

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY

CAMPUS MONTERREY

PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERIA



**TRATAMIENTO DE AGUAS GRISES MEDIANTE UN SISTEMA
HÍBRIDO CON MEMBRANAS**

TESIS

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO
ACADÉMICO DE**

MAESTRO EN CIENCIAS

CON ESPECIALIDAD EN SISTEMAS AMBIENTALES

LUCERO BELÉN SUÁREZ PÉREZ

DICIEMBRE DE 2010

Agradecimientos

A dios por darme la dicha de completar esta etapa.

A mi familia por su apoyo en todo momento de mi vida, por ayudarme a hacer posible todas mis metas y por darme el amor y cariño que me impulsa a seguir adelante.

Al Dr. Miguel Ángel López por su paciencia, consejos y conocimientos brindados que me guiaron para realizar una investigación de calidad.

Al Centro del Agua para América Latina y el Caribe y al CONACYT por el apoyo brindado para completar esta parte de mi formación académica.

A Mario y Eloísa que me motivaron a estudiar esta maestría, a Naro, Pintos, Abril, Chio, Elsa, Sil, Carlos Pablo e Isaac que a pesar de estar lejos no dejaron de apoyarme y alegrarme con su amistad.

Y a los que presenciaron el esfuerzo y que con su compañía aligeraron el trabajo realizado:
Eliud, Efi, Kika, Adrián, Rodrigo, Pilla, Blanca, Meli, Mich, Soni, Alvaro y Tavo.

A los practicantes que ayudaron enormemente en la realización de esta investigación.

Dedicatoria

A mis padres y hermanos que han estado a mi lado siempre, no hay palabras que describan cuanto me motiva alegrarles con mis logros.

A mis sobrinitos Tito, Titi, Hugui y Alanicho que son la alegría más grande en mi vida y que pueden cambiar cualquier momento de estrés en felicidad.

Resumen

En la actualidad, por la escasez, el reuso del agua residual de las actividades diarias se ha convertido en una fuente alternativa de abastecimiento del recurso hídrico, por esto el presente proyecto propone la implementación de un sistema híbrido con membranas que trate el agua gris generada en el lavado de ropa y mejore el funcionamiento de las membranas con la finalidad de reutilizar el efluente en actividades no potables. Para alargar el tiempo de vida y mejorar el desempeño de las membranas se evaluaron dos pre-tratamientos: coagulación-floculación (CF) y pre-filtración (PF) con materiales de uso común monitoreando la remoción de sólidos suspendidos totales (SST), sólidos disueltos totales (SDT) y turbidez. Se evaluaron dos tipos de agua gris, una que contenía detergente en polvo y otra con detergente líquido.

Se encontró que la CF remueve SST con eficiencias superiores al 50%; sin embargo, como producto secundario se genera una gran cantidad de lodo que debe disponerse de manera adecuada, al mismo tiempo implica altos costos de inversión, operación y mantenimiento. La PF con fieltro y popelina bondeada redujo hasta en un 26% la concentración de SST y 30% la turbidez en agua gris; además, no generó residuos secundarios, se puede adaptar fácilmente a la lavadora, los materiales son de fácil adquisición y tienen un costo relativamente bajo. Para el sistema híbrido se utilizaron membranas de microfiltración (MF) y ultrafiltración (UF) en conjunto con la PF; se encontró que al utilizar las dos membranas se reduce del 90 al 95 % la presencia de SST y del 95 al 100% la turbidez. Al combinarlas con la PF la calidad del agua mejora del 2 al 5% y cumple con los límites permisibles de SST, coliformes fecales, huevos de helminto, materia flotante y metales pesados normados en la NOM-003-SEMARNAT-1996 para agua de reuso. Además, incrementa el flujo del permeado de 0.5 a 5 L/min, lo que indica menor obturación en la superficie de las membranas, de esta manera se puede alargar su vida útil. Si se utiliza solamente PF-MF se clarifica notablemente el agua gris (3 NTU), se cumple con los parámetros mencionados anteriormente a excepción de SST y aumenta el flujo hasta en 1 L/min.

Contenido

Resumen	i
Índice de figuras	v
Índice de tablas	vii
1. Introducción.....	10
2. Objetivos.....	14
2.1 Objetivo general	14
2.2 Objetivos Específicos	14
3. Marco Teórico	16
3.1 Características del agua gris.	16
3.2 Prácticas utilizadas en el tratamiento de agua gris.....	17
3.2.1. Tratamiento centralizado vs descentralizado	18
3.2.2. Sistemas híbridos.....	25
3.3 Normatividad en México en materia de disposición y reuso de aguas residuales.....	28
4. Metodología.....	32
4.1 Dispositivos experimentales.....	33
4.2 Caracterización del agua gris proveniente del lavado de ropa	35
4.3 Valoración de la coagulación – floculación (CF): Pre-tratamiento 1.....	37
4.3.1. Selección del coagulante	37
4.3.2. Determinación de los valores óptimos de coagulación-floculación.....	38
4.4 Evaluación de la pre-filtración (PF): Pre-tratamiento 2	39
4.5 Selección del pre-tratamiento más adecuado	41

4.6	Efecto del pre-tratamiento en el desempeño del sistema híbrido	42
5.	Resultados.....	44
5.1	Caracterización del agua gris	44
5.2	Valoración de la coagulación – floculación (CF): Pre-tratamiento 1.....	45
5.2.1.	Selección del coagulante	45
5.2.2.	Determinación de los valores óptimos de coagulación-floculación.....	46
5.3	Evaluación de pre-filtración (PF): Pre-tratamiento 2.	52
5.3.1	Utilización de materiales individuales.....	52
5.3.2	Utilización de materiales combinados	53
5.4	Selección del pre-tratamiento más adecuado	54
5.4.1	Criterios económicos	54
5.4.2	Criterios ambientales.....	55
5.5	Efecto del pre-tratamiento en el desempeño del sistema híbrido	56
5.5.1	Caso I: Agua gris que contiene detergente en polvo.	56
5.5.2	Caso II: Agua gris que contiene detergente líquido.	59
6.	Conclusiones y recomendaciones.....	63
6.1.	Conclusiones.....	63
6.2.	Recomendaciones.....	65
	Referencias.....	66
	Anexo I	73
	Determinación de las condiciones óptimas de Coagulación-Floculación.....	73
	Resultados en las pruebas de laboratorio.	73
	Anexo II.....	76
	Características de los detergentes utilizados	76

Anexo III	77
Características de los materiales filtrantes	77
Anexo IV	78
Análisis estadístico de los datos en coagulación – floculación.....	78

Índice de figuras

Figura 1. Clasificación del agua residual.....	10
Figura 2. Diagrama de flujo de una PTAR convencional.....	19
Figura 3. Tratamiento híbrido con Ósmosis Inversa y Pre-filtración.....	26
Figura 4. Sistema híbrido con coagulación/UF.....	27
Figura 5. Configuración de biorreactores con membranas (MBR).....	27
Figura 6. Metodología de la investigación.....	32
Figura 7. Equipo de Jarras.....	34
Figura 8. Equipo de membranas.....	34
Figura 9. Efecto de los coagulantes en el agua gris.....	46
Figura 10. Eficiencias en la variación de la dosis de coagulante con agua gris que contiene detergente en polvo.	47
Figura 11. Eficiencias en el cambio en floculación para el agua gris que contiene detergente en polvo.	48
Figura 12. Interacción entre la velocidad y tiempo de mezclado para el agua gris que contiene detergente en polvo.....	49
Figura 13. Eficiencias en la variación de la dosis de coagulante con agua gris que contiene detergente líquido.....	50
Figura 14. Eficiencias en el cambio en floculación para el agua gris que contiene detergente líquido.....	51
Figura 15. Interacción entre la velocidad y tiempo de mezclado para el agua gris que contiene detergente líquido.....	51
Figura 16. Eficiencias de los materiales filtrantes con agua gris que contiene detergente en polvo.....	52
Figura 17. Eficiencias de los materiales filtrantes con agua gris que contiene detergente líquido.....	53
Figura 18. Combinaciones de filtros con mejores eficiencias de remoción, agua gris que contiene detergente en polvo.....	53

Figura 19. Combinaciones de filtros con mejores eficiencias de remoción, agua gris que contiene detergente líquido.....	54
Figura 20. Eficiencias de tratamientos híbridos con membranas, detergente en polvo.	57
Figura 21. Flujo de permeado con y sin pre-tratamiento, detergente en polvo.	58
Figura 22. Agua gris y agua tratada con el sistema híbrido.....	58
Figura 23. Eficiencias de tratamientos híbridos con membranas, detergente líquido.....	60
Figura 24. Flujo de permeado con y sin pre-tratamiento, detergente líquido.	60
Figura 25. Tendencia de pH y conductividad en los cambios de floculación, detergente en polvo.	73
Figura 26. Tendencia de pH y conductividad en los cambios de floculación, detergente líquido.....	75
Figura 27. Gráficas de residuos para el porcentaje de SST removidos con todos los datos.	79
Figura 28. Gráficas de interacción para los dos detergentes.	80
Figura 29. Gráfica de efectos principales para el porcentaje de SST removidos.	81
Figura 30. Gráfica de interacción detergente – velocidad – tiempo en el porcentaje de remoción de SST.	82

