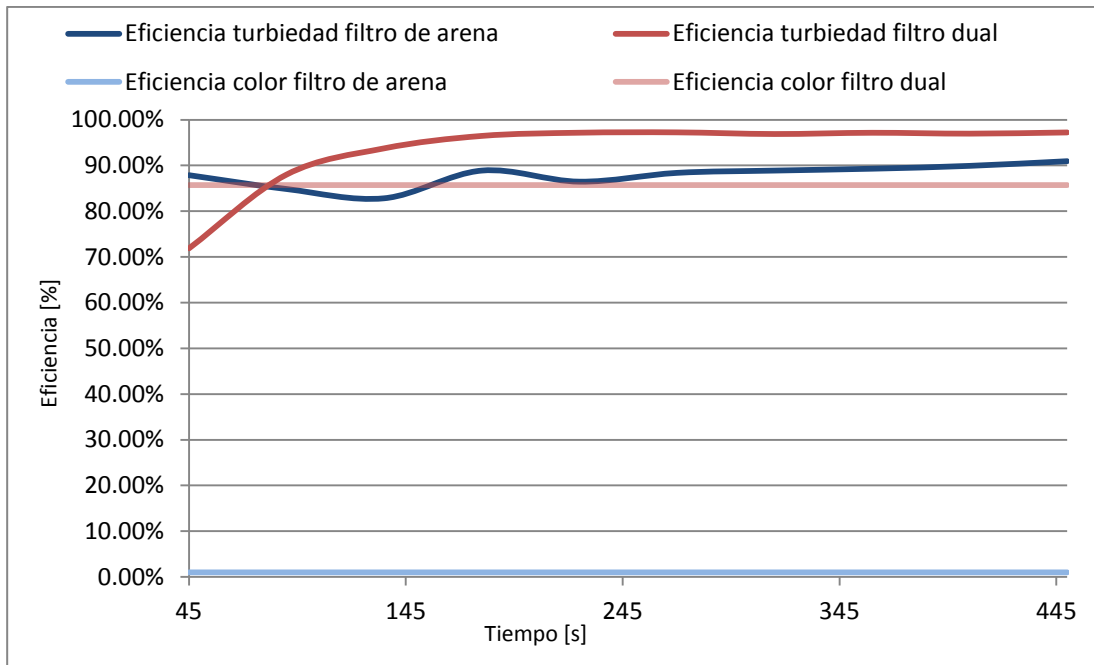


Imagen 48. Resultados prueba 1

El pH es bajo debido a que el carbón activado al ser nuevo aún tiene presente algunos ácidos usados en la fabricación del mismo.

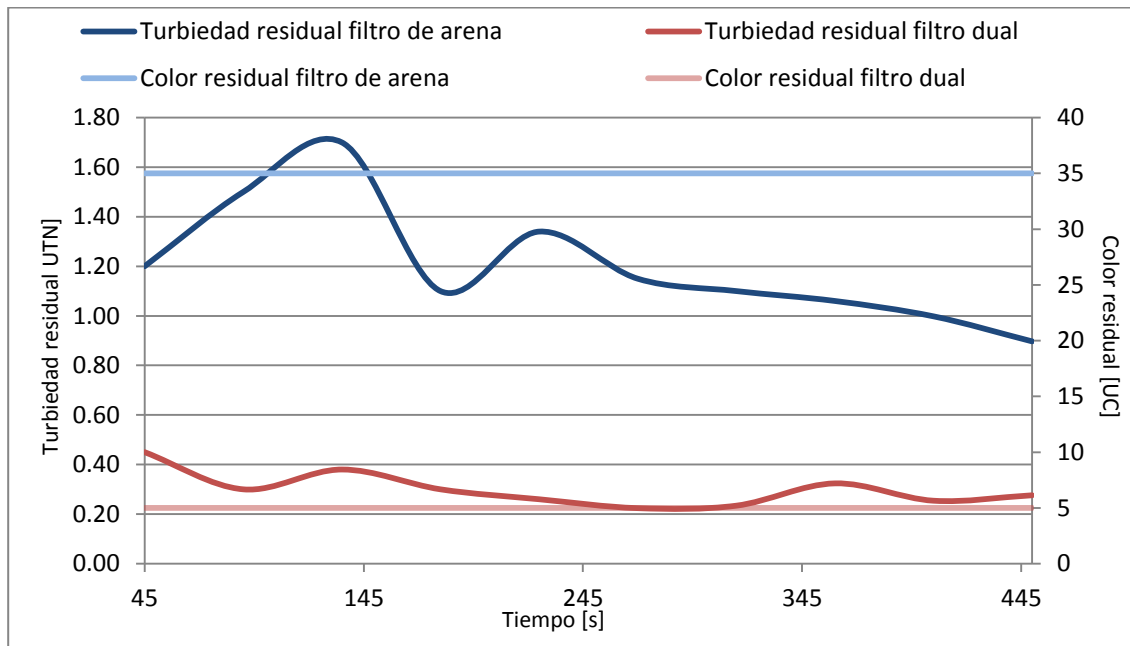


Imagen 49. Resultados prueba 1

Prueba 2

Para esta prueba se fabricaron dos muestras sintéticas, al agua I no se le adicionó la infusión colorante mientras que al agua II sí. Esto, en el caso del agua I, con el fin de identificar cómo se efectúa la coagulación ante la presencia de sólo turbiedad, y cómo interactúa la turbiedad y el color en el caso del agua II. El agua I se hace pasar por el filtro de arena y el agua II por el filtro dual.

Tabla 24. Prueba 2. Parámetros de la muestra sintética

Parámetro	Agua I (Sin color)	Agua II (Con color)
pH	8.3	8.9
Color	5	40
Turbiedad	240	203

Tabla 25. Prueba 2. Parámetros después de la prueba de jarras

Parámetro	Agua I (Sin color)	Agua II (Con color)
pH	7.2	8.9
Color	5	40
Turbiedad	4.77	14.3

Muestreos a la salida de los filtros a cada 45 segundos

Tabla 26. Prueba 2. Resultados filtro de arena

Tiempo [s]	pH	Color [UC]	Turbiedad [UTN]	Eficiencia en remoción de turbiedad	Eficiencia en remoción de color
45	6.9	5	1.55	67%	0%
90	7	5	1.65	65%	0%
135	7	5	1.27	73%	0%
180	6.9	5	0.942	80%	0%
225	6.9	5	0.883	81%	0%
270	7	5	0.847	82%	0%
315	7	5	0.977	79%	0%
360	7	5	0.775	84%	0%
405	7	5	0.762	84%	0%
450	7	5	0.723	85%	0%

Tabla 27. Prueba 2. Resultados filtro dual

Tiempo [s]	pH	Color [UC]	Turbiedad [UTN]	Eficiencia en remoción de turbiedad	Eficiencia en remoción de color
45	3.5	5	2.32	84%	88%
90	3.5	5	2.6	82%	88%
135	3.5	5	1.69	88%	88%
180	3.5	5	1.1	92%	88%
225	3.5	5	0.794	94%	88%
270	3.5	5	0.857	94%	88%
315	3.5	5	0.751	95%	88%
360	3.5	5	0.93	93%	88%
405	3.5	5	0.771	95%	88%
450	3.5	5	0.65	95%	88%

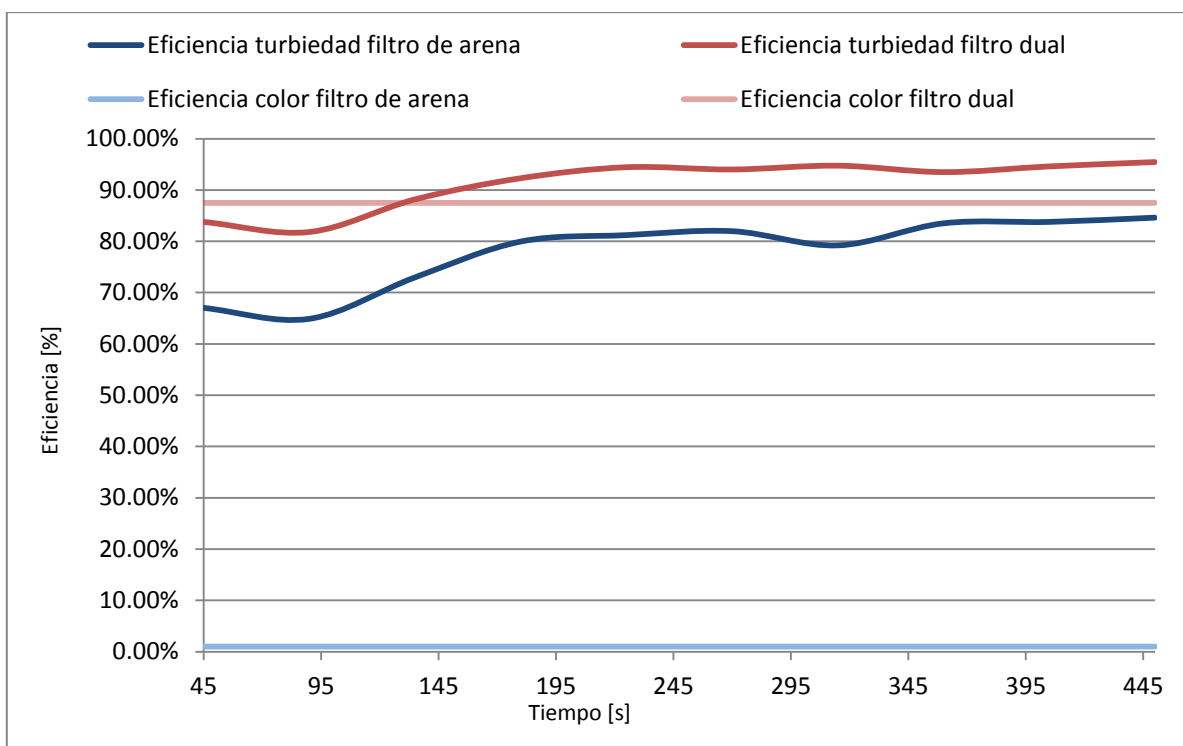


Imagen 50. Resultados prueba 2

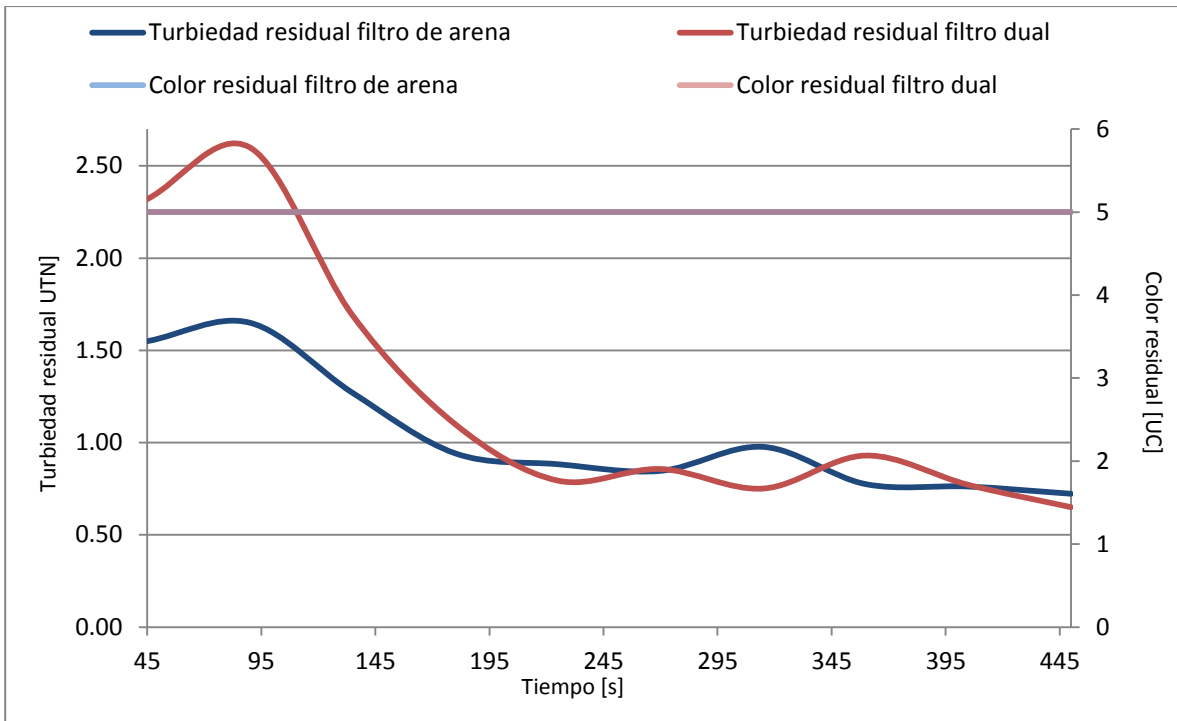


Imagen 51. Resultados prueba 2

Prueba 3

El agua I se hace pasar por el filtro de arena y el agua II por el filtro dual.

Tabla 28. Prueba 3. Parámetros de la muestra sintética

Parámetro	Agua I (Sin color)	Agua II (Con color)
pH	8.2	9.0
Color	5	35
Turbiedad	212	220

Tabla 29. Prueba 3. Parámetros después de la prueba de jarras

Parámetro	Agua I (Sin color)	Agua II (Con color)
pH	7.0	8.0
Color	5	35
Turbiedad	1.43	0.826

Muestras a la salida de los filtros cada 45 segundos

Tabla 30. Prueba 3. Resultados filtro de arena

Tiempo [s]	pH	Color [UC]	Turbiedad [UTN]	Eficiencia en remoción de turbiedad	Eficiencia en remoción de color
45	7	3	1	30%	40%
90	7	4	1	30%	20%
135	7.1	3	0.929	35%	40%
180	7	3	0.981	31%	40%
225	7	3	0.781	45%	40%
270	7	3	0.787	45%	40%
315	7	3	0.72	50%	40%
360	7	3	0.756	47%	40%
405	7	3	0.732	49%	40%
450	7	3	0.832	42%	40%

Tabla 31. Prueba 3. Resultados filtro dual

Tiempo [s]	pH	Color [UC]	Turbiedad [UTN]	Eficiencia en remoción de turbiedad	Eficiencia en remoción de color
45	6.5	5	2.65	-221%	86%
90	6.5	3	0.865	-5%	91%
135	6.1	5	0.818	1%	86%
180	6.3	5	0.69	16%	86%
225	6.3	3	0.56	32%	91%
270	6.2	4	0.643	22%	89%
315	6.3	4	0.576	30%	89%
360	6.2	4	0.532	36%	89%
405	6.3	0	0.651	21%	99%
450	6.5	0	0.589	29%	99%

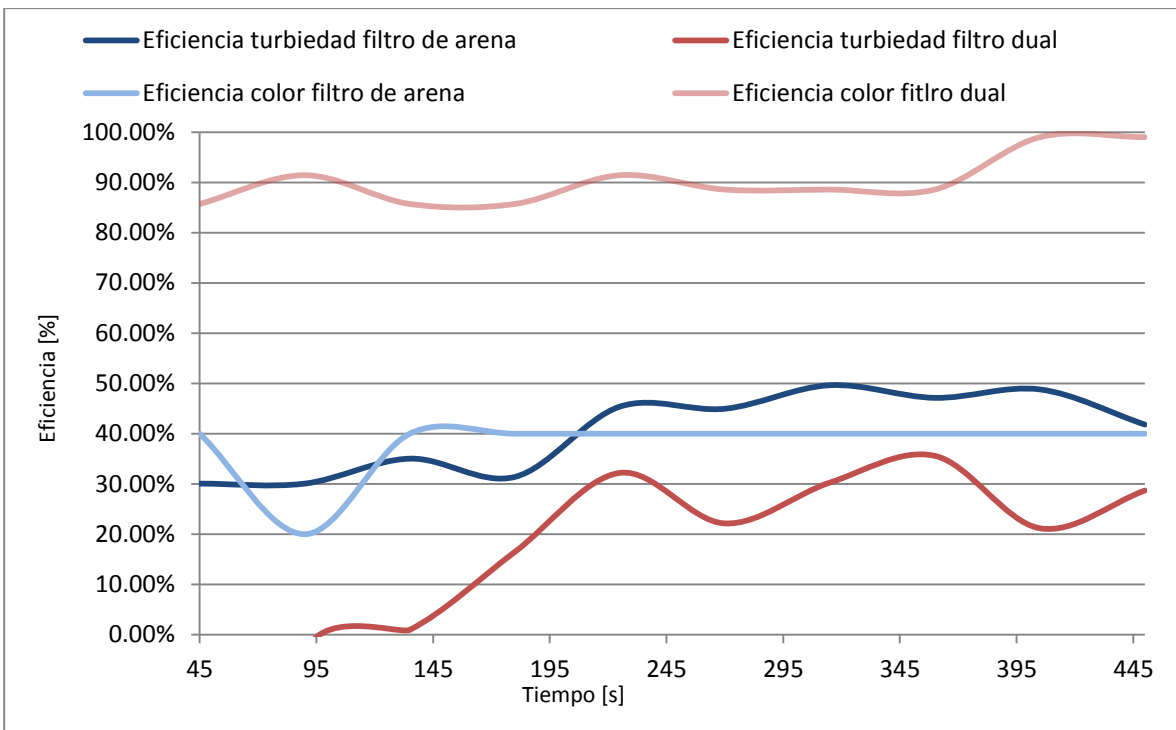


Imagen 52. Resultados prueba 3

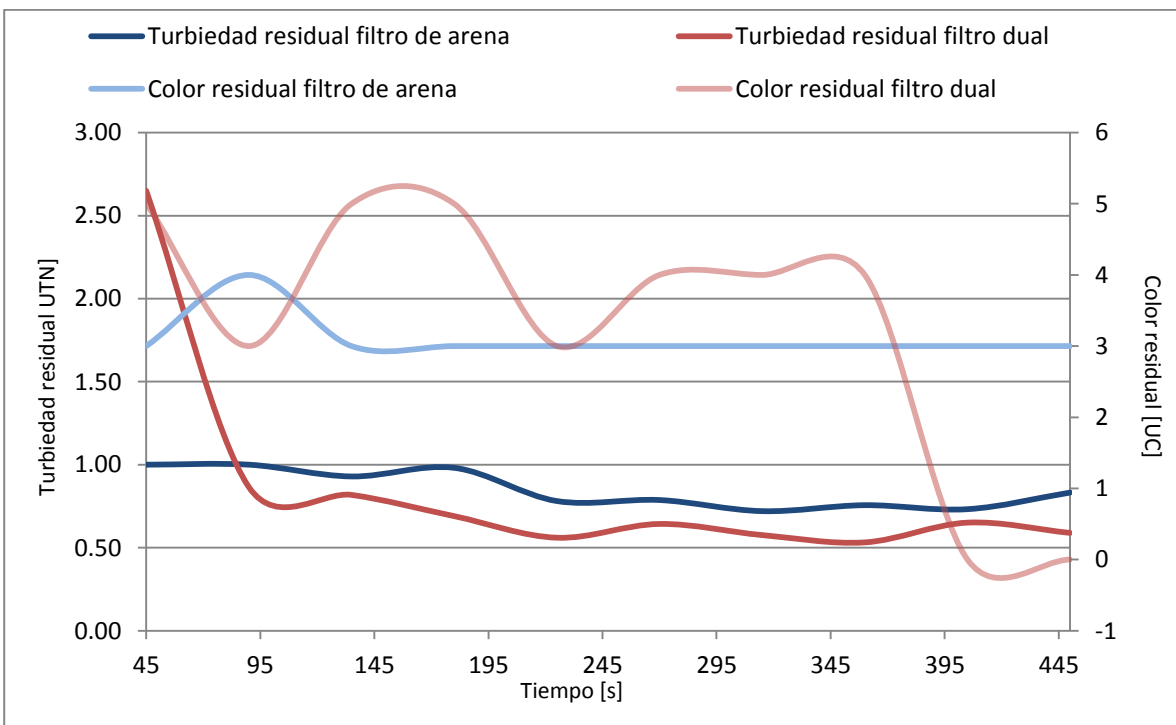


Imagen 53. Resultados prueba 3

Prueba 4. Determinación de dosis de coagulante a muestra sintética con color

Se busca determinar la dosis de coagulante y el pH que permitan remover las partículas coloidales de color, las cuales son las más pequeñas y difíciles de remover mediante el proceso de coagulación floculación sedimentación y posterior uso del filtro de arena.

Como se muestra en la prueba 1, y como indica la teoría; la filtración en arena no es eficiente para remover color, a menos que se tengan valores muy bajos de dicho parámetro. También se observó que la coagulación no puede remover color si hay presencia de turbiedad, ya que esta última produce flóculos muy grandes que se precipitan con facilidad; y ello evita que los coloides de color, que forman flóculos más pequeños, se adicione al flóculo formado y se precipiten.

Pese a que no está sugerida dentro de las formas de remoción de color por la NOM 127 SSA, se decidió probar la remoción de color mediante la coagulación-floculación-sedimentación, obteniendo una dosis de coagulante que permita la floculación de coloides de color.

Características de la muestra sintética

Se fabricó la muestra sintética con 5 litros de agua de la red y un litro de infusión colorante de yerbabuena, omitiendo los reactivos que generan turbiedad. La imagen 54 muestra la coloración obtenida al agregar la infusión colorante.

Características de la muestra sintética

- pH: 7.0
- Color: 50 [UC]

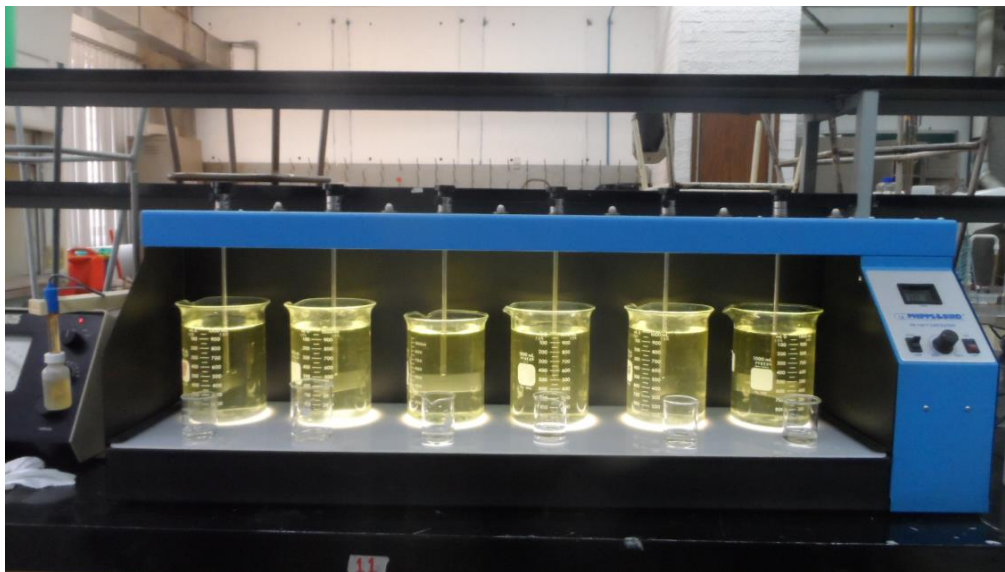


Imagen 54. Aspecto de la muestra sintética con color durante la prueba de jarras

Se siguió el proceso normal de prueba de jarras, que consiste en un minuto de agitación rápida a 100 rpm y 15 de mezcla lenta a 40 rpm. Se adicionaron dosis de 10, 15, 20, 30, 40, 50 mL/L de sulfato de aluminio. En todos los casos se formaron flóculos minúsculos que no se sedimentaron en los 15 minutos asignados a éste proceso, por lo que se dejaron sedimentar durante 16 horas, observándose los siguientes resultados. Los coloides de color ya desestabilizados, debido al movimiento browniano que posee el agua, formaron flóculos de mayor tamaño y hubo sedimentación.

Tabla 32. Prueba 4. Dosis de coagulante para remover color

Dosis [mL/L]	Color residual [UC]	Eficiencia en remoción de color
10	20	60%
15	5	90%
20	3	94%
30	20	60%
40	35	30%
50	40	20%

Estos valores se tomaron al siguiente día de haber realizado la floculación. La dosis más efectiva fue la de 20 mL/L, seguida de la de 15 mL/L. Estas dos dosis demuestran que es posible remover el color de la muestra sintética, pese a que no es viable su remoción mediante esta técnica, ya que implica tiempos de espera muy largos.

Las imágenes 55 y 56 muestran el color residual junto con la turbiedad que al término de la prueba de jarras se identificó, así como la eficiencia en la remoción de las mismas.

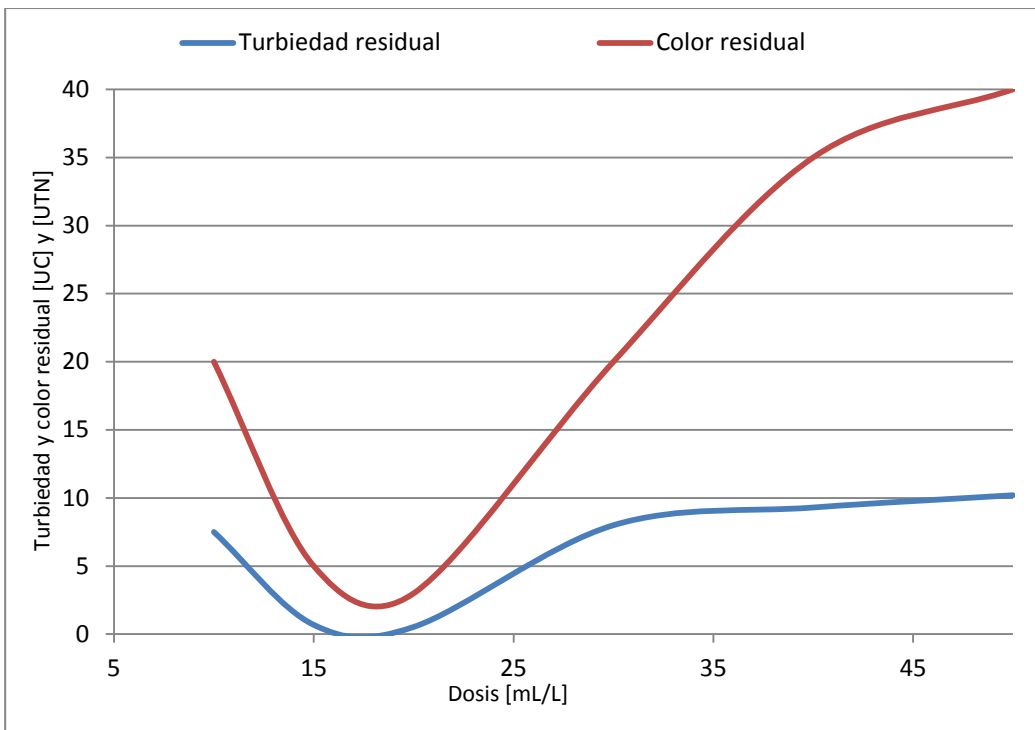


Imagen 55 Resultados prueba 4

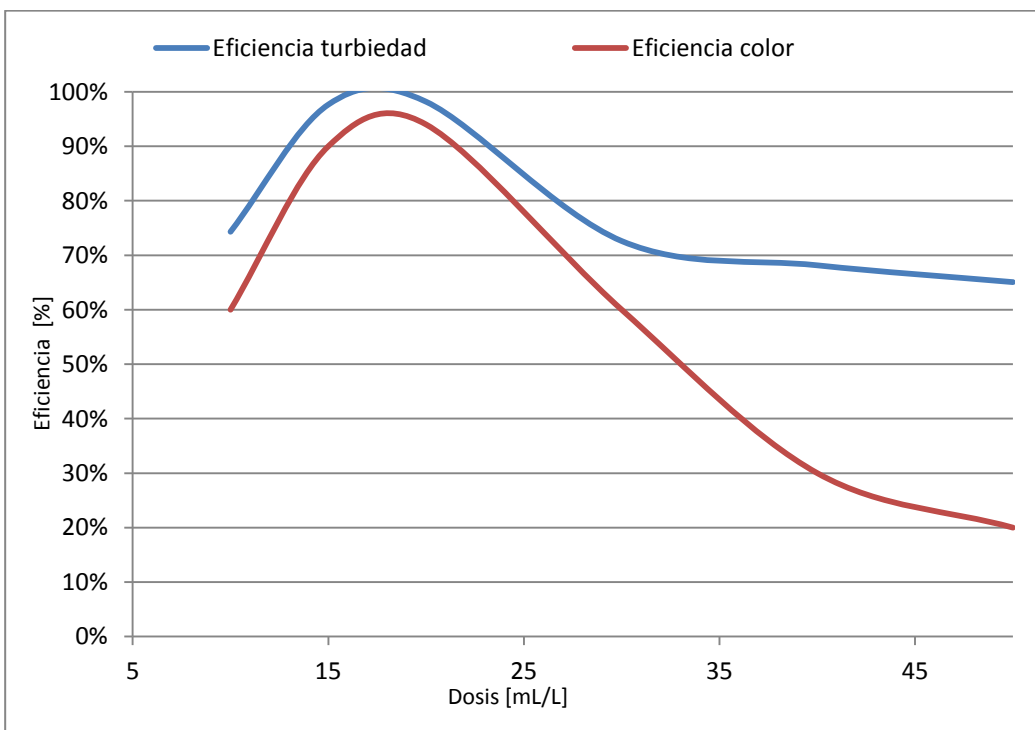


Imagen 56 Resultados prueba 4

Con los valores obtenidos en la prueba cuatro, se buscó un pH que permitiera la floculación de las partículas de color y las de turbiedad.

En función de los resultados obtenidos en la prueba cuatro se fabricará una sola muestra sintética con color y turbiedad, ahora variando el pH y agregando dosis de 6 mL/L y 15 mL/L. De esta manera su busca el pH óptimo para remover color usando los 15 mL/L conocidos en la prueba 4.

Prueba 5

A diferencia de la prueba 4 en la cual se verificó que el color sí puede ser removido mediante el proceso de C-F-S, el objetivo de la prueba 5 es verificar si el color puede ser removido en presencia de turbiedad, incluyendo el proceso de filtración.

Para esta prueba se fabricaron dos muestras sintéticas con color, con (Agua II) y sin turbiedad (Agua I). Ambas se filtraron en arena únicamente. Lo anterior para conocer la eficiencia del filtro de arena en la remoción de color, tanto para cuando se tiene turbiedad como únicamente color.

Como se mencionó anteriormente el pH variará para poder identificar el adecuado para la remoción de color y turbiedad. En esta prueba se decidió ajustar el pH de ambas muestras sintéticas a 8. El Agua I originalmente presentaba un pH de 6.8. Se decidió modificarlo mediante la adición de NaOH hasta un valor de 8. Asimismo, el Agua II cuyo pH fue de 9, se disminuyó a 8 mediante la adición de H₂SO₄. La imagen 57 muestra el aspecto del agua muestreada.