Índice de tablas

Tabla 1. Constituyentes del agua gris.....	16
Tabla 2. Membranas de Filtración y sus aplicaciones en el tratamiento de agua.	22
Tabla 3. Ventajas y desventajas de las membranas de microfiltración y ultrafiltración.	23
Tabla 4. Características de materiales selectos de membranas.	24
Tabla 5. Normas aplicadas en la determinación de la calidad del agua.....	30
Tabla 6. Límites Máximos Permisibles de Contaminantes en la NOM-003-ECOL-1997.	29
Tabla 7. Límites máximos permisibles para metales pesados y cianuros en la NOM-001-ECOL-1996.	30
Tabla 8. Equipos utilizados por etapa de investigación.	33
Tabla 9. Materiales utilizados por etapa de investigación.	33
Tabla 10. Parámetros de calidad cuantificados.....	35
Tabla 11. Condiciones para el muestreo de agua gris.....	36
Tabla 12. Condiciones en la prueba de jarras para seleccionar un coagulante.	37
Tabla 13. Dosis experimentadas de sulfato de aluminio y cloruro férrico.....	37
Tabla 14. Condiciones para determinar los valores óptimos de CF.	38
Tabla 15. Variaciones en floculación.	38
Tabla 16. Materiales combinados para pre-filtración del agua gris.....	39
Tabla 17. Materiales utilizados para la pre-filtración.....	40
Tabla 18. Combinaciones de membranas evaluadas.	42
Tabla 19. Caracterización fisicoquímica del agua gris del lavado de ropa.	44
Tabla 20. Caracterización de metales pesados en el agua gris con detergente en polvo. ..	45
Tabla 21. Valores óptimos para CF del agua gris que contiene detergente en polvo.	48
Tabla 22. Valores óptimos para CF con agua gris que contiene detergente líquido.	51
Tabla 23. Costo del material para un sistema de coagulación-floculación.....	55
Tabla 24. Costo de los materiales utilizados para pre-filtración.....	55
Tabla 25. Concentración media de lodos a diferentes velocidades y tiempos de floculación (mg/L).	55

Tabla 26. Lodos generados en un lavado de ropa habitual.....	56
Tabla 27. Calidad del efluente tratado con agua gris que contiene detergente en polvo... 59	
Tabla 28. Calidad del efluente tratado con agua gris que contiene detergente líquido.	61
Tabla 29. Efecto de la dosis de coagulante en las eficiencias de remoción (Detergente en polvo).....	73
Tabla 30. Efecto de la dosis de coagulante en las eficiencias de remoción (Detergente líquido).....	74
Tabla 31. Efecto de la concentración de detergente líquido en las eficiencias de remoción de turbidez.....	74
Tabla 32. Ingredientes activos en la formulación del detergente en polvo Viva®.....	76
Tabla 33. Ingredientes activos en la fórmula del detergente líquido Mas color®.	76
Tabla 34. Características y costos de los materiales filtrantes utilizados.	77
Tabla 35. Porcentajes de remoción en SST a diferentes velocidades y tiempos de mezclado con tres réplicas.....	78
Tabla 36. Condiciones óptimas de operación para coagulación – floculación.	85

1. Introducción

1. Introducción

La disponibilidad de agua en México ha disminuido en un 75 % en menos de 60 años (INEGI, 2009), esto se debe en parte a diversos factores globales como el incremento en la temperatura del planeta, cambios en la disponibilidad del agua y el aumento poblacional. A nivel local, otros factores como la escasa inversión en infraestructura, falta de pago por el servicio y depreciación ejercen aún más presión sobre el recurso.

Debido a la ausencia de otras fuentes de abastecimiento y para hacer énfasis en el desarrollo sustentable de las últimas décadas, la reutilización de aguas residuales está cobrando importancia en el mundo como fuente alternativa, permitiendo tanto el ahorro de agua, como el ahorro de recursos económicos. Para su mejor tratamiento, el agua residual urbana idealmente se puede dividir como se muestra en la Figura 1.

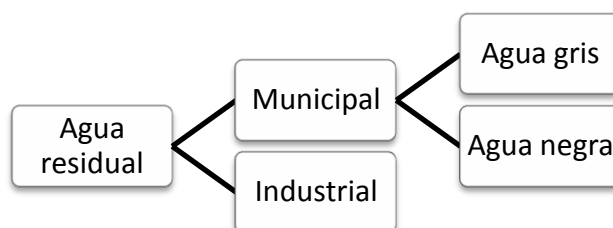


Figura 1. Clasificación del agua residual urbana.

En México, el agua industrial se reutiliza en mayor medida debido al alto costo de suministro, ocupando el segundo lugar en reuso después de la agricultura. La municipal se desecha en los sistemas de alcantarillado urbano, hasta que es vertida a los cuerpos receptores de agua de propiedad nacional o llega a una de las 1,833 plantas de tratamiento de aguas residuales municipales en operación, donde se trata solamente el 40% de lo recolectado; como comparación, el agua residual industrial cuenta con 2,082 plantas en operación donde se trata el 18% del suministro (CONAGUA, 2010).

Sin embargo, la demanda doméstica de agua en los países industrializados constituye del 30 al 60 % de la demanda de agua municipal, de los cuales, del 60 al 70 % se transforma en agua gris y el resto se consume en las descargas del sanitario (Friedler et al. 2005). Se

denomina agua gris a la que proviene de las operaciones domésticas de lavado; incluye el agua del lavamanos, cocina y lavaplatos, pero específicamente excluye el agua negra del sanitario y mingitorios. Algunas veces se subdivide al agua gris considerado únicamente la que se descarga en los lavamanos, ducha y baños excluyendo fuentes de grasa u otras sustancias altamente contaminantes (Jefferson, Judd, & Diaper, 2001). Además, contiene típicamente altas concentraciones de sales y minerales provenientes de los detergentes y jabones (D. Letterman, 1999).

El tratamiento del agua gris es más sencillo y económico que el tratamiento de agua residual mezclada debido a las diferencias en su composición (Masi, 2009); por lo tanto, el tratamiento óptimo del agua gris debe hacerse sin mezclar con el agua negra y llevarse a cabo previo a su disposición final.

En las últimas décadas se ha promovido el tratamiento del agua gris para utilizarse como suministro en actividades no potables, como en la descarga y limpieza del sanitario, en el lavado de autos, pisos y ropa, en irrigación o hasta en actividades industriales, reduciendo la cantidad de contaminantes liberados al ambiente, disminuyendo el costo por abastecimiento y los efectos negativos a la salud. Por lo tanto, es importante fomentar la implementación de sistemas descentralizados de tratamiento y reuso para minimizar el volumen de agua residual doméstica.

En esta investigación se propone una estrategia para disminuir la generación de agua gris doméstica proveniente de la lavadora. Al lograrlo, se asegura el ahorro de aproximadamente 6 al 9% de la generación de agua gris por habitante (Ahmad et al., 2008). Para ello se evalúa el comportamiento de un sistema híbrido con membranas que mejora la eficiencia de las mismas y permite obtener agua tratada con calidad suficiente para ser reutilizada en usos no potables.

El sistema híbrido se integra por un pre-filtro a base de materiales de uso común y un sistema de membranas. El pre-filtro reduce la cantidad de sólidos suspendidos totales (SST) presentes en el agua gris, lo cual contribuye a la disminución del taponamiento del sistema de membranas, alargando el tiempo de vida de las mismas y aumentando la

producción de agua de reuso que cumple con los requerimientos establecidos en la NOM-003-ECOL-1997.

Esta contribución ofrece una alternativa innovadora que puede llevarse a cabo a nivel local, en un conjunto habitacional o bien en edificios eliminando la necesidad de separar grandes redes de drenaje y permitiendo reutilizar el agua en el abasto de la misma; además evita el contacto de surfactantes con el suelo, así como las consecuencias ambientales que esto ocasiona.

2. Objetivos

2. Objetivos

2.1 *Objetivo general*

Evaluar la eficiencia de un sistema híbrido con membranas para el tratamiento de agua gris proveniente del lavado de ropa y su reuso en usos domésticos no potables. Asimismo, proponer el diseño conceptual del sistema híbrido.

2.2 *Objetivos Específicos*

- a) Caracterizar el agua gris proveniente del lavado de ropa cuando se utilizan detergentes líquido y en polvo.
- b) Evaluar el proceso de coagulación – floculación en la remoción de sólidos suspendidos totales (SST), sólidos disueltos totales (SDT) y turbidez del agua gris.
- c) Evaluar la eficiencia de la pre-filtración con materiales de uso común para la remoción de sólidos suspendidos totales (SST), sólidos disueltos totales (SDT) y turbidez del agua gris. Asimismo, establecer la configuración más eficiente del filtro o filtros.
- d) Seleccionar el pre-tratamiento más adecuado.
- e) Evaluar el efecto del pre-tratamiento en el desempeño de membranas de microfiltración y ultrafiltración.

3. Marco Teórico

3. Marco Teórico

3.1 Características del agua gris.

El agua gris proviene de las operaciones de lavado domésticas, incluye el agua del lavamanos, cocina y lavaplatos pero específicamente excluye el agua negra del sanitario y mingitorios. Algunas veces se subdivide al agua gris considerado únicamente la que se descarga en los lavamanos, ducha y baños pero excluyendo fuentes de grasa u otras sustancias altamente contaminantes (Jefferson et al., 2001)

Las características de esta agua dependen en su mayoría de las actividades realizadas en la casa, de la calidad del agua suministrada y de los sistemas de distribución de agua potable y de colección de agua gris. Consecuentemente, las características pueden variar de una fuente a otra. En un profundo estudio realizado en Australia por Nghiem y su equipo (2006) determinaron los constituyentes principales del agua gris y los rangos de variabilidad en cada parámetro. Los resultados se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Constituyentes del agua gris.