Tabla 33. Prueba 5. Parámetros de las muestras sintéticas

Parámetro	Agua I (Sin turbiedad)	Agua II (Con turbiedad)
pH	8.0	8.0
Color	40	40
Turbiedad	2.88	209
Dosis coagulante	15 mL/L	15 mL/L

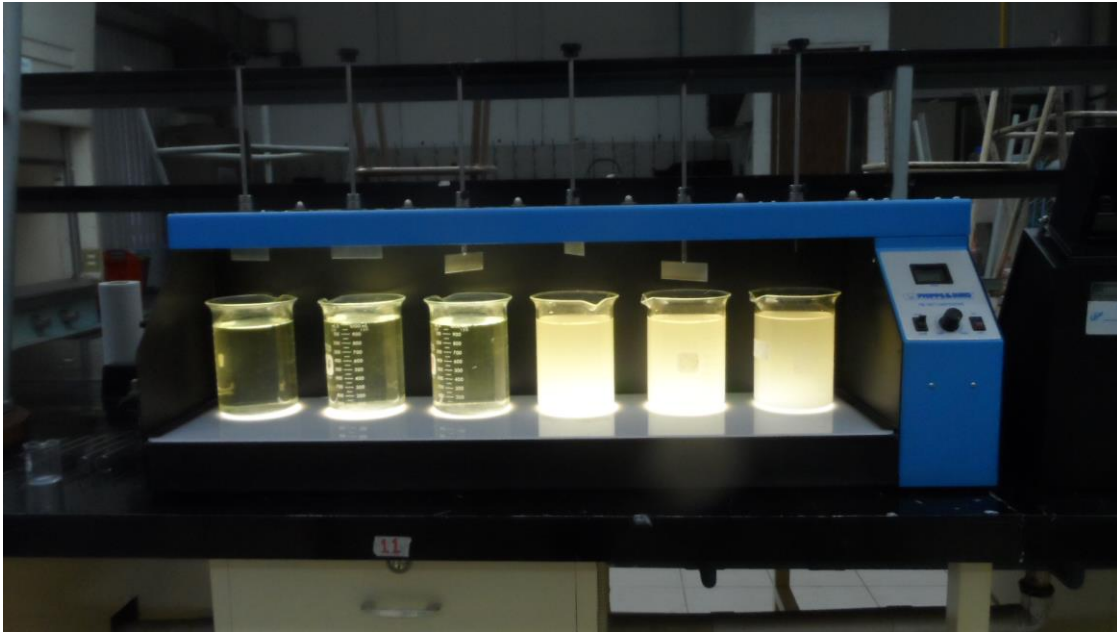


Imagen 57. Prueba de jarras de la prueba 5

Tabla 34. Prueba 5. Parámetros posteriores a la prueba de jarras

Parámetro	Agua I	Agua II
pH	7.1	7.3
Color	35	35
Turbiedad	6.5	1.2

Una vez concluida la prueba de jarras se hicieron filtrar en el filtro de arena ambas muestras, resultando en la calidad mostrada en la tabla 35. El muestreo a la salida del filtro de arena se realizó cada 45 segundos.

Tabla 35. Prueba 5. Resultados filtro de arena

Tiempo [s]	pH	Color [UC]	Turbiedad [UTN]	Eficiencia en remoción de turbiedad	Eficiencia en remoción de color
45	6.8	5	0.658	90%	86%
90	6.9	5	0.328	95%	86%
135	6.8	5	0.238	96%	86%
180	6.9	5	0.224	97%	86%
225	6.9	5	0.227	97%	86%
270	6.9	5	0.225	97%	86%
315	6.9	5	0.241	96%	86%
360	6.9	5	0.219	97%	86%
405	6.9	5	0.234	96%	86%
450	6.9	5	0.298	95%	86%

Tabla 36. Prueba 5. Resultados filtro de arena

Tiempo [s]	pH	Color [UC]	Turbiedad [UTN]	Eficiencia en remoción de turbiedad	Eficiencia en remoción de color
45	7	2	0.583	51%	94%
90	7	3	0.58	52%	91%
135	7	2	0.584	51%	94%
180	7	3	0.493	59%	91%
225	7	3	0.532	56%	91%
270	7	3	0.643	46%	91%
315	7	3	0.489	59%	91%
360	7	3	0.488	59%	91%
405	7	3	0.345	71%	91%
450	7	3	0.493	59%	91%

Adicionalmente, los resultados se expresan gráficamente en la imagen 58 y 59.

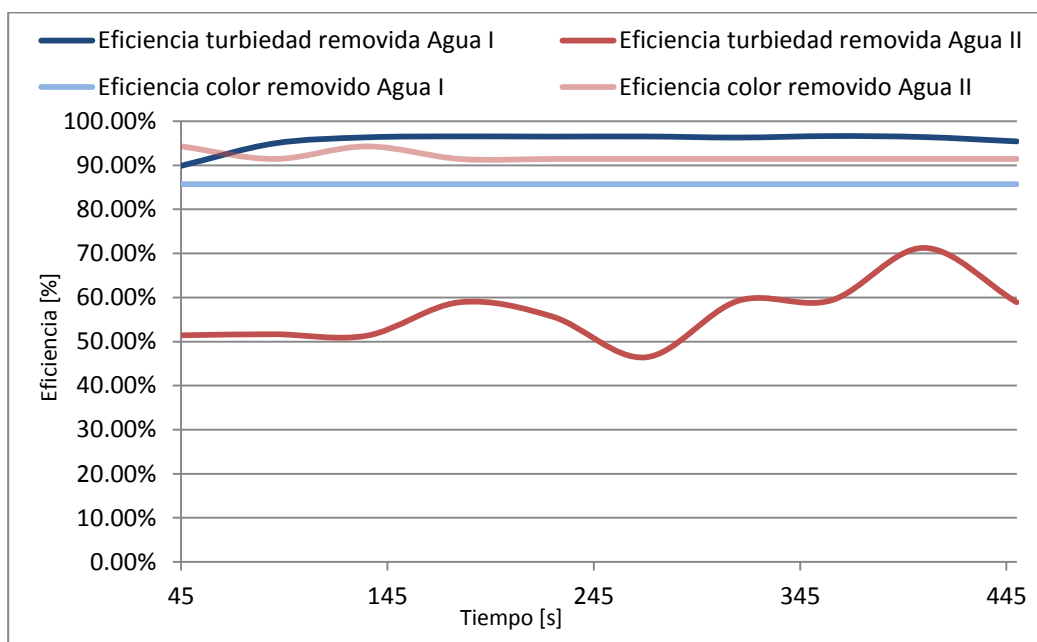


Imagen 58. Resultados prueba 5

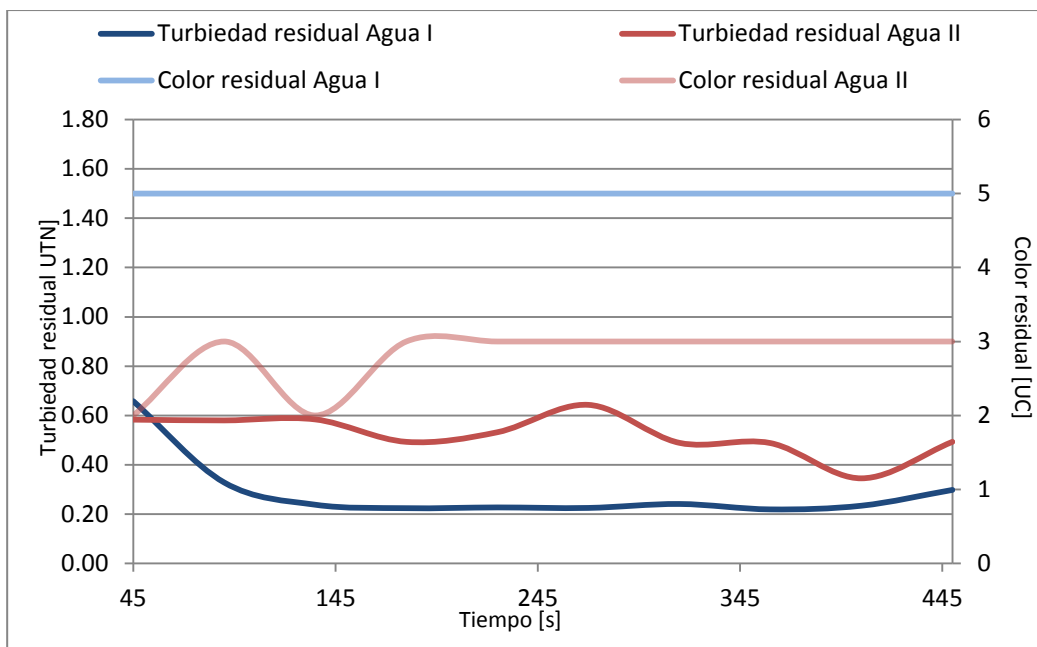


Imagen 59. Resultados prueba 5

Prueba 6

Consiste en obtener los resultados de remoción de color y turbiedad a la muestra sintética establecida a un pH de 9. Dichos resultados contribuirán a la elección del pH a utilizar en la prueba de filtración. La muestra sintética será misma que la usada en la prueba 5.

El Agua I recibirá una dosis de 6mL/L y se hará filtrar en el filtro dual ya que el medio filtrante integrado por el carbón activado removerá el color, por lo tanto no será necesario agregar una dosis mayor de coagulante. Por otro lado al Agua II se le adicionarán 15 mL/L dado que tiene presencia de turbiedad y no se hará pasar por un medio adsorbente.

Tabla 37. Prueba 6. Parámetros de la muestra sintética

Parámetro	Agua I	Agua II
pH	9.0	9.0
Color	40	40
Turbiedad	193	193
Dosis coagulante	6 mL/L	15 mL/L

Tabla 38. Prueba 6. Parámetros posteriores a la prueba de jarras

Parámetro	Agua I	Agua II
pH	7.0	7.3
Color	40	40
Turbiedad	4.5	2.3

Una vez concluida la prueba de jarras se filtró el Agua II en el filtro de arena y el Agua I en el filtro dual, resultando en la calidad mostrada en la Tabla 39 y 40. El muestreo a la salida de cada filtro se realizó cada 45 segundos.

Tabla 39. Prueba 6. Resultados filtro de arena

Tiempo [s]	pH	Color [UC]	Turbiedad [UTN]	Eficiencia en remoción de turbiedad	Eficiencia en remoción de color
45	7	40	1.55	66%	0%
90	7	40	0.581	87%	0%
135	7	40	0.577	87%	0%
180	7	40	0.53	88%	0%
225	7	40	0.572	87%	0%
270	7	40	0.534	88%	0%
315	7	40	0.589	87%	0%
360	7	40	0.531	88%	0%
405	7	40	0.598	87%	0%
450	7	40	0.584	87%	0%

Tabla 40. Prueba 6. Resultados en el Agua I – Filtro dual

Tiempo [s]	pH	Color [UC]	Turbiedad [UTN]	Eficiencia en remoción de turbiedad	Eficiencia en remoción de color
45	6.3	3	2.21	4%	93%
90	6.3	3	1.09	53%	93%
135	6.3	3	1.05	54%	93%
180	6.3	3	0.769	67%	93%
225	6.3	3	1.08	53%	93%
270	6.3	3	0.893	61%	93%
315	6.3	3	0.876	62%	93%
360	6.3	3	0.765	67%	93%
405	6.3	3	0.783	66%	93%
450	6.3	3	0.743	68%	93%

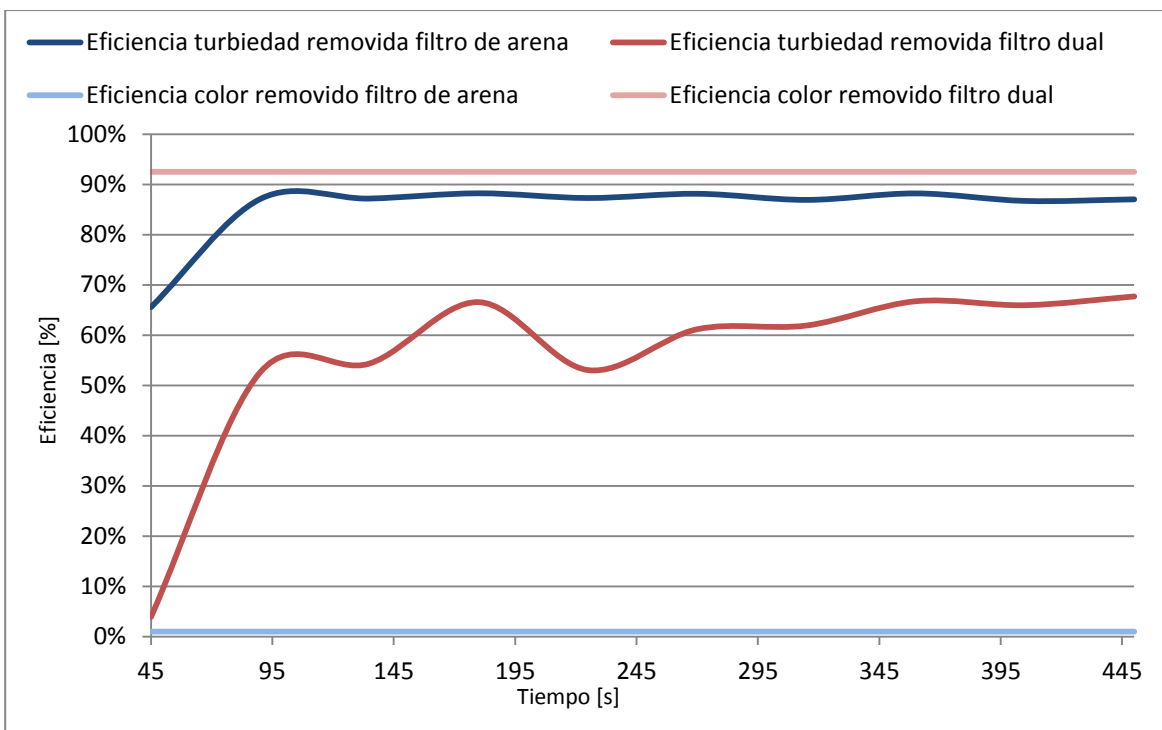


Imagen 60. Resultados prueba 6

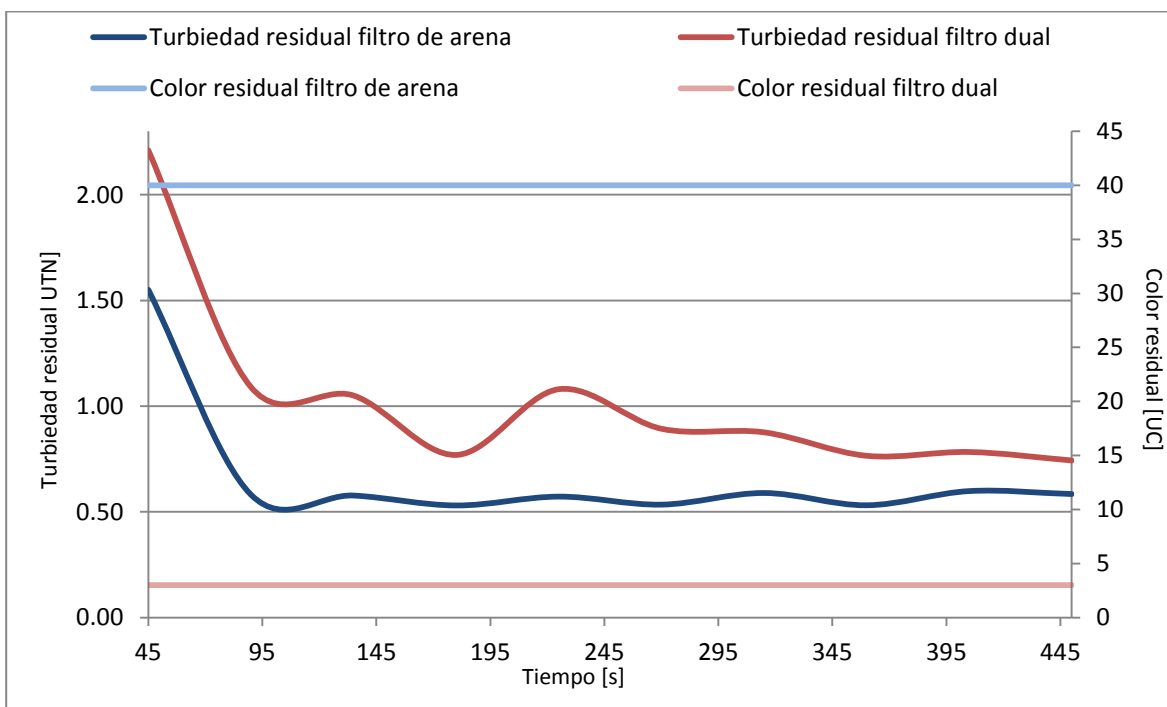


Imagen 61. Resultados prueba 6

Prueba 7

Consiste en obtener los resultados de remoción de turbiedad y color para la muestra sintética establecida, cuyo pH se ajustará a 7. La muestra sintética será la misma que en la prueba 5 y 6, para dos dosis de coagulante.

Tabla 41. Prueba 7. Parámetros de la muestra sintética

Parámetro	Agua I	Agua II
pH	7.0	7.0
Color	45	45
Turbiedad	172	172
Dosis coagulante	6 mL/L	15 mL/L

Tabla 42 Prueba 7 parámetros después de la prueba de jarras

Parámetro	Agua I	Agua II
pH	7.2	7.2
Color	40	40
Turbiedad	4.3	1.3

Una vez concluida la prueba de jarras se filtró el Agua II en el filtro de arena y el Agua I en el filtro dual, resultando en la calidad mostrada en la Tabla 43 y 44. El muestreo a la salida de cada filtro se realizó cada 45 segundos.

Tabla 43. Prueba 7. Resultados Agua I – Filtro dual

Tiempo [s]	pH	Color [UC]	Turbiedad [UTN]	Eficiencia en remoción de turbiedad	Eficiencia en remoción de color
45	7.3	35	2.21	49%	13%
90	7.2	15	0.641	85%	63%
135	7.1	10	0.442	90%	75%
180	7	15	0.435	90%	63%
225	7	10	0.363	92%	75%
270	7	15	0.313	93%	63%
315	7	10	0.291	93%	75%
360	7	5	0.23	95%	88%
405	7	5	0.236	95%	88%
450	7	5	0.243	94%	88%

Tabla 44. Prueba 7. Resultados Agua II – Filtro arena

Tiempo [s]	pH	Color [UC]	Turbiedad [UTN]	Eficiencia en remoción de turbiedad	Eficiencia en remoción de color
45	7.5	20	1.15	12%	50%
90	7.3	25	1.5	-15%	38%
135	7.5	25	1.4	-8%	38%
180	7.5	25	1.13	13%	38%
225	7.5	25	0.943	27%	38%
270	7.5	25	0.873	33%	38%
315	7.5	25	0.673	48%	38%
360	7.5	25	0.765	41%	38%
405	7.5	25	0.873	33%	38%
450	7.5	25	0.843	35%	38%

Nótese que la turbiedad residual en la toma del segundo 90 y 135 aumentó con respecto a la turbiedad inicial (1.3 UTN), esto se atribuye a que en los primeros instantes de la operación del filtro el frente de agua tienen contacto con los sólidos retenidos en pruebas anteriores, removiendo un porcentaje mínimo.

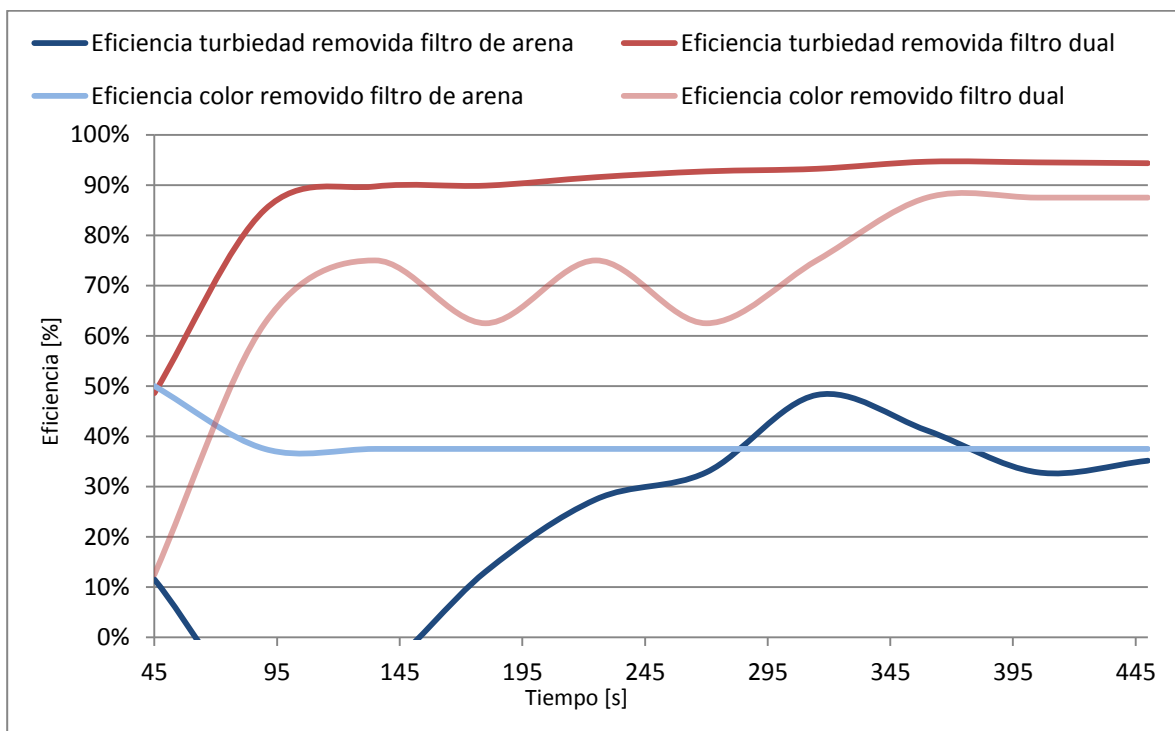


Imagen 62. Resultados prueba 7

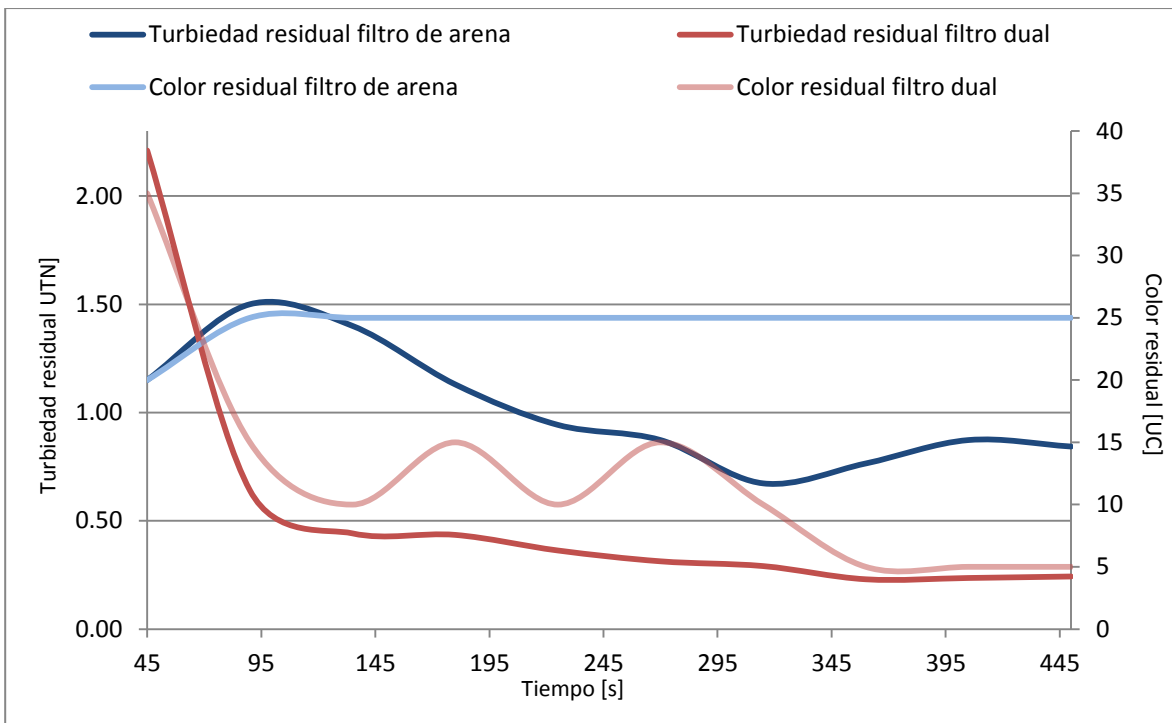


Imagen 63. Resultados prueba 7

PRUEBA 8

Dado que en la prueba 7 se obtuvieron resultados más convenientes que los obtenidos en las pruebas 5 y 6, la prueba 8 consiste en verificar los resultados en la remoción de color y turbiedad ajustando el pH a 7.5. La muestra sintética será la establecida, para dos dosis de coagulante.

Tabla 45. Prueba 8. Parámetros de la muestra sintética

Parámetro	Agua I	Agua II
pH	7.5	7.5
Color	45	45
Turbiedad	227	227
Dosis coagulante	6 mL/L	15 mL/L

Tabla 46. Prueba 8. Parámetros después de la prueba de jarras

Parámetro	Agua I	Agua II
pH	7.2	7.5
Color	45	45
Turbiedad	4.3	207

Una vez concluida la prueba de jarras se filtró el Agua II en el filtro de arena y el Agua I en el filtro dual, resultando en la calidad mostrada en la Tabla 47 y 48. El muestreo a la salida de cada filtro se realizó cada 45 segundos.

Tabla 47 Prueba 8 resultados Agua I – Filtro dual

Tiempo [s]	pH	Color [UC]	Turbiedad [UTN]	Eficiencia en remoción de turbiedad	Eficiencia en remoción de color
45	6.5	10	1.15	50%	78%
90	6.5	5	0.783	66%	89%
135	6.4	4	0.564	75%	91%
180	6.5	5	0.536	77%	89%
225	6.5	3	0.548	76%	93%
270	6.5	3	0.473	79%	93%
315	6.5	3	0.42	82%	93%
360	6.5	3	0.32	86%	93%
405	6.5	3	0.432	81%	93%
450	6.5	3	0.34	85%	93%

Tabla 48. Prueba 8. Resultados Agua II – Filtro arena

Tiempo [s]	pH	Color [UC]	Turbiedad [UTN]	Eficiencia en remoción de turbiedad	Eficiencia en remoción de color
45	7.5	35	14.7	93%	22%
90	7.5	30	12.6	94%	33%
135	7.4	20	3.65	98%	56%
180	7.5	15	1.66	99%	67%
225	7.5	10	1.12	99%	78%
270	7.5	10	1.06	99%	78%
315	7.5	10	0.987	100%	78%
360	7.5	10	0.876	100%	78%
405	7.5	10	0.893	100%	78%
450	7.5	10	0.935	100%	78%

Nótese que a pesar de no existir buenos resultados en la remoción de turbiedad y color en la prueba de jarras, hubo una adecuada remoción de dichas características hasta el proceso de filtración, inclusive de eficiencias cercanas al 100%. Cabe destacar que también a este pH se presenta una remoción de color en el filtro de arena cercana al 80%, siendo cercana a la remoción presentada por el filtro dual.

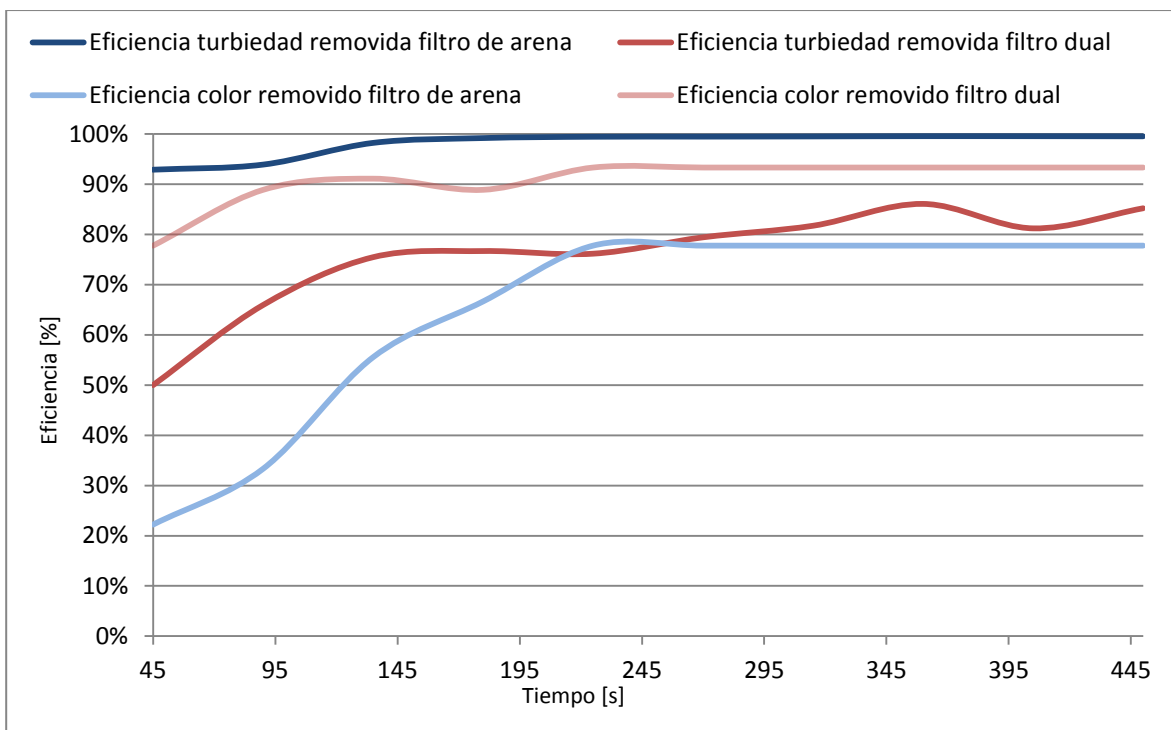


Imagen 64. Resultados prueba 8

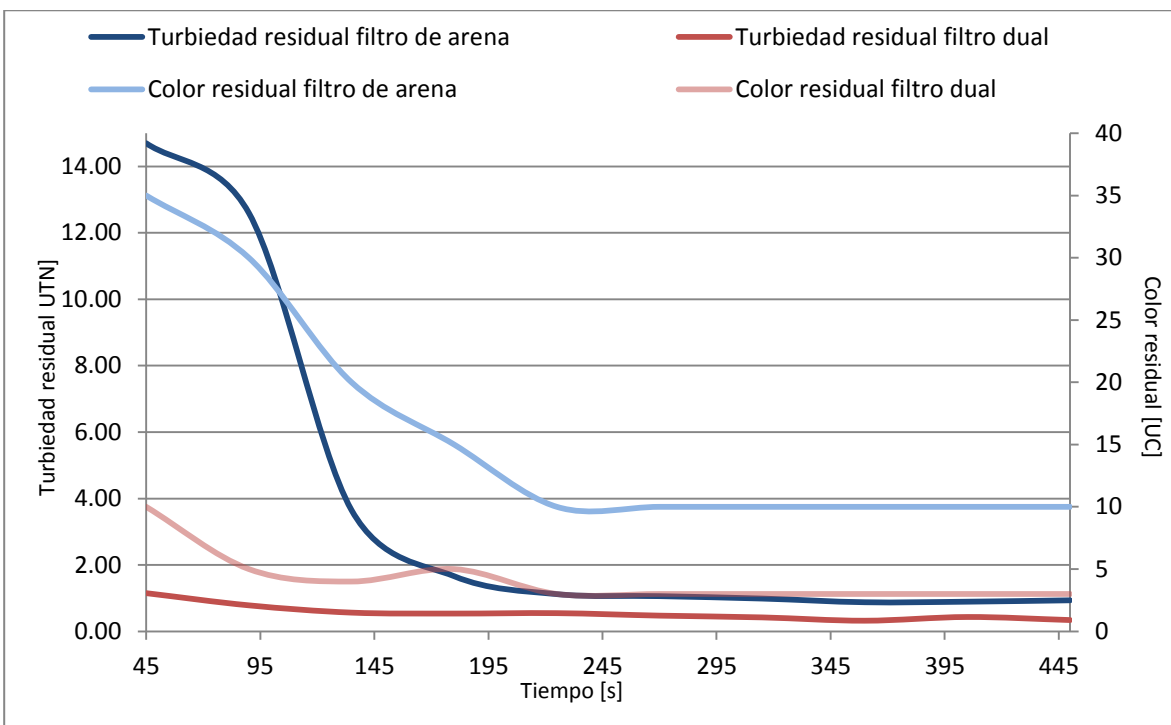


Imagen 65 Resultados prueba 8

Prueba 9

Consiste en obtener los resultados de remoción de color y turbiedad ajustando el pH a un valor de 8. A diferencia de la prueba 5 en la cual se ajustó al mismo pH, ésta incluye el uso del filtro dual. La muestra sintética será la establecida.