Parámetro	Agua residual doméstica	Agua gris
1 pH	5.9 – 7.7	5 – 10.9
2 Sólidos Totales, mg/L	200 – 1200	113 – 2410
3 Sólidos Disueltos Totales, mg/L	100 – 850	137 – 1260
4 Sólidos Suspendidos, mg/L	24 – 608	3.1 – 330
5 DBO ₅ , mg/L	28 – 400	33 – 1460
6 DQO, mg/L	45 – 1000	3.8 – 1380
7 Nitrógeno Total, mg _{Total} de N/L	20 – 117	0.28 – 74
8 Fósforo, mg _{Total} de P/L	3.2 – 30	0.0062 – 74
9 Calcio, mg _{Total} de Ca/L	1.1 – 200	3.6 – 200

Fuente: Adaptado de Nghiem et al., 2006.

El análisis de la literatura revela que el agua gris es altamente variable en la concentración de materia orgánica y la razón DQO/DBO es elevada (Jefferson et al., 2004). En el caso de otras variables como boro y surfactantes, el agua gris puede incluso ser de peor calidad que el agua residual (Gross et al., 2005). Sin embargo, típicamente contiene

considerablemente menos patógenos, por lo tanto es más conveniente (y socialmente más aceptada) para el reuso en las viviendas.

El agua gris que proviene de la lavadora aporta un gran volumen a los sistemas de alcantarillado y arrastra un alto contenido de contaminantes y detergentes. En un lavado habitual se puede generar un volumen de hasta 180 L por carga de ropa ingresada, además de la cantidad de detergente y suciedad que se desprende en el proceso. Generalmente, al mezclarse todos los efluentes de agua gris, la concentración de detergentes disminuye, facilitando su tratamiento.

No obstante, los detergentes contienen surfactantes que aportan la mayor concentración de químicos orgánicos en el agua residual municipal (Abu-Zreig et al., 2003) estas sustancias en soluciones acuosas tienden a acumularse en la interfase líquido/gas o sólido/líquido, incrementando la distancia entre las moléculas de agua y ocasionando reducción en la tensión superficial del agua (Kuhnt, 1993).

Asimismo se ha documentado que los surfactantes tienen un efecto en el ascenso capilar del suelo. La acumulación de surfactantes en la tierra, provenientes de la reutilización de agua gris, pueden formar suelos repelentes al agua, lo cual tiene un efecto significativo en la productividad de la agricultura y sustentabilidad ambiental (Shafran et al., 2005).

Por las razones antes mencionadas, se considera de gran importancia implementar el tratamiento del agua proveniente de la lavadora, así se garantiza el resguardo del suelo en prácticas de reuso de agua gris y el ahorro del recurso en las viviendas.

3.2 Prácticas utilizadas en el tratamiento de agua gris

Para lograr el proceso de limpieza se han utilizado diferentes técnicas, entre ellas destacan la construcción de humedales, uso de procesos de lodos activados, tratamientos aeróbicos, reactores por lotes, etcétera. Comúnmente un proceso va ligado a otro en los sistemas centralizados de tratamiento. Sin embargo, también se han implementado

sistemas descentralizados con algunas técnicas modernas como son el uso de membranas de microfiltración (MF), ultrafiltración (UF), nanofiltración (NF) y ósmosis inversa (OI), esta última permite incluso la reducción del contenido iónico.

Cada tratamiento ofrece ventajas ambientales, económicas y sociales, sin embargo, para elegir el método más adecuado se deben tomar en cuenta las características del agua residual, las condiciones de operación del proceso, así como el impacto negativo que puede causar al medio, con la finalidad de tener el rendimiento máximo del sistema. Algunos estudios han demostrado que el agua de reuso tiene casi el mismo precio que el agua fresca, e incluso en determinadas comunidades europeas resulta menor (Gual et al., 2008). De esta manera, se potencializa la implementación de estas técnicas.

3.2.1. Tratamiento centralizado vs descentralizado

Se le denomina tratamiento centralizado al que se lleva a cabo en Plantas de Tratamiento de Agua Residual (PTAR), esto se debe a que el agua residual de una comunidad o conjunto de comunidades se recupera en un solo sitio para el tratamiento y por lo tanto, se crea una mezcla de agua gris, agua negra y agua de lluvia. En la Figura 2 se muestra un diagrama de los tratamientos generales utilizados en los sistemas centralizados habituales. El uso de tratamientos centralizados en la actualidad se encuentra bajo críticas principalmente por el alto costo de instalación, mantenimiento y el costo de construcción de drenaje para su transporte (Lettinga et al., 2001).

Generalmente la industria es el sector que opta por centralizar las tecnologías de tratamiento debido a las economías de escala y los costos de construcción; desde el punto de vista financiero resulta un proceso más eficiente con amplias instalaciones. Estas industrias incluyen la generación de energía eléctrica, fundición de acero, manufactura automotriz, entre otras. Asimismo, otros sectores como edificios de viviendas, calentamiento de agua, redes computacionales, agro-negocios y servicios alimentarios operan utilizando tecnologías descentralizadas (Norton & Weber Jr., 2006).

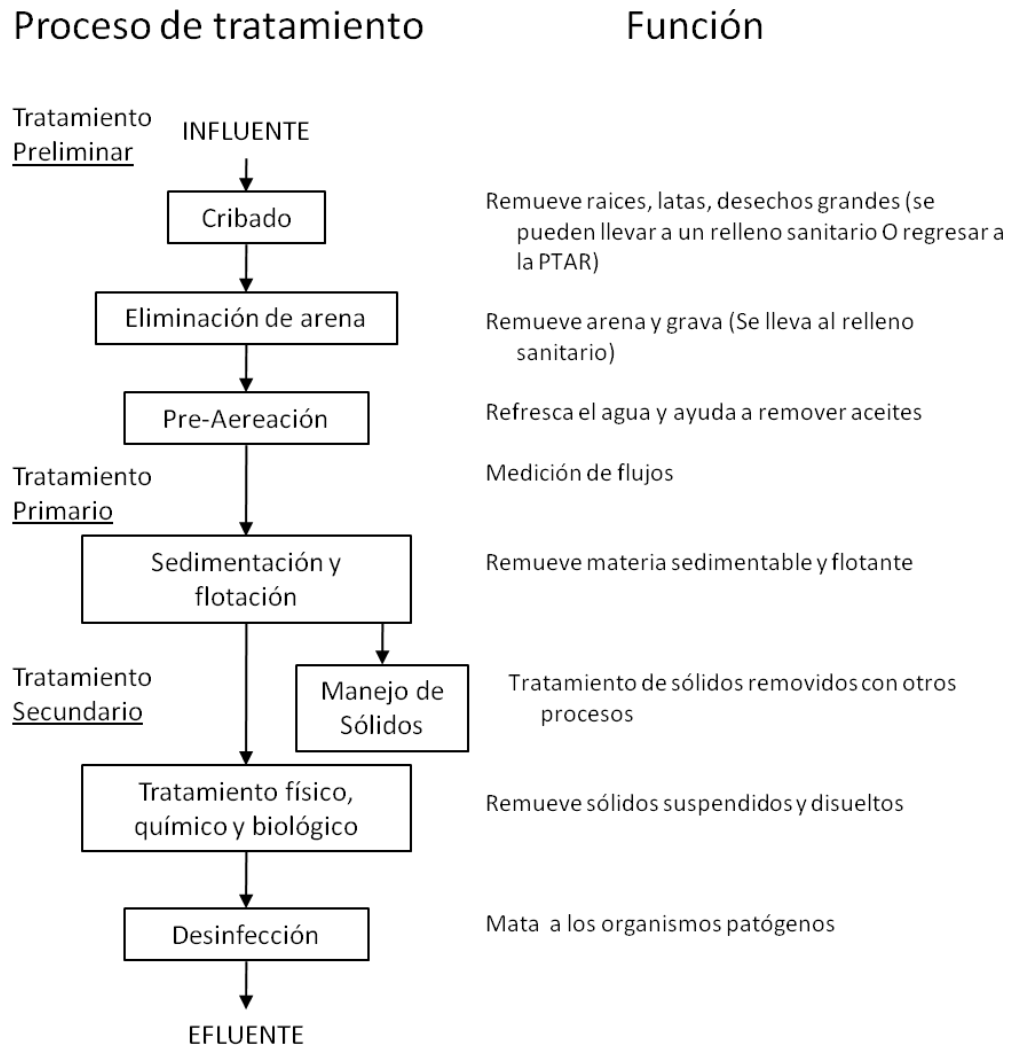


Figura 2. Diagrama de flujo de una PTAR convencional.
 FUENTE: Tomado de Kerri et al., 2008.

En los países menos desarrollados, existe una creciente demanda por sistemas integrados de saneamiento descentralizado que proveen la oportunidad de guardar y reutilizar los recursos hídricos. Cabe aclarar que el tratamiento descentralizado no significa que sean sistemas a pequeña escala, supone la redirección de los ciclos de agua y nutrientes dentro de la comunidad y esto aún se puede realizar utilizando sistemas relativamente grandes. Tampoco son de baja tecnología, sin embargo las partes centrales del sistema son de baja tecnología, robustas y sostenibles (Lettinga et al., 2001).

Los sistemas de tratamiento descentralizado existen en diferentes partes del mundo, específicamente en áreas rurales, consisten en varias instalaciones pequeñas de tratamiento de agua diseñadas y construidas en la zona (Wilderer, 2001).

a) Coagulación – Floculación

Este proceso consiste en aglomerar los sólidos en suspensión para formar cuerpos de mayor tamaño. El proceso de coagulación se refiere a la adición de una sustancia coagulante al agua, la cual facilita la adherencia de las partículas sólidas al neutralizar las cargas superficiales negativas que las mantienen separadas. La floculación, que ocurre de manera casi simultánea, se refiere a la agitación lenta de la mezcla coagulante-agua para inducir choques entre las partículas y que éstas se adhieran unas a otras para formar grumos o “flóculos” más grandes y pesados que se pueden eliminar con mayor facilidad en el sedimentador.