Tabla 49. Prueba 9. Parámetros de la muestra sintética

Parámetro	Agua I	Agua II
pH	8.0	8.0
Color	70	70
Turbiedad	317	317
Dosis coagulante	6 mL/L	15 mL/L

Tabla 50. Prueba 9. Parámetros después de la prueba de jarras

Parámetro	Agua I	Agua II
pH	7.4	7.3
Color	70	70
Turbiedad	3.5	1.3

Una vez concluida la prueba de jarras se filtró el Agua II en el filtro de arena y el Agua I en el filtro dual, resultando en la calidad mostrada en la Tabla 51 y 52. El muestreo a la salida de cada filtro se realizó cada 45 segundos.

Tabla 51. Prueba 9. Resultados Agua I – Filtro dual

Tiempo [s]	pH	Color [UC]	Turbiedad [UTN]	Eficiencia en remoción de turbiedad	Eficiencia en remoción de color
45	6.5	10	1.13	68%	86%
90	6.5	12	1.05	70%	83%
135	6.5	7	0.987	72%	90%
180	6.5	5	0.835	76%	93%
225	6.5	5	0.756	78%	93%
270	6.5	5	0.749	79%	93%
315	6.5	5	0.694	80%	93%
360	6.5	5	0.583	83%	93%
405	6.5	5	0.534	85%	93%
450	6.5	5	0.515	85%	93%

Tabla 52. Prueba 9. Resultados Agua II – Filtro arena

Tiempo [s]	pH	Color [UC]	Turbiedad [UTN]	Eficiencia en remoción de turbiedad	Eficiencia en remoción de color
45	7.3	65	2.3	-77%	7%
90	7.2	60	1.4	-8%	14%
135	7.2	55	1.32	-2%	21%
180	7.2	55	1.23	5%	21%
225	7.2	55	1.05	19%	21%
270	7.2	55	1.03	21%	21%
315	7.2	55	0.895	31%	21%
360	7.2	55	0.789	39%	21%
405	7.2	55	0.765	41%	21%
450	7.2	55	0.721	45%	21%

Al igual que en la prueba 8 la turbiedad es mayor que la inicial en las primeras tres tomas.

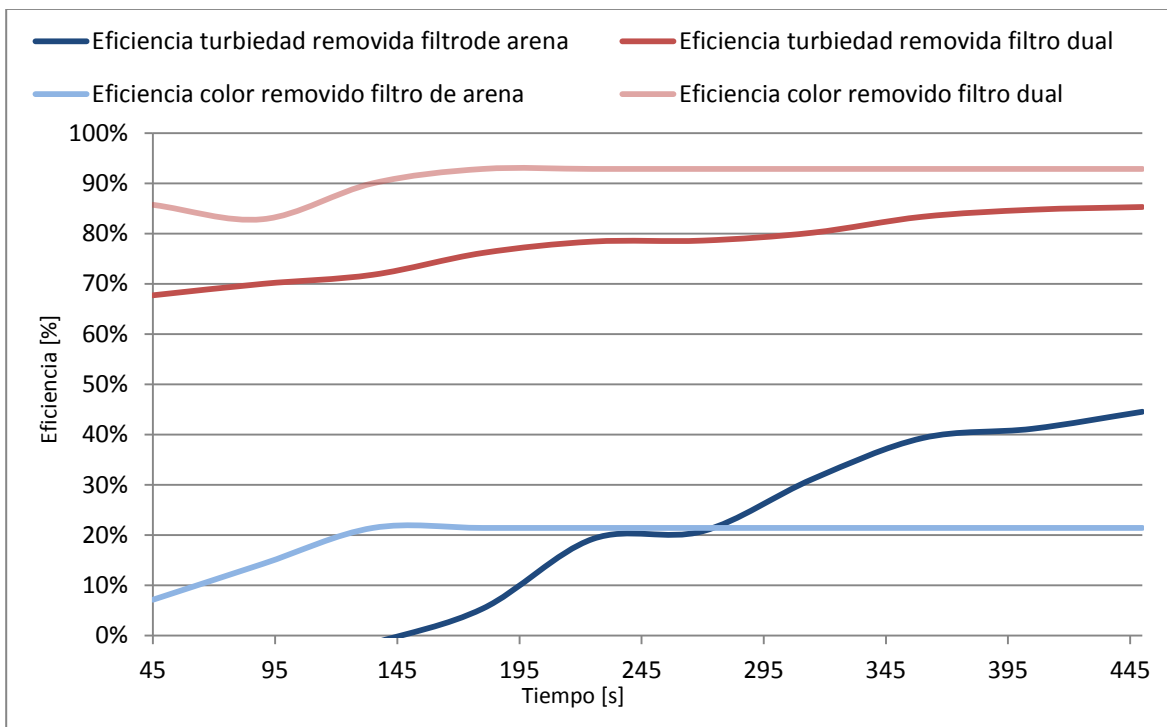


Imagen 66. Resultados prueba 9

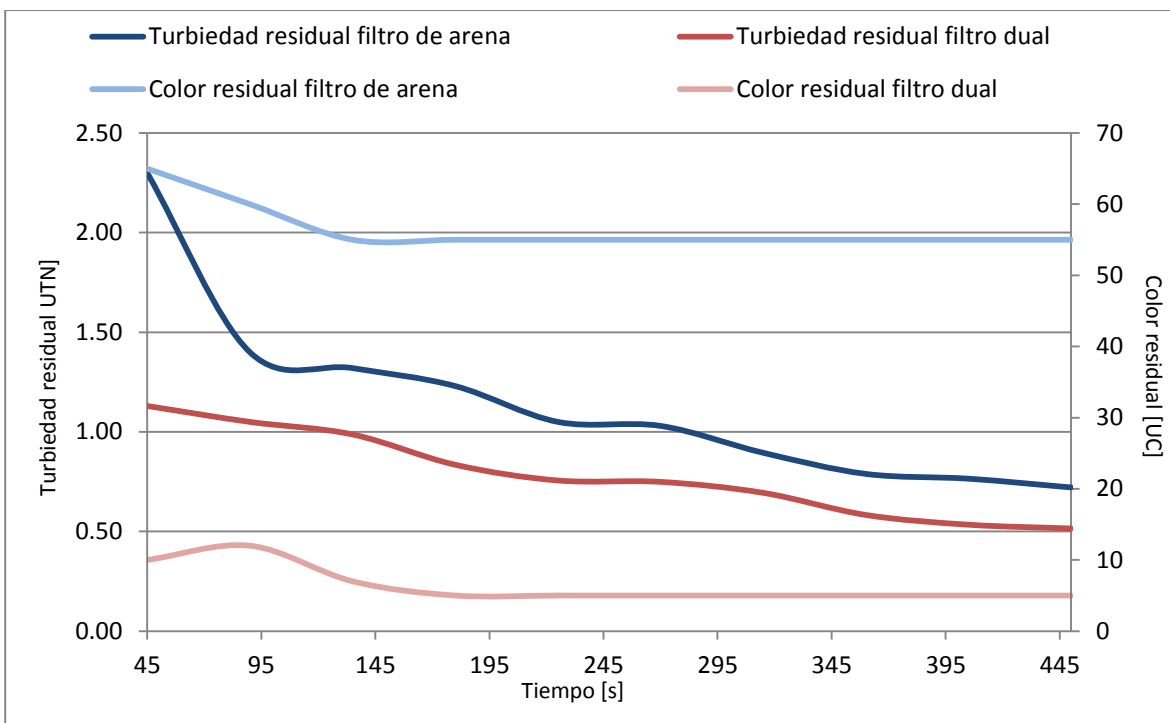


Imagen 67. Resultados prueba 9

Prueba 10

Consiste en verificar la tendencia en los resultados de la remoción de color y turbiedad observados en las pruebas 5, 6, 7, 8 y 9. Ajustando a la muestra sintética establecida el pH a un valor de 8.5.

Los resultados son los siguientes:

Tabla 53. Prueba 10. Parámetros de la muestra sintética

Parámetro	Agua I	Agua II
pH	8.5	8.5
Color	70	70
Turbiedad	301	301
Dosis coagulante	6 mL/L	15 mL/L

Tabla 54. Prueba 10. Parámetros después de la prueba de jarras

Parámetro	Agua I	Agua II
pH	7.2	7.4
Color	70	70
Turbiedad	5.6	187

Una vez concluida la prueba de jarras se filtró el Agua II en el filtro de arena y el Agua I en el filtro dual, resultando en la calidad mostrada en la Tabla 55 y 56. El muestreo a la salida de cada filtro se realizó cada 45 segundos.

Tabla 55. Prueba 10. Resultados Agua I – Filtro dual

Tiempo [s]	pH	Color [UC]	Turbiedad [UTN]	Eficiencia en remoción de turbiedad	Eficiencia en remoción de color
45	6.5	10	1.14	80%	86%
90	6.4	8	1.05	81%	89%
135	6.3	5	0.978	83%	93%
180	6.5	5	0.872	84%	93%
225	6.5	5	0.798	86%	93%
270	6.5	5	0.675	88%	93%
315	6.5	5	0.591	89%	93%
360	6.5	5	0.691	88%	93%
405	6.5	5	0.531	91%	93%
450	6.5	5	0.514	91%	93%

Tabla 56. Prueba 10. Resultados Agua II – Filtro arena

Tiempo [s]	pH	Color [UC]	Turbiedad [UTN]	Eficiencia en remoción de turbiedad	Eficiencia en remoción de color
45	7	70	3.45	98%	1%
90	7	70	2.65	99%	1%
135	7	70	2.14	99%	1%
180	7	70	1.19	99%	1%
225	7	70	1.03	99%	1%
270	7	70	0.965	99%	1%
315	7.1	70	0.921	100%	1%
360	7	70	0.874	100%	1%
405	7	70	0.765	100%	1%
450	7.1	70	0.793	100%	1%

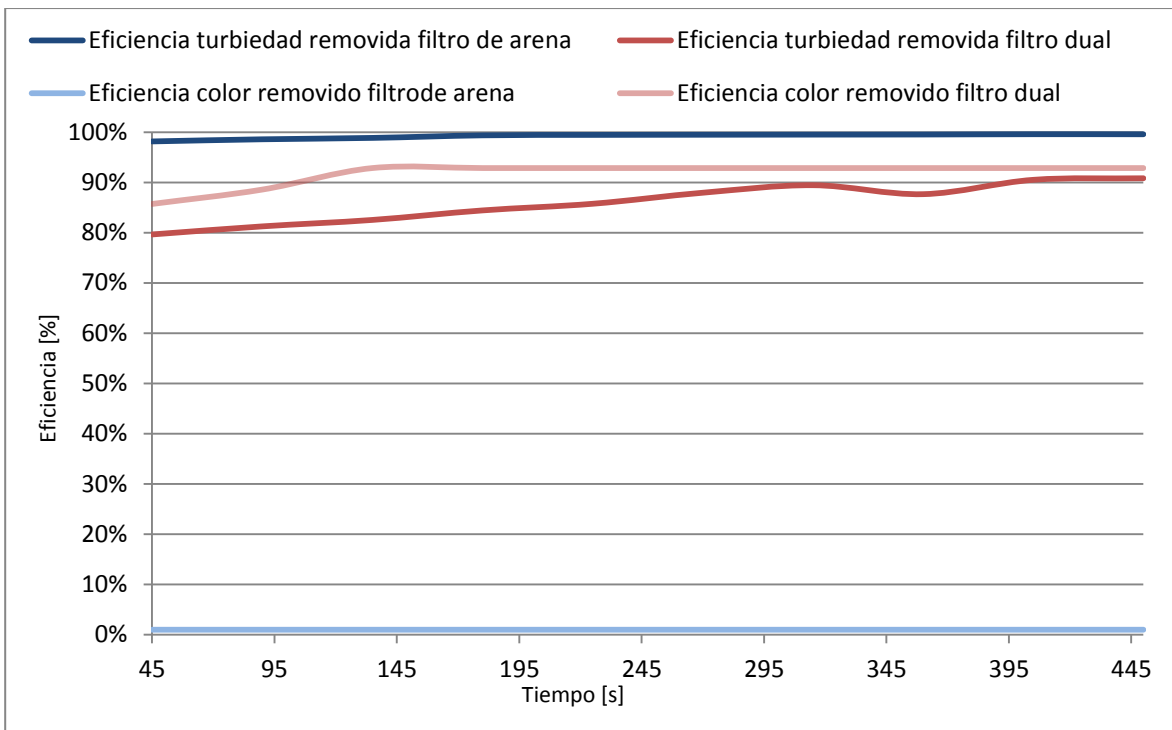


Imagen 68. Resultados prueba 10

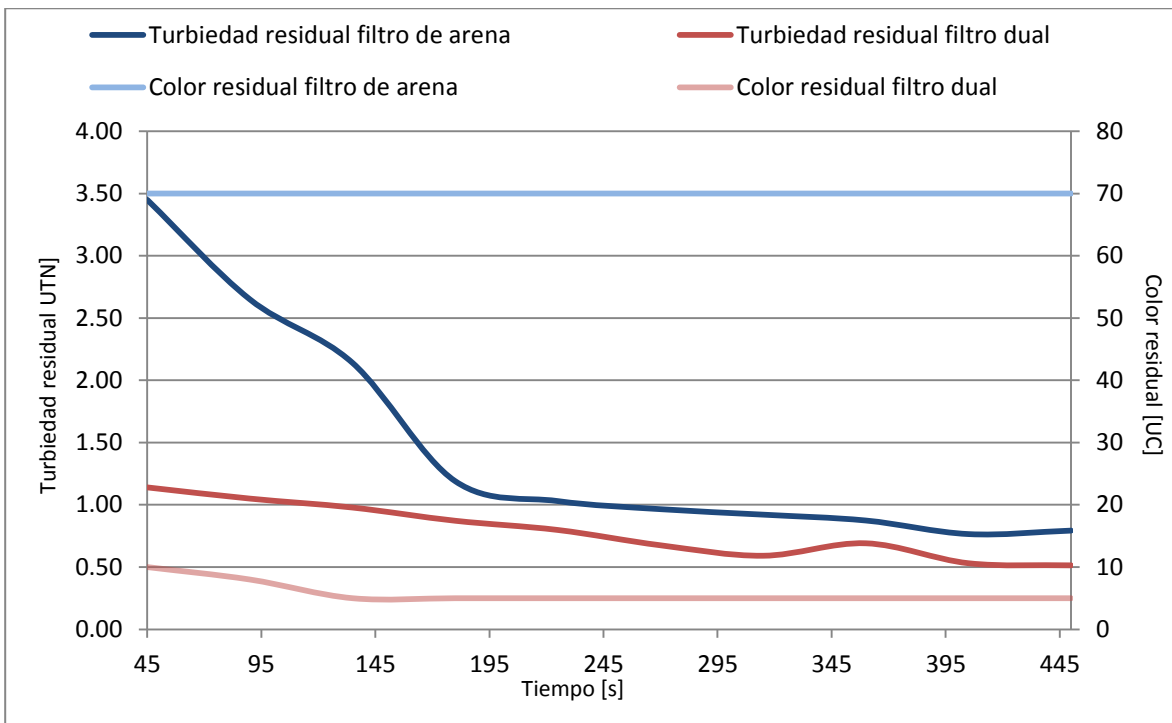


Imagen 69. Resultados prueba 10

4.2.1 Resumen de resultados de los 10 ensayos

A continuación en las Tablas 57 y 58, se presentan los diferentes resultados de los 10 ensayos realizados para cada filtro empleado. Estos resultados servirán para establecer las características de la muestra sintética que se utilizará en la práctica de laboratorio de filtración. Los resultados incluyen pH, turbiedad, color, dosis de coagulante y desempeño de los filtros.