La efectividad del proceso de coagulación en la remoción de materia orgánica varía de acuerdo a la naturaleza de la materia (peso molecular, densidad de carga, naturaleza hidrofóbica y carga), a las características fisicoquímicas del agua y a las condiciones de operación, así como a la intensidad de mezclado inicial y la duración del mismo. Las condiciones iniciales de mezclado son críticas en la coagulación, debido a que la dispersión rápida y uniforme de coagulantes metálicos es esencial para la formación de productos con carga neutral (Letterman et al., 1999).

Los agentes coagulantes más utilizados son sales de aluminio y fierro. Las de aluminio incluyen alúmina, aluminato de sodio y varios productos preparados comercialmente como clorohidratos de aluminio. Todas las sales tienen características ácidas que modifican el pH después de su adición. La coagulación óptima con alúmina ocurre típicamente en un rango de pH entre 6 y 7, aunque se han observado ligeras desviaciones de esta región, bajo ciertas condiciones. En el caso del sulfato y cloruro férrico, el

comportamiento es más específico, por lo tanto el control de pH es muy importante para resultados exitosos con este coagulante (Budd et al., 2004).

A pesar de las ventajas que ofrece la coagulación-floculación, es complicado llevar a cabo la extracción y disposición final de lodos a nivel doméstico, así que se deben evaluar otras técnicas de separación de sólidos y comparar las ventajas y desventajas de cada una.

b) Uso de Membranas

El uso de membranas de filtración inició en 1950 a nivel laboratorio. Más tarde se utilizaron para reemplazar la pasteurización de bebidas sin embargo, fue hasta mediados de 1980 cuando se convirtió en un método eficiente debido a la implementación de membranas lavables-reutilizables por investigadores australianos y franceses (Crittenden et al., 2005). Desde entonces se han utilizado ampliamente ya que tienen consumo de energía relativamente bajo y son competitivas económicamente con las técnicas convencionales.

El principio de operación es que la membrana actúa como un filtro selectivo que permite el paso del agua y/o ciertas sustancias, mientras que retiene los sólidos suspendidos y otros compuestos. Su limitante principal es el tamaño de las partículas a separar. Cuando se filtran partículas de 0.01 a 10 micrómetros de diámetro, las partículas de mayor peso molecular tienden a bloquear la superficie de la membrana, causando taponamiento y contaminación de los materiales de soporte, lo cual disminuye el flujo de permeado y aumenta el requerimiento energético del sistema.

Este problema ocasiona que el uso de membranas para el tratamiento del agua descargada por la lavadora deba ser precedido por un tratamiento primario, debido al alto contenido de sólidos, pelusa y cabello presentes en el agua. Sin embargo, se cuenta con la ventaja que los blanqueadores comunes domésticos son efectivos para limpiar membranas, lo cual facilita el mantenimiento de este sistema descentralizado (Nghiem et al., 2006).

Actualmente existen diferentes tipos de membranas, cada una con una función específica. En la Tabla 2 se describen las operaciones unitarias típicas de las membranas en el tratamiento de agua y en la Tabla 3 se muestran las ventajas y desventajas en el uso de algunas de ellas.

Tabla 2. Membranas de filtración y sus aplicaciones en el tratamiento de agua.

Tipo de membrana	Descripción	Aplicación en el tratamiento de agua
Microfiltración	Se utiliza para la remoción de materia coloidal por medio de presión (0.1 a 1 μm)	Para remover turbidez, bacterias y protozoarios como <i>Giardia</i> y <i>Cryptosporidium</i> .
Ultrafiltración	Utilizada para remover partículas inferiores a 0.01 a 0.03 μm por exclusión.	Para remover turbidez, algunos virus, bacterias y protozoarios como <i>Giardia</i> y <i>Cryptosporidium</i>
Nanofiltración	Es una membrana de alta presión utilizada para remover partículas de 0.001 a 0.01 μm , por exclusión.	Para producir agua potable a partir de agua de mar o salobre; en ablandamiento de agua; para remover contaminantes disueltos como pesticidas y productos secundarios de la desinfección.
Ósmosis Inversa	Es una membrana de alta presión utilizada para remover partículas de 0.0001 a 0.005 μm por solución/difusión y exclusión.	Para producir agua potable a partir de agua de mar o salobre; en ablandamiento de agua; para remover contaminantes disueltos como pesticidas y productos secundarios de la desinfección así como hormonas y contenido iónico.

Fuente: Crittenden et al., 2005.

Aunque los avances en la fabricación de estos materiales continúan, la polarización y el taponamiento siguen siendo problemas importantes en los procesos de membranas utilizados para producir agua potable a partir de agua de mar o de cuerpos de agua superficial (Sablani et al., 2001) (Goosen et al., 2005).

Tabla 3. Ventajas y desventajas de las membranas de microfiltración y ultrafiltración.

Microfiltración
<p>Ventajas</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tienen un tamaño de poro relativamente grande, se emplean para remover turbidez, microorganismos, partículas, bacterias, protozoarios y algas (Kabsch-Korbutowicz, 2005). • El diámetro de las membranas permite el tratamiento de aguas con alto contenido de sólidos y partículas grandes (Jacangelo & Noack, 2005). • Se pueden manejar altas velocidades (hasta 5 m/s) para controlar el taponamiento (Jacangelo & Noack, 2005). <p>Desventajas</p> <ul style="list-style-type: none"> • La gran cantidad de fibras en el módulo de la membrana puede dificultar la detección de pérdida de la integridad de la membrana (Jacangelo & Noack, 2005). • Las membranas de cerámica tubulares son más costosas por m² de filtrado comparado con otras configuraciones (Jacangelo & Noack, 2005).
Ultrafiltración
<p>Ventajas</p> <ul style="list-style-type: none"> • Puede remover lo mismo que la microfiltración, además de virus y fracciones de materia orgánica natural de alto peso molecular (Kabsch-Korbutowicz, 2005). • Puede eliminar las algas completamente (Liang et al., 2008). <p>Desventajas</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tiene serios problemas de taponamiento y remueve en pequeña medida los solutos disueltos orgánicos (Xiangli et al., 2008).

La modificación superficial para controlar la hidrofilia, la carga, rugosidad y porosidad pueden impactar dramáticamente el taponamiento (Gilron et al., 2001) (Kilduff et al., 2005). La configuración del módulo, geometría y diseño espacial también pueden impactarlo (Schwinge et al., 2004).

El taponamiento incrementa la caída de la presión trans-membrana necesaria para mantener la productividad del proceso o bien, si la diferencia de presiones se mantiene constante, esta productividad bajaría. El desarrollo de mejores recubrimientos anti-

incrustantes o estructuras de membranas podrían tener un impacto dramático en la economía del proceso, así como el diseño de nuevos módulos o modos de operación que reduzcan el taponamiento (Lipscomb, 2008).

Tabla 4. Características de materiales selectos de membranas.

Material de la membrana	Tipo	Hidrofobicidad	Tolerancia a la oxidación	Rango de pH	Resistencia al taponamiento/facilidad de limpieza
PVDF	MF/UF	Hidrofílica modificada	Muy alta	2 – 11	Excelente
PP	MF	Ligeramente hidrofóbica	Baja	2 – 13	Aceptable
Polietersulfona (PES)	UF	Muy hidrofílica	Alta	2 – 13	Muy buena
Polisulfona	UF	Hidrofílica modificada	Moderada	2 – 13	Buena
Acetato de Celulosa (CA)	UF	Naturalmente Hidrofílica	Moderada	5 – 8	Buena

FUENTE: Jacangelo & Noack, 2005.

En la Tabla 4 se muestran algunas de las características de las membranas existentes en el mercado. En ella se observa que las membranas de microfiltración tienen mayor resistencia al taponamiento que las de ultrafiltración, es por ello que se recomienda utilizarlas en conjunto para alargar el tiempo de vida útil del sistema de tratamiento.

Diversos estudios avalan el buen funcionamiento de membranas en el tratamiento de agua; por ejemplo, en Australia se realizaron estudios con ultrafiltración para el tratamiento del agua gris doméstica cuyos resultados indicaron que el uso de UF directamente para el reciclado de agua gris es prometedor (Nghiem et al., 2006). Sin embargo, la elevada carga orgánica del agua resulta en la polarización en la membrana (formación de una torta más gruesa) ocasionando obstrucción en sus paredes.

En otro caso, se utilizó ósmosis inversa para reutilizar el agua gris de un hotel en el suministro de los sanitarios (Gual et al., 2008). Sin embargo, el taponamiento de la membrana fue un problema importante. De hecho, este es un problema generalizado en las diferentes configuraciones de membranas, lo que ha llevado al desarrollo de sistemas que incluyan un pre-tratamiento para disminuir la concentración de sólidos suspendidos y materia orgánica antes de pasar por la membrana. Estas configuraciones se conocen como sistemas híbridos.

3.2.2. Sistemas híbridos

Con la experiencia adquirida en los últimos 30 años, vinculada a los resultados favorables en el uso de membranas, se desarrollaron sistemas que eliminan la problemática de taponamiento en la pared externa y al mismo tiempo maximizan el flujo de permeado y disminuyen el consumo de energía.

Un ejemplo de esto es el sistema híbrido desarrollado por Gual y su equipo (2008) en España, para reciclar el agua gris de un hotel y usarla para el suministro de los sanitarios. Este sistema utiliza ósmosis inversa como tratamiento principal y dos filtros primarios (nylon de 1mm de poro y filtro de arena) para la eliminación de sólidos (Figura 3). El agua tratada resultó segura y aceptable para los usuarios y económicamente redituable para el hotel. Esto último debido no solo a la disminución en el suministro de agua potable sino también al costo¹ de reuso el cual se calculó en 1.14 €/m³, cuando el precio del agua fresca en esa región oscila entre los 0.87 y 2.34 € dependiendo del consumo. Los únicos problemas se encontraron en el proceso de desinfección con hipoclorito de sodio, ya que durante el tratamiento se forman numerosos productos secundarios de desinfección.

¹ Tomando en cuenta el capital invertido anualizado y el costo anual de operación.

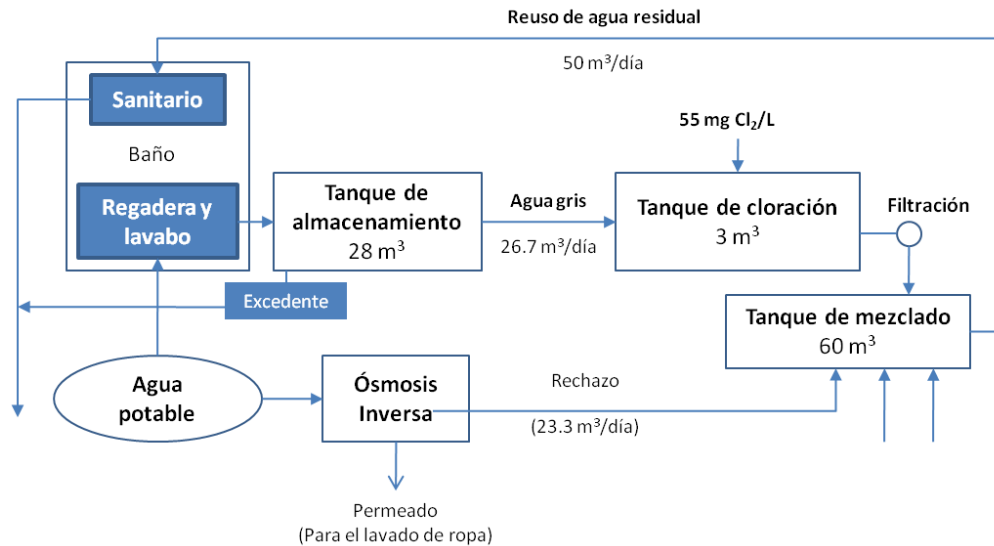


Figura 3. Tratamiento híbrido con Ósmosis Inversa y Pre-filtración.

FUENTE: Gual et al., 2008.

En otro caso reciente en el 2007, en Corea del Sur, se reutilizó agua gris mezclada con agua de lluvia y se trató con filtros y membranas de metal. En este estudio se concluyó que los filtros medios (previos a las membranas) no solo eliminan partículas, sino también nutrientes como nitrógeno y fosfatos, además de mejorar la eficiencia del proceso. Las membranas de metal tienen un poro más grande, por lo que el taponamiento es menor, sin embargo el porcentaje de eliminación de las partículas también disminuye (Kim et al., 2007).

Otros estudios también demuestran que la coagulación-floculación es un pre-tratamiento eficiente para evitar obstrucciones en la superficie de la membrana y al mismo tiempo eliminar microorganismos, turbidez y hasta un 30 a 40% de sólidos disueltos orgánicos (Park et al., 2002). Al igual que en España, Xia y su grupo (2007) utilizaron un sistema híbrido para tratar agua de baja calidad en China, como se muestra en la Figura 4. Este procedimiento combinó coagulación con UF, resultando en un incremento en la calidad del permeado y la reducción en el taponamiento de la membrana. Además mejoró el proceso de coagulación ya que la membrana completó la neutralización puesto que tuvo la excelente capacidad de remover partículas y coloides.

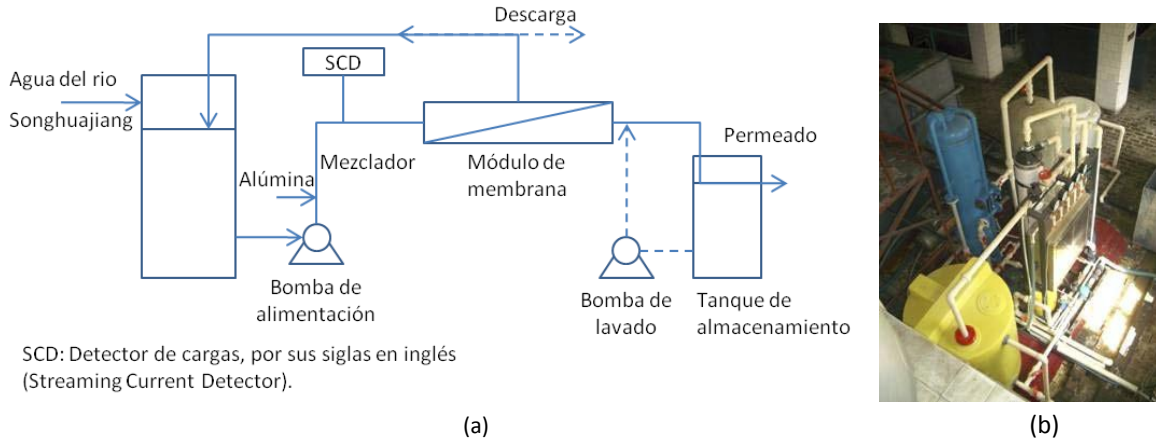


Figura 4. Sistema híbrido con coagulación/UF.

(a) Diagrama de flujo esquemático del sistema, (b) Planta piloto de 120 m³.

FUENTE: Xia et al., 2007.

Otro tratamiento híbrido ampliamente utilizado en Inglaterra para diferentes aplicaciones, es la combinación de separación por membrana y proceso de lodos activados, conocido como bioreactores de membrana (Le-Clech et al., 2003). Esta técnica es prometedora para la retención de biomasa sin la necesidad de clarificación secundaria ni tratamientos terciarios como filtración con arena. El proceso puede tener dos configuraciones, como se muestra en la Figura 5.

Este sistema ofrece la ventaja de alcanzar altos porcentajes de eliminación en el caso de los parámetros microbiológicos, como coliformes totales, coliformes fecales e incluso bacteriófagos (Jefferson et al., 2006).

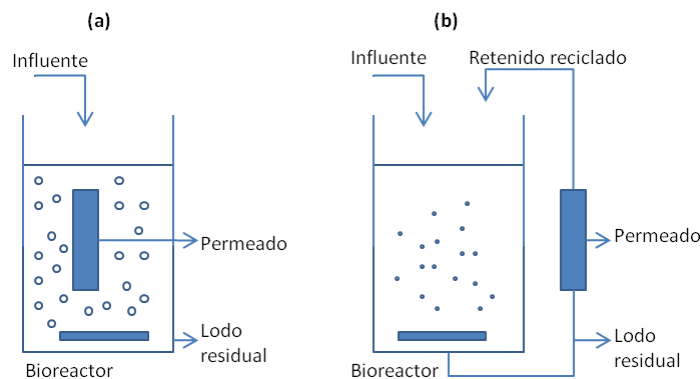


Figura 5. Configuración de biorreactores con membranas (MBR).

(a) MBR sumergido, (b) Configuración de salida lateral.

FUENTE: Jefferson y otros, 2006.

Los sistemas híbridos modernos se enfocan en el tratamiento del agua gris en conjunto, para edificios, hoteles o unidades habitacionales con equipos relativamente sencillos, pero no operables individualmente en el hogar.

3.3 Normatividad en México en materia de disposición y reuso de aguas residuales

El tratamiento, reuso y disposición final de aguas grises no está reglamentado en México; sin embargo, la legislación ambiental en México dispone de Normas Oficiales Mexicanas (NOM) expedidas por SEMARNAT que reglamentan las descargas de contaminantes a los sistemas de alcantarillado y a los cuerpos receptores de agua. Eventualmente estas normas pueden aplicarse para el reuso y disposición final de las aguas grises domésticas. De igual manera, se cuenta con los métodos de análisis oficiales en las Normas Mexicanas (NMX) para la valoración de la calidad del agua. Las normas en cuestión son:

- NOM-001-ECOL-1996, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.
- NOM-002-ECOL-1996, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal.
- NOM-003-ECOL-1997, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales que se reusen en servicios al público.
- NOM-004-SEMARNAT-2002, Protección ambiental.- Lodos y biosólidos.- Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final.

Las normas NOM-001-ECOL-1996 y NOM-002-ECOL-1996 se pueden tomar en cuenta para evaluar el reuso y la disposición del agua gris, ya que en casos altamente concentrados como el de la lavadora se sobrepasan los límites máximos permisibles si no se diluyen con el agua doméstica restante. Sin embargo, para el objetivo de esta investigación (reuso en

usos no potables), las condiciones de salida del sistema de tratamiento deben cumplir con los lineamientos establecidos en la NOM-003-ECOL-1997 que se muestran en la Tabla 5 y los de la NOM-001-ECOL-1996 en la Tabla 6, además de tener ausencia de materia flotante.

Tabla 5. Límites Máximos Permisibles de Contaminantes en la NOM-003-ECOL-1997.

TIPO DE REUSO	PROMEDIO MENSUAL				
	Coliformes Fecales NMP/100mL	Huevos de helminto (h/l) ²	Grasas y aceites (mg/L)	DBO ₅ (mg/L)	SST (mg/L)
Servicios al público con contacto directo ³	240	1	15	20	20
Servicios al público con contacto indirecto u ocasional ⁴	1,000	5	15	30	30

Fuente: NOM-003-ECOL-1997.

La importancia de las NMX radica en el respaldo que brindan para caracterizar el agua de manera correcta y evitar errores en la medición, las normas que se manejaron durante esta investigación se muestran en la Tabla 7. Cumplir con la legislación vigente contribuye a que los usuarios acepten y reutilicen el agua tratada en las actividades no potables.

² Concentración en huevecillos por litro.