Tabla 57. Resultados de los 10 ensayos

Muestra	Filtro de arena				
Ensayo	pH	Turbiedad [UTN]	Color [UC]	Dosis coagulante [mL/L]	Desempeño filtro
1	8.2	9.9	35	6	Regular
2	7.2	4.77	5	6	Regular
3	7.0	1.43	5	6	Regular
4	7.0	--	50	15	No hubo filtración
5	7.1	2.88	40	15	Bueno
6	9.0	2.3	50	15	Regular
7	7.0	1.3	40	15	Regular
8	7.5	207	45	15	Bueno
9	8.0	1.3	70	15	Regular
10	8.5	187	70	15	Regular

- ✓ Un desempeño regular indica que se observaron buenos o excelente resultados para la remoción de turbiedad y malos para la remoción de color.

Tabla 58. Resultados de los 10 ensayos

Muestra	Filtro dual				
Ensayo	pH	Turbiedad [UTN]	Color [UC]	Dosis coagulante [mL/L]	Desempeño filtro
1	8.2	9.9	35	6	Excelente
2	8.9	14.3	40	6	Excelente
3	8.0	0.826	35	6	Excelente
4	7.0	--	50	15	No hubo filtración
5	7.3	1.2	35	15	Excelente
6	7.3	4.5	40	6	Excelente
7	7.2	4.3	40	6	Excelente
8	7.2	4.3	45	6	Excelente
9	7.4	3.5	70	6	Excelente
10	7.2	5.6	70	6	Excelente

En las imágenes 70, 71, 72 y 73; se muestran las eficiencias por filtro de cada parámetro cuantificado. Puede notarse que los filtros duales tienen eficiencia superior que los de arena en prácticamente todas las pruebas; mientras que en los de arena, su eficiencia depende del proceso de C-F-S.

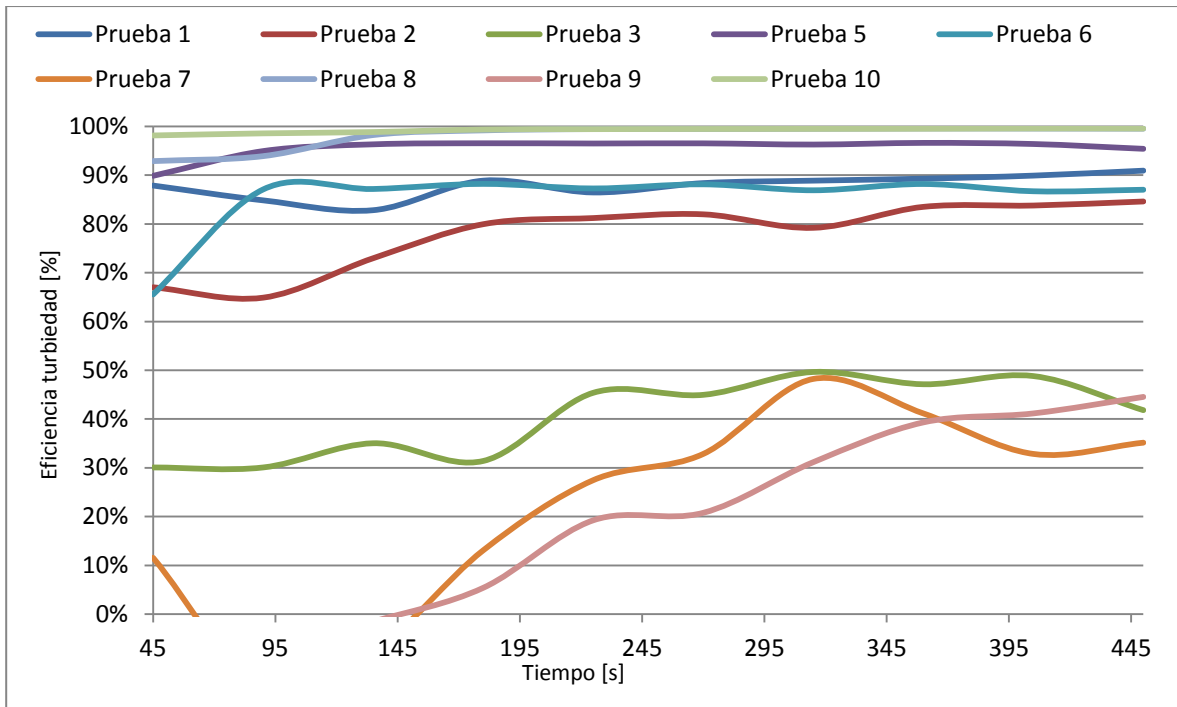


Imagen 70. Eficiencia en remoción de turbiedad en el filtro de arena

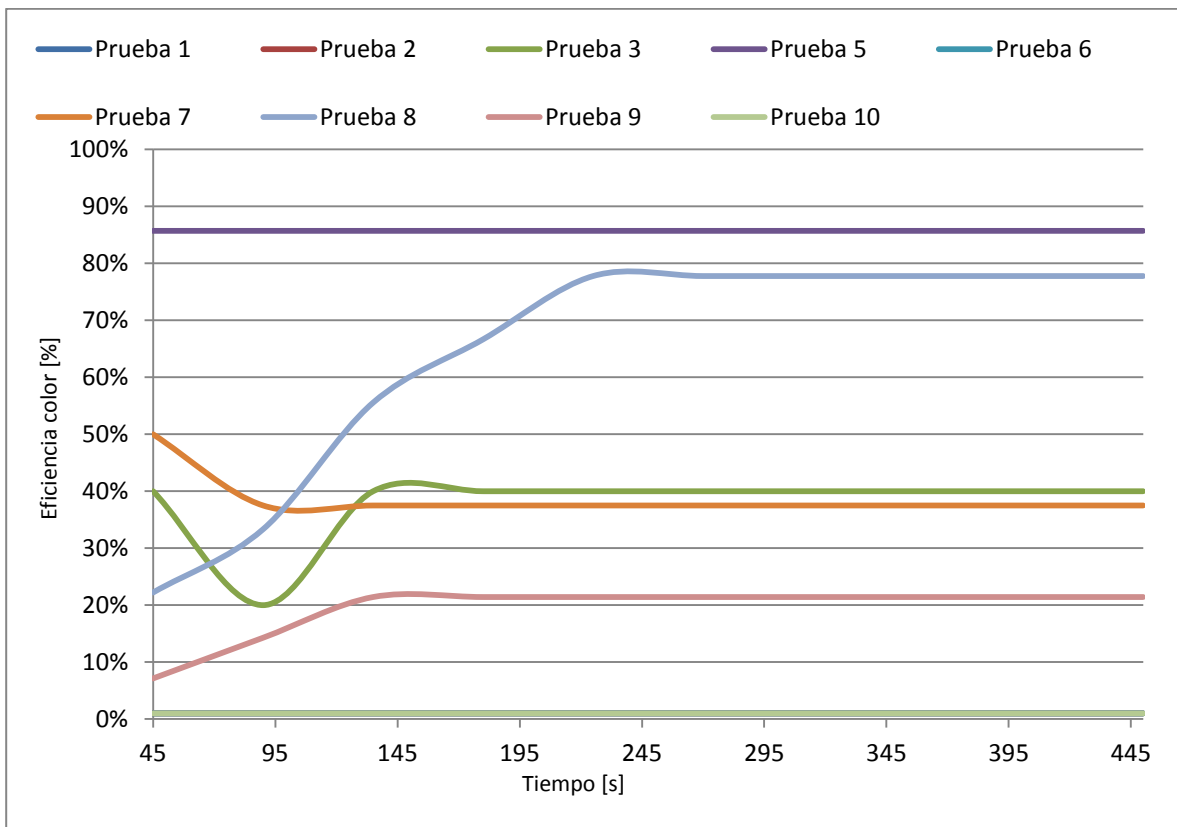


Imagen 71. Eficiencia en remoción de color en el filtro de arena

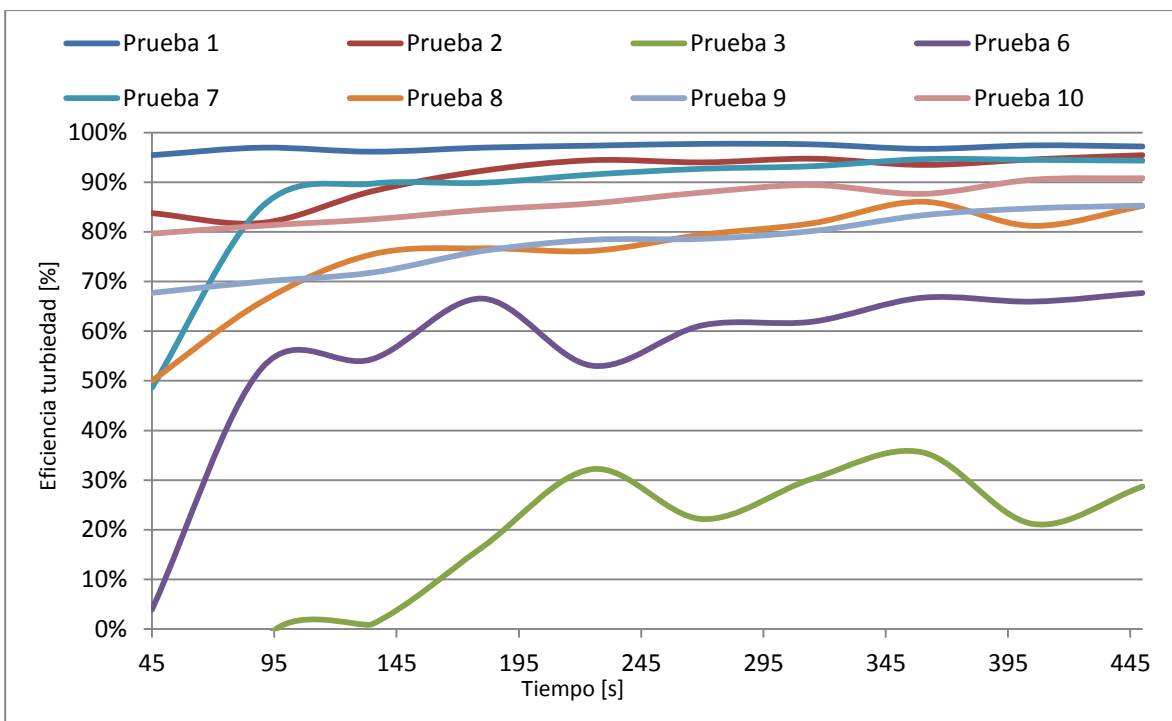


Imagen 72. Eficiencia en remoción de turbiedad en el filtro dual

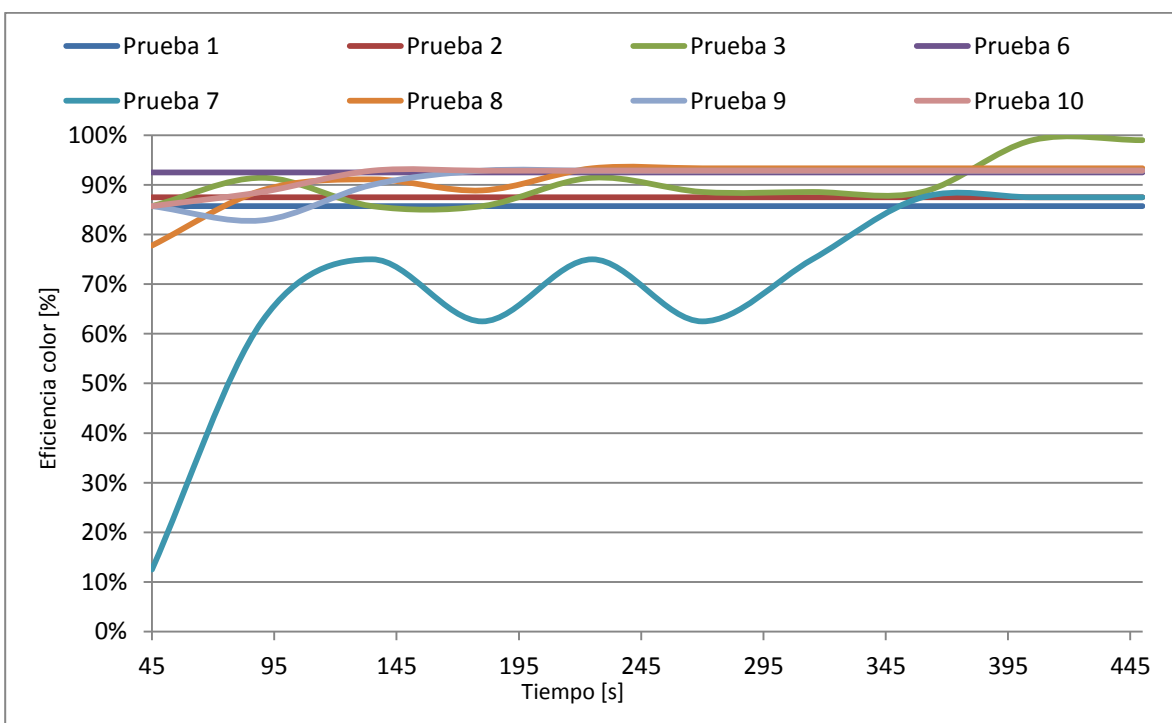


Imagen 73. Eficiencia en remoción de color en el filtro dual

Con base en los resultados observados se puede decir que el filtro de arena y el filtro dual presentan diferente características de turbiedad y color, por lo que en la práctica a realizar en el

laboratorio se recomienda considerar el uso de dos tipos de muestra sintética, ello permitirá identificar la eficiencia de ambos mecanismos.

El color es posible removerlo si el coagulante y el potencial de hidrógeno son los adecuados, haya o no haya turbiedad; un pH de 7.5 con una dosis alta de coagulante, como por ejemplo 15 mL/L, permite la coagulación de las partículas coloidales de color y turbiedad, formando flóculos pequeños que pueden ser retenidos en los filtros.

Los pH menores a 7.5 indican un agua en la cual se dificulta el proceso de coagulación y por lo tanto la floculación de las partículas coloidales.

Un pH mayor a 7.5 representa un agua en la cual sólo coagulan y floculan las partículas que conforman la turbiedad y, dado que su sedimentación es muy rápida, no se alcanza la coagulación y floculación de las partículas que le confieren color al agua y su posterior retención en los filtros.