³ Es el que se destina a actividades donde el público usuario esté expuesto directamente o en contacto físico, como llenado de lagos y canales artificiales recreativos con paseos en lancha, remo, canotaje y esquí; fuentes de ornato, lavado de vehículos, riego de parques y jardines.

⁴ Es el que se destina a actividades donde el público en general esté expuesto indirectamente o en contacto físico incidental y que su acceso es restringido, ya sea por barreras físicas o personal de vigilancia, como riego de jardines y camellones en autopistas, camellones en avenidas, fuentes de ornato, campos de golf, abastecimiento de hidrantes de sistemas contra incendio, lagos artificiales no recreativos, barreras hidráulicas de seguridad y panteones.

Tabla 6. Límites máximos permisibles para metales pesados y cianuros en la NOM-001-ECOL-1996.

PARÁMETRO (*)		RÍOS				EMBALSES NATURALES Y ARTIFICIALES				AGUAS COSTERAS				SUELO						
(miligramos por litro)	Uso en riego agrícola (A)	Uso público urbano (B)		Protección de vida acuática (C)		Uso en riego agrícola (B)		Uso público urbano (C)		Explotación pesquera, navegación y otros usos (A)		Recreación (B)		ESTUARIOS (B)		Uso en riego agrícola (A)		HUMEDALES NATURALES (B)		
	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.
Arsénico	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2
Cadmio	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.05	0.1	0.1	0.2
Cianuros	1.0	3.0	1.0	2.0	1.0	2.0	2.0	3.0	1.0	2.0	1.0	2.0	2.0	3.0	1.0	2.0	2.0	3.0	1.0	2.0
Cobre	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0	4	6.0	4	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0	4	6.0	4.0	6.0
Cromo	1	1.5	0.5	1.0	0.5	1.0	1	1.5	0.5	1.0	0.5	1.0	1	1.5	0.5	1.0	0.5	1.0	0.5	1.0
Mercurio	.01	.02	.005	.01	.005	.01	.01	.02	.005	.01	.01	.02	.01	.02	.01	.02	.005	.01	.005	0.01
Níquel	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4
Plomo	0.5	1	0.2	0.4	0.2	0.4	0.5	1	0.2	0.4	0.2	0.4	0.5	1	0.2	0.4	5	10	0.2	0.4
Zinc	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20

(*) Medidos de manera total.

P.D. = Promedio Diario, P.M. = Promedio Mensual, N.A. = No es aplicable

(A), (B) y (C): Tipo de Cuerpo Receptor según la Ley Federal de Derechos.

FUENTE: NOM-001-ECOL-1996.

Tabla 7. Normas aplicadas en la determinación de la calidad del agua.

Parámetro	Norma
SST	NMX-AA-034-SCFI-2001
SDT	NMX-AA-034-SCFI-2001
Lodos: Aprovechamiento y disposición.	NOM-004-SEMARNAT-2002
DQO:	
Reflujo cerrado – titulación	NMX-AA-030-SCFI-2001
Arsénico, cadmio, cromo total, mercurio, níquel, plomo, zinc.	NMX-AA-051-SCFI-2000
Cianuros	EPA 335.2 (1983)
Cobre	NMX-AA-006-SCFI-2000
Coliformes fecales	NMX-AA-042-1987
Huevos de helminto	NMX-AA-113-SCFI-1999
Muestreo	NMX-AA-003-1980

4. Metodología

4. Metodología

El proceso de investigación incluyó varias etapas, desde la selección del coagulante hasta la evaluación del sistema híbrido. En la Figura 6 se indica el procedimiento general que se siguió para la evaluación de la propuesta, sin embargo más adelante se explica en detalle cada etapa de la investigación. Cabe destacar que este procedimiento se llevó a cabo para los dos tipos de agua gris examinados:

- a) Agua gris que contiene detergente en polvo.
- b) Agua gris que contiene detergente líquido.

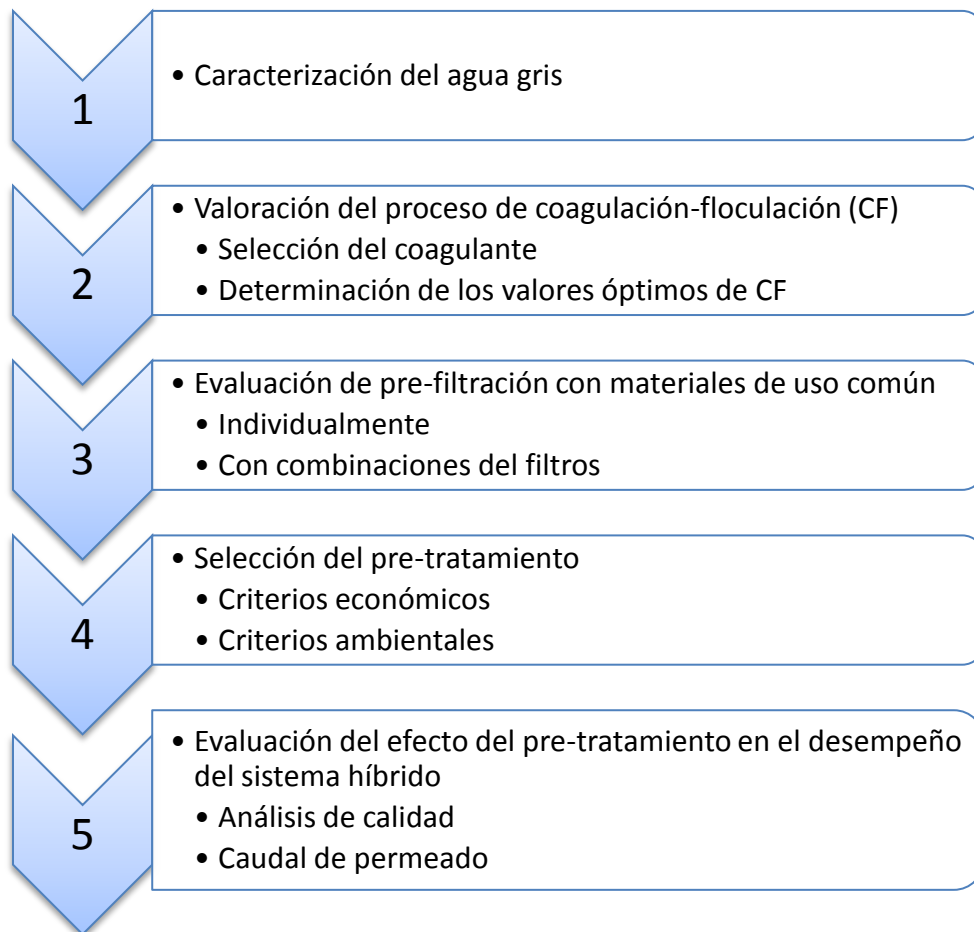


Figura 6. Metodología de la investigación.

4.1 Dispositivos experimentales

Las pruebas de laboratorio y determinaciones analíticas se realizaron en el laboratorio de *Ingeniería Ambiental* y en el laboratorio del *Centro del Agua para América Latina y el Caribe* del ITESM. Los equipos y materiales utilizados se mencionan en la Tabla 8 y Tabla 9. Además se empleó material general de laboratorio como crisoles, probetas, micropipetas, pinzas para crisol, vasos de precipitado, embudos, etc.

Tabla 8. Equipos utilizados por etapa de investigación.

Caracterización	Coagulación-floculación	Pre-filtración	Sistema híbrido
Potenciómetro Hanna HI 98130	Equipo de jarras (Figura 7)	Bomba de vacío de ¼ Hp	Equipo de membranas (Figura 8)
Turbidímetro Hanna 2100 AN			
Reactor Hach DRB200			
Estufa			
Desecador			
Balanza analítica			

El equipo de membranas utilizado integra un contenedor de 100 L donde se almacena el agua que se desea tratar y una membrana de ultrafiltración marca Koch® con dimensiones de 2.5" de diámetro por 40" de largo; en la Figura 8 se puede apreciar el equipo, el contenedor y los compartimientos donde van colocadas las membranas.

Tabla 9. Materiales utilizados por etapa de investigación.

Caracterización	Coagulación-floculación	Pre-filtración	Sistema híbrido
Crisoles	Embudos de separación	Embudo de porcelana	Membrana de microfiltración
		Matraz kitazato	Membrana de ultrafiltración

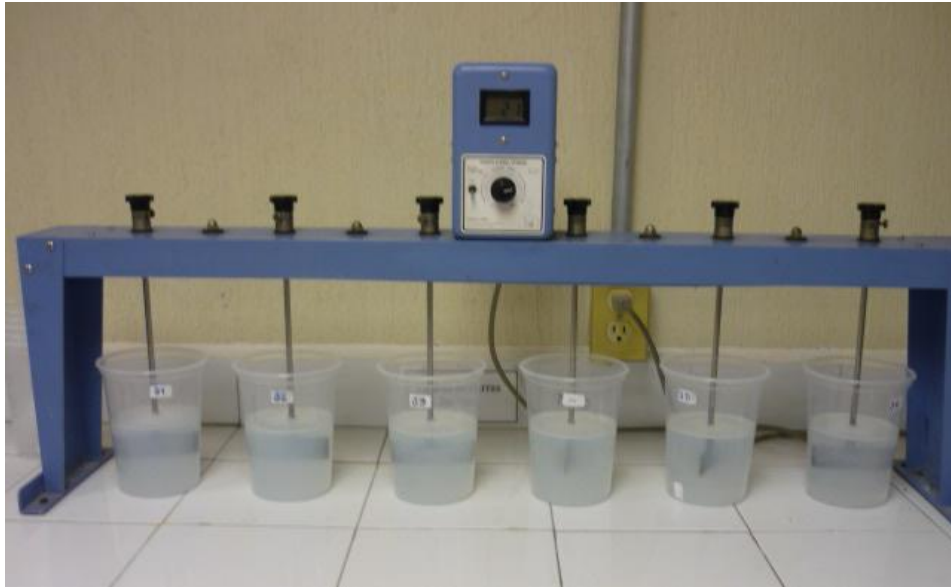


Figura 7. Equipo de Jarras.