Para identificar los mecanismos de remoción y color que suceden en un filtro en el laboratorio, se recomienda manipular dos variables: el pH o las características de color de la muestra sintética.

En resumen, se consideran las dos siguientes opciones de muestra sintética a utilizar en el laboratorio para realizar la práctica.

Opción 1: La tabla 59 describe las características de las muestras sintéticas recomendadas para observar el mecanismo de remoción de color y turbiedad por ambos filtros. Nótese que no se recomienda el cambio en el pH, tampoco difiere la dosis de coagulante utilizada para generar las dos muestras.

Tabla 59. Opción 1 de muestra sintética

Agua I	Agua II
Color bajo: 0-10 [UC]	Color: alto 35-50 [UC]
Turbiedad: 280-310 [UTN]	Turbiedad: 280-310 [UTN]
pH: 8.5-9.0	pH: 8.5-9.0
Dosis de coagulante: 6 mL/L	Dosis de coagulante: 6 mL/L
Usar filtro de arena	Filtro dual

Opción 2: Otra alternativa igualmente útil para observar el mecanismo de remoción de color y turbiedad en filtros consiste en el uso de las muestras establecidas en la tabla 60, la cual presenta una variación en el pH, para notar diferentes formas de coagulación y floculación, además se varía la cantidad de coagulante agregado.

Tabla 60 Tipos de agua a usar B

Agua III	Agua IV
Color alto 35-50 [UC] Turbiedad 280-310 [UTN] pH: 7.5 Coagulante: 15 mL/L Filtro de arena	Color alto 35-50 [UC] Turbiedad 280-310 [UTN] pH: 8.5-9.0 Coagulante: 6 mL/L Filtro dual

Para fines de practicidad, en el laboratorio los alumnos conformarán las muestras sintéticas expresadas en la Tabla 59; ya que por disponibilidad de tiempo es más rápido y fácil variar únicamente el color en las muestras.

Si bien no se está considerando los resultados obtenidos en los demás ensayos para diseñar el manual de prácticas, son importantes ya que la realización de dichos ensayos sirvieron para observar diferentes situaciones sucedidas en los procesos de clarificación convencionales y obtener diferentes conclusiones.

CAPÍTULO V

DISEÑO DEL MANUAL DE PRÁCTICA

Este capítulo tiene como fin contar con un manual de prácticas que será utilizado en el laboratorio del Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, a efecto de ejemplificar las pruebas de tratabilidad de un tren de tratamiento convencional, al que se someterá una muestra sintética, la cual tendrá un pH, color y turbiedad establecidos.

El manual de prácticas consta de una primera sección que incluye los conceptos teóricos relativos a la filtración rápida de agua en arena y en medios duales de arena y carbón activado, esto con la intención de introducir al alumno a los temas relativos a la filtración.

Una segunda sección consta del instructivo para realizar los ensayos en el laboratorio, el cual consta de objetivos, materiales, desarrollo de la prueba, toma de datos, cálculos, resultados y conclusiones.



Introducción:

Conceptos teóricos

Un filtro es un medio poroso a través del cual el agua se hace pasar para retener los materiales suspendidos. Es un sistema que separa la fase sólida de la líquida en una mezcla en fase acuosa. Es parte final del proceso clarificador del agua para uso y consumo humano; el agua debe ser filtrada para poder retirar los flóculos que no pudieron sedimentarse en el proceso de coagulación-floculación- sedimentación.

Se considera que la filtración es un requisito en todo proceso convencional de clarificación, esta se realiza comúnmente a través de medios de arena, antracita o carbón activado. La filtración remueve el material suspendido, representado principalmente por la turbiedad, compuestos de flóculos, suelos, metales, óxidos y microorganismos.

Si bien no es un proceso de desinfección, es decir su objetivo principal no es la inactivación de los microorganismos patógenos, muchos de estos suelen ser retenidos por el mecanismo de cernido

que se presenta en el proceso de filtrado. Sirviendo finalmente para disminuir la concentración de patógenos en el agua. Los filtros rápidos pueden retener hasta el 98% de bacterias y otros microorganismos grandes como algas y diatomeas; pero los olores y sabores producidos por estos no serán eliminados a menos que se aplique otro proceso destinado a tal fin. Se recomienda que el agua posterior a la sedimentación tenga una turbiedad de 2 UNT, esto con el fin de que los filtros produzcan un agua con turbiedad final de 0.10 UNT; con estos valores se garantiza la inexistencia de huevos de parásitos como la Giardia o Cryptosporidium. Esto en base a la recomendación de la Agencia de Protección Ambiental (EPA). Los huevos de parásito son resistentes a la desinfección con un agente de cloro, por lo que es de vital importancia su remoción en los filtros.

Es un método utilizado en prácticamente todos los procesos de potabilización de aguas superficiales. Dependiendo de la calidad del agua de afluente puede usarse de manera directa, es decir en ausencia de un tratamiento C-F-S, o bien, posterior a estos procesos.

Con el objetivo de encontrar las dosis óptimas de coagulantes para evitar la rápida colmatación del filtro y que flóculos muy pequeños puedan pasar a través del lecho filtrante, la filtración debe ser estudiada en conjunto con la coagulación.

Para la retención de sólidos en el lecho filtrante son necesarios dos mecanismos, diferentes pero complementarios, que los mantienen retenidos entre los granos del medio filtrante. Estos procesos se describen a continuación:

Fuerzas de transporte: Las partículas por retirar son trasladadas del líquido a la superficie de los granos del medio filtrante. Éste es un fenómeno físico e hidráulico que sigue la ley de la transferencia de masas.

Fuerzas de adherencia: Estas partículas permanecen adheridas a la superficie de los granos, donde por la distancia sumamente pequeñas entre los mismos, se hace posible que las fuerzas que separan a la partícula y la adherencia al medio filtrante sean efectivas; esto dependiendo de las fuerzas de cizallamiento producidas por las condiciones hidrodinámicas del escurrimiento.

Las fuerzas de adherencia dependen de las características superficiales de las partículas suspendidas y de los granos. Las partículas suspendidas pueden adherirse directamente sobre la superficie de los granos o a partículas retenidas con anterioridad. Son atribuidas a dos tipos de fenómenos: interacción entre fuerzas eléctricas y de Van der Waals, así como al enlace químico entre las partículas y la superficie de los granos.

Entre los mecanismos de transporte existen el cernido, sedimentación, intercepción, difusión, impacto inercial y las acciones hidrodinámicas; mientras que en los mecanismos de adherencia se conocen las fuerzas de Van der Waals y los enlaces químicos entre las partículas y los granos del filtro.

Los filtros comúnmente usados en las plantas de tratamiento son de arena sílica y antracita o carbón activado.

Las arenas sílicas se constituyen por sílice y oxígeno. Es una sustancia muy abundante en la corteza terrestre ya sea en forma de cuarzo u ópalo. Es el mineral más común de la tierra, compuesto por dióxido de silicio o sílice, SiO_2 . Puede encontrarse en el planeta como componente de rocas o en forma de depósitos puros, es el principal constituyente de las rocas ígneas como el granito, riolita y la pegmatita.

El carbón activado es un material poroso que tiene la capacidad de adsorber algunas partículas que presentan afinidad al medio, ya sean gases o líquidos. Todas las partículas de carbón tienen la capacidad de adsorber de forma efectiva, dado que al “activarse”, es decir al hacerlo poroso mediante diversos mecanismos, aumenta su área específica, incrementando su desempeño.

La arena y el carbón activado deben de cumplir con ciertas recomendaciones dadas por diversos autores o investigadores del tema; entre los parámetros comunes a todos los filtros se encuentran los establecidos en la tabla 1.

Tabla 1. Características de los medios filtrantes

Características	Lentos de arena	Rápidos de arena	Duales
Tasa de filtración	<i>2-5 m/d</i>	<i>120 m/d</i>	<i>180-480 m/d</i>
Medio	<i>Arena muy fina</i>	<i>Arena estratificada</i>	<i>Arena y antracita</i>
Distribución del medio	<i>No estratificado</i>	<i>Grueso a Fino</i>	<i>Grueso a fino</i>
Duración de carrera	<i>20-60 días</i>	<i>12-36 horas</i>	<i>12-36 horas</i>
Profundidad medio	<i>0.6-1.0 m</i>	<i>0.60-0.75m</i>	<i>Antracita: 0.4-0.6m Arena 0.15-0.30m</i>
Profundidad grava	<i>0.30 m</i>	<i>0.30-0.45m</i>	<i>0.30-0.45m</i>
D10	<i>0.15-0.35</i>	<i>0.45-0.55</i>	<i>Antracita= 2 D10 Arena</i>
CU	<i>Cercano a la unidad</i>	<i>1.2-1.7</i>	<i>Antracita= Menor a 1.7</i>

El proceso de coagulación-floculación-sedimentación-filtración es el principal método para remover turbiedad y color. Cuando el agua presenta color el cual no puede ser retirado por el método de C-F-S, se debe utilizar un proceso de adsorción en antracita o carbón activado. Estos carbones pueden ser naturales, como la antracita o artificiales como el carbón activado, su efectividad radica en que poseen microporos y un área específica muy alta por lo cual tienen una gran facilidad para retener

partículas suspendidas y disueltas. El agua a la salida de los filtros debe cumplir con todas las características físicas, químicas y microbiológicas de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana 127 SSA.

Los filtros pueden denominarse simples si únicamente están conformados por arenas, o duales si además de la arena contienen un estrato de un material adsorbente, que puede ser antracita o carbón activado.

Práctica No. 6

Filtración en lechos simples y duales



Objetivo

Observar y comprender el funcionamiento y la eficiencia de la filtración como parte de un proceso convencional para la potabilización de agua, mediante el uso de filtros simples de arena y duales de arena y carbón activado.



Materiales, equipos y reactivos:

Cristalería

- ✓ 12 vasos de precipitado de 1 litro
- ✓ 20 vasos de precipitado de 50 mL
- ✓ 2 pipetas graduadas de 10 mL
- ✓ 2 probetas de 1 L

Equipo

- ✓ 2 Aparatos de Jarras
- ✓ Turbidímetro HACH 2100^a
- ✓ Colorímetro
- ✓ Medidor de pH
- ✓ 2 agitadores con píldora
- ✓ Báscula analítica
- ✓ 2 espátulas
- ✓ 2 cubetas de 6 L

Reactivos

- ✓ Sulfato de aluminio en solución a 5.7 mg/L

- ✓ Sosa cáustica 0.02N
- ✓ Ácido sulfúrico 0.02N
- ✓ Infusión colorante de yerbabuena
- ✓ Caolín
- ✓ Carbonato de sodio
- ✓ Carbonato de calcio

En caso de que no se tenga sulfato de aluminio en solución será necesario prepararlo. Para tal efecto se requiere mezclar 5.7 gramos del coagulante en cristal en un litro de agua destilada, se debe agitar preferentemente en la máquina con píldora hasta que los cristales estén completamente disueltos.



Procedimiento

El grupo se organizará en dos brigadas; una de las cuales deberá preparar la muestra sintética con turbiedad y color, y la otra la muestra sintética con turbiedad únicamente.

Procedimiento para conformar la muestra con turbiedad y color

- 1 En una palangana colocar 5 L de agua de la red.
- 2 Agregar 1 L de infusión colorante.
- 3 Agregar a los 6 L de agua con color 1.65 g de los siguientes reactivos: caolín, carbonato de calcio y carbonato de sodio. Para tal efecto utilice 3 vasos de precipitado, la espátula y la báscula analítica.
- 4 Utilizando la parrilla agitadora mezclar durante tres minutos.
- 5 Colocar un litro de muestra sintética en cada uno de los 6 vasos de precipitados.
- 6 Coloque los vasos de precipitado en el equipo de jarras.
- 7 Usando una pipeta, coloque en 6 vasos de precipitados de 50 mL dosis 6 mL de sulfato de aluminio.
- 8 A cada vaso de precipitado de un litro agregar al mismo tiempo 6 mL de sulfato de aluminio previamente aforados.
- 9 Iniciar la prueba agitando durante un minuto a 100 rpm.
- 10 Ajustar a 40 rpm y permitir la mezcla lenta durante 15 minutos.
- 11 Pasados los 15 minutos de mezcla lenta, apagar el equipo y permitir la sedimentación durante 15 minutos.
- 12 Después del tiempo de sedimentación, decante en una cubeta de 6 L evitando la resuspensión de lodos.
- 13 Vierta cuidadosamente el agua de la cubeta en el filtro dual manteniendo el nivel indicado en el tubo del filtro.

- 14 Cada 45 segundos tome muestras a la salida del filtro, utilice el equipo necesario para cuantificar su pH, color y turbiedad. Registre los datos.

Procedimiento para conformar la muestra con turbiedad

- 1 En una palangana colocar 6 L de agua de la red.
- 2 Agregar a los 6 L de agua con color 1.65 g de los siguientes reactivos: caolín, carbonato de calcio y carbonato de sodio. Para tal efecto utilice 3 vasos de precipitado de 50 mL, la espátula y la báscula analítica.
- 3 Utilizando la parrilla agitadora mezclar durante tres minutos.
- 4 Colocar un litro de muestra sintética con turbiedad en cada uno de los 6 vasos de precipitados.
- 5 Coloque los vasos de precipitado en el equipo de jarras e inicie la mezcla a 100 rpm.
- 6 Usando la pipeta, coloque en cada uno de 6 vasos de precipitados de 50 mL, 6 mL de sulfato de aluminio.
- 7 A cada vaso de precipitado en el equipo de jarras agregue 6 mL de sulfato de aluminio al mismo tiempo.
- 8 Iniciar la prueba agitando durante un minuto a 100 rpm.
- 9 Ajustar a 40 rpm y permitir la mezcla lenta durante 15 minutos.
- 10 Pasados los 15 minutos de mezcla lenta, apagar el equipo y permitir la sedimentación durante 15 minutos.
- 11 Después del tiempo de sedimentación, decante en una cubeta de 6L evitando la resuspensión de lodos.
- 12 Vierta cuidadosamente el agua de la cubeta en el filtro dual manteniendo el nivel indicado en el tubo del filtro.
- 13 Cada 45 segundos tome muestras a la salida del filtro, utilice el equipo necesario para cuantificar su pH, color y turbiedad. Registre los datos



Resultados

Registrar los parámetros iniciales de las muestra sintética

Muestra	Turbiedad	Color	pH
Agua con turbiedad y color			
Agua con turbiedad			

Registrar los parámetros de la muestra sintética después del proceso C-F-S

Muestra	Turbiedad	Color	pH
Agua con turbiedad y color			
Agua con turbiedad			

Registrar los parámetros del agua con color a la salida del filtro simple. Utilizando los valores de la tabla anterior calcule las eficiencias en remoción de color y turbiedad.

Muestra #	Turbiedad	Color	pH	Eficiencia remoción de turbiedad	Eficiencia remoción de color
1					
2					
3					
...					

Registrar los parámetros del agua sin color a la salida del filtro simple. Utilizando los valores de la tabla anterior calcule las eficiencias en remoción de color y turbiedad.

Muestra #	Turbiedad	Color	pH	Eficiencia remoción de turbiedad	Eficiencia remoción de color
1					
2					
3					
...					



Análisis de resultados

Compare los resultados obtenidos en las muestras a la salida de cada filtro

Identificar el filtro más eficiente en la remoción de partículas suspendidas y tratar de reconocer causas.

Revisar la NOM-127-SSA y comparar los parámetros indicados con las características del agua a la salida de cada filtro.

Observar los filtros y sus características granulométricas. Comparar con las recomendaciones de diversos autores.



Conclusiones

El agua para uso y consumo humano debe cumplir con un lineamiento de calidad; el cual puede ser obtenido dependiendo de las características del agua cruda en la obra de captación. La filtración es parte importante de este procedimiento, ya que tiene la función de retener los sólidos suspendidos en la solución acuosa. Además posee la propiedad de retener un gran número de microorganismos, tales como huevos de parásitos y algas. El uso del proceso de coagulación-floculación-sedimentación permite aumentar la eficiencia de los medios filtrantes y por consecuencia la obtención de un efluente de mayor calidad y que represente un menor riesgo a los consumidores.

El proceso C-F-S-F ha permitido remover los sólidos suspendidos en la muestra sintética; se ha podido observar y cuantificar el funcionamiento de dos métodos de filtración diferentes. Los filtros de arena sólo permiten remover bajos valores de turbiedad y color, mientras que los duales permiten remover, además de la turbiedad, el color. Esto es posible debido a que el carbón activado tiene una capacidad de adsorción que le permite remover los coloides más pequeños.

- ✓ ¿Se cumplieron los objetivos de la práctica total o parcialmente? Explique.



Actividades y problemas propuestos

- ✓ Investigue la diferencia entre carbón activado y antracita.
- ✓ Investigue qué otros procesos para remover color pueden usarse.

CONCLUSIONES

Se construyeron dos medios filtrantes, los cuales se emplearon para ejemplificar la remoción de turbiedad en medios de arena, y la remoción de color y turbiedad en medios duales de arena y carbón activado. Se redactó el manual de la práctica en donde se expresan todos los requisitos para la elaboración de la muestra sintética y para el desarrollo del tren de tratamiento C-F-S-F.

Para representar el proceso de remoción de turbiedad y color fue necesario la conformación de dos muestras sintéticas, una de las cuales contiene reactivos que le confieren color y turbiedad, mientras que la otra solo contiene reactivos para la turbiedad. Para tal efecto fue necesaria la experimentación con colorantes artificiales y naturales. El colorante elegido para la reproducción de las pruebas fue generado a partir de hojas de yerbabuena, ya que estas le confiere a la muestra un color cuantificable mediante la escala platino cobalto, lo que la hace representativa del color que se espera en una fuente superficial.

Al implementar un filtro dual, adicional al de arena original, se pudieron ejemplificar dos alternativas de filtración, así como verificar que los filtros estratificados son de mayor eficiencia que los no estratificados, aunque estos últimos presentan un buen desempeño en el proceso de remoción de sólidos suspendidos.

Los filtros duales, a diferencia de los filtros simples, tienen mayor eficiencia en la remoción de color y turbiedad. Ya que adicional a los mecanismos de transporte y adherencia, el carbón presenta una gran superficie específica, en la cual se pueden retener una gran variedad de partículas.

La NOM 127 SSA 1994 no recomienda al proceso de C-F-S-F como procedimiento viable para la remoción de color, sin embargo, durante las pruebas de jarras y posterior filtración se pudo comprobar que si el pH y la dosis de coagulante son adecuadas, el proceso de coagulación-floculación-sedimentación puede ser útil para remover color, ya que con base en los resultados mostrados en la tabla 32 la remoción de color fue óptima para el pH de 7.5 y una dosis de coagulante 15 mL/L.

Cuando el agua presenta concentraciones altas de coloides que confieren color, se recomienda que se provoque la formación de flóculos pequeños, que aunque no se sedimenten en el tiempo destinado, podrán retenerse en los medios filtrantes. Esto debido a que si se genera una formación rápida de flóculos grandes, estos se precipitarán en un periodo corto de tiempo y no se permitirá la floculación de los coloides de color y su posterior remoción en los filtros.

De los diez ensayos realizados se puede concluir que sin importar el filtro y las características de la muestra sintética, es posible obtener un efluente con color y turbiedad acorde a la normatividad, siempre y cuando se manipula el pH y se adicione la cantidad necesaria de coagulante.

El proceso completo de coagulación-floculación-sedimentación-filtración pudo representarse en el laboratorio. Dicha actividad conllevó un trabajo arduo, ya que la arena no presentaba las características solicitadas al proveedor, por lo que hizo necesario un proceso de depuración de tamices. Razón por la cual sólo se recomienda la consideración de un proveedor externo sólo si garantiza el tamaño solicitado.

Índice de tablas

	Anexos
Tabla 1 Características bacteriológicas	6
Tabla 2 Características organolépticas	7
Tabla 3 Características químicas	8
Tabla 4 Características radiactivas	8
Tabla 5 Tiempo de sedimentación de partículas coloidales	9
Tabla 6 Tipos de coagulación	17
Tabla 7 Estratos de grava	20
Tabla 8 Estratos de grava	20
Tabla 9 Características de los medios filtrantes	29
Tabla 10 Características de los filtros construidos	32
Tabla 11 Características granulométricas de la arena sílica	34
Tabla 12 Materiales pétreos comprados	36
Tabla 13 Densidad de arenas	39
Tabla 14 Materiales pétreos utilizados	41
Tabla 15 Resultados prueba I filtro de arena estratificada	49
Tabla 16 Resultados prueba I filtro de arena uniforme	49
Tabla 17 Resultados prueba II filtro de arena estratificada	52
Tabla 18 Resultados Prueba II filtro de arena uniforme	52
Tabla 19 Conformación de los diferentes estratos pétreos de ambos filtros	54
Tabla 20 Resultado agua con pintura textil filtro de arena	61
Tabla 21 Resultados agua con pintura textil filtro dual	61
Tabla 22 Resultados prueba 1 filtro de arena	66
Tabla 23 Resultados prueba 1 filtro de arena	66
Tabla 24 Prueba 2 parámetros de la muestra sintética	68
Tabla 25 Prueba 2 parámetros después de la prueba de jarras	68
Tabla 26 Prueba 2 resultados agua I- filtro de arena	68
Tabla 27 Prueba 2 resultados agua I- filtro dual	69
Tabla 28 Prueba 3 parámetros de la muestra sintética	70
Tabla 29 Prueba 3 parámetros después de la prueba de jarras	70
Tabla 30 Prueba 3 resultados agua I- filtro de arena	71

Tabla 31 Prueba 3 resultados agua I- filtro dual	71
Tabla 32 Prueba 4 dosis de coagulante para remover color	74
Tabla 33 Prueba 5 parámetros de la muestra sintética	76
Tabla 34 Prueba 5 parámetros después de la prueba de jarras	77
Tabla 35 Prueba 5 resultados agua I- filtro de arena	77
Tabla 36 Prueba 5 resultados agua I- filtro dual	78
Tabla 37 Prueba 6 parámetros de la muestra sintética	79
Tabla 38 Prueba 6 parámetros después de la prueba de jarras	79
Tabla 39 Prueba 6 resultados agua I- filtro de arena	80
Tabla 40 Prueba 6 resultados agua I- filtro dual	80
Tabla 41 Prueba 7 parámetros de la muestra sintética	82
Tabla 42 Prueba 7 parámetros después de la prueba de jarras	82
Tabla 43 Prueba 7 resultados agua I- filtro de arena	82
Tabla 44 Prueba 7 resultados agua I- filtro dual	83
Tabla 45 Prueba 8 parámetros de la muestra sintética	84
Tabla 46 Prueba 8 parámetros después de la prueba de jarras	84
Tabla 47 Prueba 8 resultados agua I- filtro de arena	85
Tabla 48 Prueba 8 resultados agua I- filtro dual	85
Tabla 49 Prueba 9 parámetros de la muestra sintética	87
Tabla 50 Prueba 9 parámetros después de la prueba de jarras	87
Tabla 51 Prueba 9 resultados agua I- filtro de arena	87
Tabla 52 Prueba 9 resultados agua I- filtro dual	88
Tabla 53 Prueba 10 parámetros de la muestra sintética	89
Tabla 54 Prueba 10 parámetros después de la prueba de jarras	89
Tabla 55 Prueba 10 resultados agua I- filtro de arena	90
Tabla 56 Prueba 10 resultados agua I- filtro dual	90
Tabla 57 Resultados de los 10 ensayos filtro de arena	92
Tabla 58 Resultados de los 10 ensayos filtro dual	92
Tabla 59 Tipos de agua a usar A	95
Tabla 60 Tipos de agua a usar B	96

Índice de imágenes

Imagen 1 Coagulación de coloides	13
Imagen 2 Formación de flóculos	14
Imagen 3 Efecto del polímero en la coagulación	14
Imagen 4 Zonas de coagulación	18
Imagen 5 Floculación de partículas	18
Imagen 6 Acciones hidrodinámicas	22
Imagen 7 Recipientes de filtros delgados	33
Imagen 8 Recipiente de filtro grueso	33
Imagen 9 Carbón activado	34
Imagen 10 Curva granulométrica de la arena requerida	35
Imagen 11 Traslado de material	36
Imagen 12 Almacenaje de material	37
Imagen 13 Arena en bandejas	38

Imagen 14 Máquina manual para agitar tamices	38
Imagen 15 Máquina eléctrica para agitar tamices	38
Imagen 16 Báscula analítica	39
Imagen 17 Colocación de la grava	41
Imagen 18 Colocación de la grava	41
Imagen 19 Colocación de la arena	42
Imagen 20 Colocación de arena	42
Imagen 21 Colocación de la arena	42
Imagen 22 Colocación de arena	42
Imagen 23 Filtros contruidos	43
Imagen 24 Gráfica coagulante vs turbiedad residual	45
Imagen 25 Espectrofotómetro HACH DR 2000	46
Imagen 26 Medidor de pH	46
Imagen 27 Reactivos para adicionar turbiedad al agua	46
Imagen 28 Turbidímetro o nefelómetro	47
Imagen 29 Mezcladora con píldora	47
Imagen 30 Equipo para la prueba de jarras	48
Imagen 31 Gráficas resultados prueba I	50
Imagen 32 Gráficas resultados prueba II	50
Imagen 33 Muestra sintética antes y después de C-F-S y después de filtro	51
Imagen 34 Gráfica resultados prueba II	53
Imagen 35 Gráfica resultados prueba II	53
Imagen 36 Preparación del carbón activado	54
Imagen 37 Colocación de carbón activado	55
Imagen 38 Diagrama de los estratos de los filtros	55
Imagen 39 Filtro simple y dual	56
Imagen 40 Espectrofotómetro en desuso	58
Imagen 41 Colorímetro de discos	58
Imagen 42 Ensayo a muestra sintética con colorante textil	60
Imagen 43 Gráfica resultados ensayo con pintura textil	62
Imagen 44 Gráfica resultados ensayo con pintura textil	62
Imagen 45 Resultados ensayo con colorante artificial	63
Imagen 46 Distintas plantas comestibles para adicionar color al agua	64
Imagen 47 Diferentes dosis de yerbabuena	65
Imagen 48 Gráfica resultados prueba 1	67
Imagen 49 Gráfica resultados prueba 1	67
Imagen 50 Gráfica resultados prueba 2	69
Imagen 51 Gráfica resultados prueba 2	70
Imagen 52 Gráfica resultados prueba 3	72
Imagen 53 Gráfica resultados prueba 3	72
Imagen 54 Agua únicamente con color	73
Imagen 55 Gráfica resultados prueba 4	75
Imagen 56 Gráfica resultados prueba 4	75
Imagen 57 Aspecto de la muestra sintética prueba 5	77
Imagen 58 Gráfica resultados prueba 5	78
Imagen 59 Gráfica resultados prueba 5	79

Imagen 60 Gráfica resultados prueba 6	81
Imagen 61 Gráfica resultados prueba 6	81
Imagen 62 Gráfica resultados prueba 7	83
Imagen 63 Gráfica resultados prueba 7	84
Imagen 64 Gráfica resultados prueba 8	86
Imagen 65 Gráfica resultados prueba 8	86
Imagen 66 Gráfica resultados prueba 9	88
Imagen 67 Gráfica resultados prueba 9	89
Imagen 68 Gráfica resultados prueba 10	91
Imagen 69 Gráfica resultados prueba 10	91
Imagen 70 Gráfica resultados remoción de turbiedad filtro de arena	93
Imagen 71 Gráfica resultados remoción de color filtro de arena	93
Imagen 72 Gráfica resultados remoción de turbiedad filtro dual	94
Imagen 73 Gráfica resultados remoción de color filtro dual	94

Bibliografía

- Comisión Nacional del Agua, 2007, Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento; México D.F., Secretaria del medio ambiente y recursos naturales. Vol. 1.
- Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994; Salud ambiental, Agua para uso y consumo humano, límites permisibles y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. Secretaria de Salud, México D.F.
(Disponible en: <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/127ssa14.html>)
- Maldonado Yactaco, Víctor., Filtración; Capítulo 9.
(Disponible en: <http://www.bvsde.opsoms.org/bvsatr/fulltext/tratamiento/manualI/tomoll/nueve.pdf>).
- Maldonado Yactaco, Víctor., Filtración; Capítulo 5.
(Disponible en: <http://www.bvsde.opsoms.org/bvsatr/fulltext/tratamiento/manualI/tomoll/cinco.pdf>).
- Barrenechea Martel, Ada., Plantas de tratamiento de agua para consumo humano: filtración rápida; Lima, Perú, CEPIS, 2004.
- Crittenden, John. , 2012, Water treatment principles and desing; Hoboken, New Jersey, third edition, edited by MWH.
- Arboleda Valencia, Jorge A. , 1973, Teoría diseño y control de los procesos de clarificación del agua; Lima, Perú, CEPIS.

- Andía Cárdenas, Yolanda., Tratamiento de agua: coagulación y floculación; Lima, Perú, 2000.
(Disponible en: <http://www.frm.utn.edu.ar/archivos/civil/Sanitaria/Coagulaci%C3%B3n%20y%20Floculaci%C3%B3n%20del%20Agua%20Potable.pdf>).
- Aguas Sanitarias de Pereira, Características del agua tratada, Pereira, Colombia, 2014
(Disponible en: <http://www.aguasanitarias.com/generalidades.html>).
- Andía Cárdenas, Yolanda., Tratamiento de agua: coagulación y floculación; Lima, Perú, 2000.
(Disponible en: <http://www.frm.utn.edu.ar/archivos/civil/Sanitaria/Coagulaci%C3%B3n%20y%20Floculaci%C3%B3n%20del%20Agua%20Potable.pdf>).
- Carbotecnia, Carbón activado, Guadalajara, México; 2014.
(Disponible en: <http://www.carbotecnia.info/encyclopedia/que-es-el-carbon-activado/>).
- Msc, Yrwin., Informe de prácticas sobre método de jarras; Lima, Perú; 2011
Disponible en: <http://es.scribd.com/doc/72329741/METODO-DE-JARRAS>).
- Guía para diseño de sistemas de tratamiento de filtración en múltiples etapas OPS; CEPIS. Unidad de Apoyo Técnico para el Saneamiento Básico del Área Rural. Lima; OPS; 2005.
- Cánepa de Vargas, Lidia; Maldonado Yactaco, Víctor; Barrenechea Martel, Ada; Aurazo de Zumaeta, Margarita. CEPIS. Lima; CEPIS; 2004.
- SEDAPAL, Tratamiento de agua: coagulación y floculación; Evaluación de plantas y desarrollo tecnológico.
(disponible en: <http://www.elaguapotable.com/coagulacion-floculacion.htm>).
- Pérez de la Cruz, Francisco Javier., Abastecimiento de aguas, Cartagena, Colombia.
(Disponible en: http://ocw.bib.upct.es/pluginfile.php/6019/mod_resource/content/1/Tema_06_COAGULACION_Y_FLOCULACION.pdf).
- Vázquez González, Alba Beatriz., Manual de Prácticas de Laboratorio de Ingeniería Sanitaria y Ambiental; México D.F., México, PAPIMA, 2006.

- Romero Rojas, Jairo., Potabilización del Agua; México D.F., México, Alfa Omega Grupo Editor S.A. de C.V., 1990. Tercera edición.