Figura 8. Equipo de membranas.

4.2 Caracterización del agua gris proveniente del lavado de ropa

Para calcular los porcentajes de remoción que ofrece cada etapa, se caracterizó el agua gris al salir de la lavadora y después de cada tratamiento, con estos datos se empleó la Ecuación 1 para obtener el resultado.

$$\%R = \frac{(x_0 - x)}{x_0} \times 100 \quad (1)$$

Donde:

x_0 = Parámetro de la muestra original, sin tratamiento.

x = Parámetro medido después del tratamiento.

La caracterización inicial del agua gris se llevó a cabo en un laboratorio certificado, tomando en cuenta todos los parámetros indicados en la NOM-003-ECOL-1997 para agua de reuso; sin embargo en todas las demás etapas del proyecto se tomaron en cuenta los parámetros y criterios indicados en la Tabla 10.

Tabla 10. Parámetros de calidad cuantificados.

Parámetro	Unidad	Método/medio de prueba
1 Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	NMX-AA-034-SCFI-2001
2 Sólidos Totales	mg/L	NMX-AA-034-SCFI-2001
3 Sólidos Disueltos Totales (SDT)	mg/L	Potenciómetro Hanna HI 98130
4 Turbidez	NTU	Turbidímetro Hanna 2100 AN
5 Conductividad	$\mu\text{S}/\text{cm}^2$	Potenciómetro Hanna HI 98130
6 Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	NMX-AA-030-SCFI-2001 Reflujo cerrado-titulación
7 pH	–	Potenciómetro Hanna HI 98130
8 Temperatura	$^{\circ}\text{C}$	Potenciómetro Hanna HI 98130

Asimismo, se presenta la caracterización del agua gris en cuestión de metales pesados, que fue realizado en una ocasión por un laboratorio certificado ya que en el área de trabajo no se contaba con el equipo necesario para estas determinaciones.

a) *Obtención de la muestra de agua gris*

Con el fin de garantizar resultados confiables y apegados a la realidad, se lavó ropa en una lavadora id System® (Easy) con capacidad de 12 kg, para trabajar con agua gris real. Pero como la carga orgánica en el efluente depende de la cantidad de ropa, de la suciedad presente y de la naturaleza del detergente utilizado se deben generalizar estas características para que sean lo más parecidas posible; estos factores son difícilmente controlables si se desea trabajar con agua real, por lo tanto para tratar de igualar las características de la muestra, se siguieron las condiciones de muestreo que se indican en la Tabla 11.

Tabla 11. Condiciones para el muestreo de agua gris.

	Condición
Carga de ropa ⁵	6 – 8 Kg
Volumen de agua total ⁶	166 L
Dosis de detergente en polvo ⁷	200 g
Dosis de detergente líquido ⁷	100 mL
Temperatura del agua	De salida de la tubería
Ciclo de lavado	Normal
Modo	Automático

El efluente se obtuvo en el mismo laboratorio y se recuperó en tanques de polietileno de donde se tomó la muestra para realizar las pruebas de laboratorio. En caso de posponer los experimentos, las muestras se almacenaron a 4°C en recipientes PET como lo indica la norma NMX-AA-003-1980; para garantizar una muestra fresca no se utilizaron muestras almacenadas por un periodo mayor a dos días. El desempeño de los dos detergentes fue evaluado por separado, repitiendo el mismo procedimiento en cada uno y con tres réplicas por cada tratamiento.

Las pruebas de coagulación – floculación se desarrollaron en dos ocasiones de manera independiente, en la primer parte se llevó a cabo el tratamiento con agua gris que

⁵ De manera general se emplearon sábanas, toallas o pantalones de mezclilla de hombre. La variación en la masa se debe al tipo de ropa empleado en cada lavado, por ejemplo, se utiliza mayor cantidad de sábanas que toallas debido a que las primeras desprenden menos fibras que las segundas.

⁶ Suma equitativa del lavado y enjuague.

⁷ Recomendada por el fabricante.

contiene detergente en polvo Viva® y en la segunda conteniendo detergente líquido Mas color®.

4.3 Valoración de la coagulación – floculación (CF): Pre-tratamiento 1

4.3.1. Selección del coagulante

Se experimentó con cloruro férrico y sulfato de aluminio por ser los coagulantes más utilizados en la industria (Budd, y otros, 2004), con ellos se realizaron las pruebas de jarras siguiendo las condiciones que se muestran en la Tabla 12; cada reactivo se preparó en una concentración 0.1M y se dosificó con las variaciones que se presentan en la Tabla 13.

Una vez que se trató el agua, se caracterizó el sobrenadante y se calcularon las eficiencias de remoción con los parámetros de la Tabla 10, sin embargo los criterios para seleccionar el coagulante fueron la reducción en SST, SDT y turbidez.

Tabla 12. Condiciones en la prueba de jarras para seleccionar un coagulante.

Parámetros fijos	Variaciones de proceso
Volumen de agua (166 L) Coagulación: 150 rpm, 1 min Sedimentación: 30 min Floculación: 20 rpm, 15 min	Dosis de coagulante (mg/L)

Tabla 13. Dosis de sulfato de aluminio y cloruro férrico.

Sulfato de aluminio (mg/L)	Cloruro férrico (mg/L)
68	16.2
137	32.4
205	64.8
274	97.2
342	129.6
410	

4.3.2. Determinación de los valores óptimos de coagulación-floculación

En esta etapa se modificaron las condiciones de CF en el orden cronológico que se muestra en la Tabla 14. Para asegurar la fiabilidad de los resultados, se realizaron 3 réplicas de cada experimento y al igual que en la sección anterior, se tomó en cuenta la remoción en SST, SDT y turbidez para seleccionar la dosis óptima de coagulante (dosis a la cual se alcanzan las mejores eficiencias de remoción).

Tabla 14. Condiciones para determinar los valores óptimos de CF.

Parámetros fijos	Variaciones de proceso
Volumen de agua (83 L)	Dosis de coagulante (mg/L)
Coagulación: 150 rpm, 1 min	Velocidad de floculación (rpm)
Sedimentación: 30 min	Tiempo de floculación (min)

Con base en la literatura, se llevaron a cabo nueve combinaciones entre velocidad y tiempo de floculación (Tabla 15), de donde se obtuvieron 27 eficiencias de remoción en SST. Los resultados experimentales fueron analizados estadísticamente mediante el método de diseño factorial general (Minitab) para determinar la velocidad y tiempo de mezclado óptima con las siguientes variables:

- Tipo de agua gris (que contiene detergente en polvo o líquido).
- Velocidad de mezclado.
- Tiempo de mezclado.

Tabla 15. Variaciones en floculación.

Velocidad (rpm)	Tiempo (min)
10	10
	15
	20
15	10
	15
	20
20	10
	15
	20

4.4 Evaluación de la pre-filtración (PF): Pre-tratamiento 2

Como segunda opción de pre-tratamiento, independiente a la coagulación-floculación, se llevó a cabo pre-filtración directa con materiales de uso común para eliminar la mayor cantidad de sólidos suspendidos posible. Los materiales se compraron en una tienda departamental y los precios variaron entre 10.00 y 50.00 pesos por metro de tela. Las características de venta y precios, se incluyen en la Tabla 34 del Anexo III de este documento.

Se evaluó cada material por separado y con diferentes combinaciones de los mismos filtrando agua gris, las eficiencias de remoción también se determinaron con la Ec. 1. El proceso de pre-filtración estuvo basado en la NMX-AA-034-SCFI-2001, utilizando los materiales mencionados en la Tabla 17.




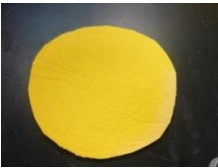
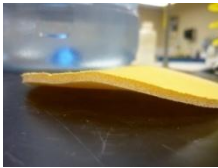


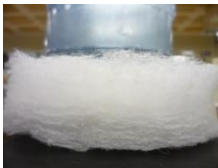


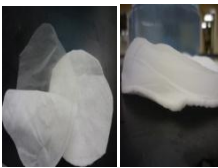


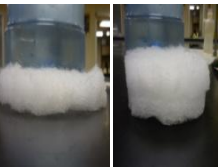

Además de llevarse a cabo la filtración con materiales individuales, se trataron diferentes combinaciones de materiales, con el fin de aumentar la eficiencia del pre-tratamiento. Esto se basó en el supuesto de que varias capas y diferentes tipos de fibras pueden retener un mayor número de sólidos a su paso. Para llevar a cabo el experimento, se probaron los materiales que actuaron de manera más eficiente en las pruebas individuales, además se tomó en cuenta el costo de cada uno, con base en esto, se determinan las combinaciones a evaluar (Tabla 16).

Tabla 16. Materiales combinados para pre-filtración del agua gris.

#	Combinación	Número de capas ⁸
1	Poliéster comprimido – Fieltro	1 – 2
2	Poliéster comprimido – Guata	1 – 2
3	Poliéster comprimido – Popelina	1 – 2
4	Popelina – Fieltro	2 – 2
5	Popelina – Guata	2 – 2
6	Guata – Fieltro	2 – 2
7	Fieltro	4

⁸ Respectivamente a cada material.

Tabla 17. Materiales utilizados para la pre-filtración.

Nombre	Descripción	Imagen		
		Vista frontal	Grosor	Porosidad
Fieltro	Es un paño conglomerado de lana, poroso fácil de manejar y de bajo costo. Para la prueba se requieren 2 capas de este material.			
Popelina Bondeada	Es una tela con un grosor de 4mm con dos partes porosas en sus extremos. Se utilizaron 2 capas.			
Polyespuma	Poliéster comprimido o placas de delcron, se pueden utilizar para el relleno de cojines. No se oxida o hace polvo. Una capa.			
Microfiltro	Es un filtro formado por 3 mallas que permite la retención de partículas hasta de 10 µm.			
Guata	Es una lámina gruesa de algodón que se emplea para rellenar tejidos. Tiene 1.5 cm de grosor aproximadamente, para la prueba se requieren 2 capas de este material.			

Cada filtro se pre-lavó y reutilizó con los dos tipos de agua residual (con detergente en polvo y con detergente líquido) tomando en cuenta que en cada uno existe un lado con poro grueso y otro fino. El poro más grande se colocó hacia arriba (donde se presenta el primer contacto entre agua-filtro) y el poro fino hacia el recipiente donde se recolecta el permeado.

Una vez que se pre-filtró el agua, se calcularon las eficiencias de remoción para los diferentes parámetros. A partir de estos resultados, se eligió el material o combinación de materiales que removiera la mayor cantidad de SST y turbidez.

4.5 Selección del pre-tratamiento más adecuado

Para seleccionar el pre-tratamiento más adecuado se tomaron en cuenta criterios económicos y ambientales para acreditar o desacreditar su funcionamiento con el sistema híbrido de membranas.

Los criterios económicos tomados en cuenta son:

- a) Costo de los materiales y equipos requeridos del pre-tratamiento.

Para llevar a cabo el análisis económico de los tratamientos, se debe tomar en cuenta los costos de instalación de cada uno de ellos, incluyendo la construcción del tanque floculador, el agitador, motor, etc., así como el costo de modificar el cartucho de la lavadora para colocar el pre-filtro y la implementación de las membranas en el sistema.

Sin embargo, para fines de este proyecto, solo se llevó a cabo un análisis económico limitado al costo de los materiales que se requieren para llevar a cabo el pre-tratamiento, sin tomar en cuenta sus costos de instalación, mantenimiento u operación. Con esto, se realizó una comparación acerca de cuál de las opciones generaría un mayor costo con el paso del tiempo.

Los criterios ambientales seleccionados fueron:

- a) Formación de productos secundarios al tratamiento.
- b) La disposición de residuos.
- c) Si se necesita energía extra al funcionamiento de la lavadora y el equipo de membranas para llevar a cabo el pre-tratamiento.

4.6 Efecto del pre-tratamiento en el desempeño del sistema híbrido

Las pruebas finales se llevaron a cabo con membranas de microfiltración, ultrafiltración y el pre-tratamiento elegido. Para evaluar el desempeño del último, se filtró el agua gris únicamente con las membranas y después con el sistema híbrido; además se midió el caudal de permeado producido, el cual es un indicador de la reducción en el taponamiento de la membrana. Las configuraciones evaluadas para el sistema híbrido se indican en la Tabla 18.

Posteriormente, se caracterizó el efluente para determinar la calidad del agua obtenida y compararla con la norma NOM-003-ECOL-1997 para agua de reuso y determinar si se cumple con los límites permisibles indicados así como el sistema híbrido más adecuado para el tratamiento del agua gris proveniente del lavado de ropa.

Tabla 18. Combinaciones de membranas evaluadas.

Combinación	
1	MF
2	PT – MF
3	MF – UF
4	PT – MF – UF

Pre-tratamiento (PT),
Microfiltración (MF),
Ultrafiltración (UF).

El agua utilizada para una combinación y su equivalente con pre-filtración fue la misma para evitar errores en el cálculo de las eficiencias de eliminación de sólidos y en el flujo del permeado. Las pruebas con la membrana de ultrafiltración se llevaron a cabo a 120 psi que era la presión máxima de diseño del equipo para ultrafiltración.

5. Resultados

5. Resultados

5.1 Caracterización del agua gris

En la Tabla 19 se presentan los resultados de la caracterización para el agua gris que contiene detergente en polvo y el agua gris que contiene detergente líquido. La medición de la demanda química de oxígeno no fue confiable debido a deficiencias del método de análisis utilizado, por lo tanto este parámetro no se consideró para la discusión de resultados.

Tabla 19. Caracterización fisicoquímica del agua gris del lavado de ropa.

Parámetro	Agua gris que contiene detergente en polvo*	Agua Potable**	Agua Gris que contiene detergente líquido*
1 pH	9.3 ± 0.3	7.54	8.1 ± 0.3
2 ST, mg/L	1708 ± 222	613	740 ± 85
3 SDT, mg/L	1003 ± 97	447	429 ± 123
4 SST, mg/L	705 ± 225	166	311 ± 102
5 Turbidez, NTU	184 ± 75	0.35	53 ± 24
6 Conductividad, $\mu\text{S}/\text{cm}^2$	1922 ± 167	844	827 ± 246
7 Temperatura (°C)	20.6 ± 3.9	24.8	20.7 ± 3.2

Los datos mostrados corresponden a valores medios \pm su desviación estándar.

* Se refiere a la mezcla equitativa entre la primer y segunda descarga de la lavadora.

** Es el agua de suministro para la lavadora, proveniente de los laboratorios del ITESM.

Se observa un aumento considerable en casi todos los parámetros respecto al agua de alimentación, principalmente con el agua gris que contiene detergente en polvo. Por ejemplo, la variación en SST, SDT, turbidez y conductividad, se asocia a la cantidad de detergente agregado (sólo se alcanza a disolver una parte) y a la carga orgánica desprendida por la ropa, como sudor, suciedad, cabello, pelusa, etc. El aumento en pH se debe a la naturaleza alcalina del detergente; por esto, el detergente líquido pareciera ser más amigable con el ambiente al modificar en menor proporción las características fisicoquímicas del agua; sin embargo, esto se debe evaluar ya que al contener anti-

incrustantes, puede arrastrar con los contaminantes adheridos a las paredes de las tuberías de conducción.

En este caso, no se rebasa la norma NOM-003-ECOL-1997 para agua de reuso con el detergente en polvo, como se observa en la Tabla 20. No se cuenta con los datos para el detergente líquido, así que en este caso no se puede concluir si se cumple con la mayoría de los parámetros de la norma.

Tabla 20. Caracterización de metales pesados en el agua gris con detergente en polvo.

	Parámetro	Unidad	Resultado	Límite permisible*
1	Arsénico	mg/L	0.002	0.2
2	Cadmio	mg/L	<0.04	0.2
3	Cianuros	mg/L	<0.01	2.0
4	Cobre	mg/L	<0.1	6.0
5	Cromo total	mg/L	<0.05	1.0
6	Mercurio	mg/L	<0.001	0.01
7	Niquel	mg/L	<0.2	4
8	Plomo	mg/L	<0.1	0.4
9	Zinc	mg/L	0.29	20

* NOM-003-ECOL-1997, promedio diario.

5.2 Valoración de la coagulación - floculación (CF): Pre-tratamiento 1

5.2.1. Selección del coagulante

La prueba de jarras ejecutada con agua gris que contiene detergente en polvo, demostró que el sulfato de aluminio tiene un mejor comportamiento que el cloruro férrico para la CF del agua gris, como lo indica la literatura (Budd et al., 2004), ya que se observó que se removieron los SST y la turbidez en 40 y 60 % respectivamente, además aumentó la formación de flóculos al variar el pH en un rango de 6 – 10, ofreciendo la ventaja de llevar a cabo el tratamiento al pH de salida de la muestra (por su rango de operación en medios alcalinos).

Además de dispersar la materia y no permitir la sedimentación, el cloruro férrico cambió considerablemente el color del agua enturbiándola como se observa en la Figura 9, este fenómeno ocasiona que el tratamiento no sea efectivo como proceso de limpieza. Por lo tanto, se eligió al sulfato de aluminio como el coagulante efectivo para el tratamiento del agua gris proveniente del lavado de ropa.

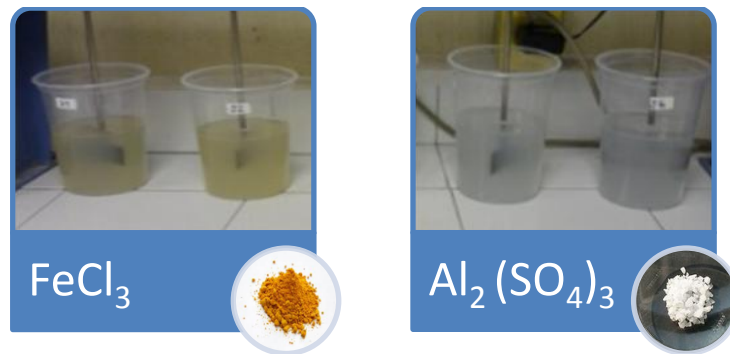


Figura 9. Efecto de los coagulantes en el agua gris.

5.2.2. Determinación de los valores óptimos de coagulación-floculación

a) Caso I: Agua gris que contiene detergente en polvo

La Figura 10 presenta los resultados de las pruebas de jarras llevadas a cabo de acuerdo a las condiciones indicadas en la Tabla 15 de la metodología. Como se puede observar, los mejores resultados en remoción se tienen en SST y turbidez, lo cual resulta benéfico para el tratamiento propuesto. La variación en SDT oscila entre 1 y 2 % en algunas condiciones, por lo tanto, no se tomaron en cuenta para determinar la condición óptima de operación. Se observa que la disminución en SST osciló en un rango entre el 45 y 50% aproximadamente. En cuanto a turbidez se logró disminuir hasta un 70% con una dosis de 250 mg/L. De esta manera se eligió una dosis de 250 mg/L de coagulante como el valor óptimo para llevar a cabo la CF.

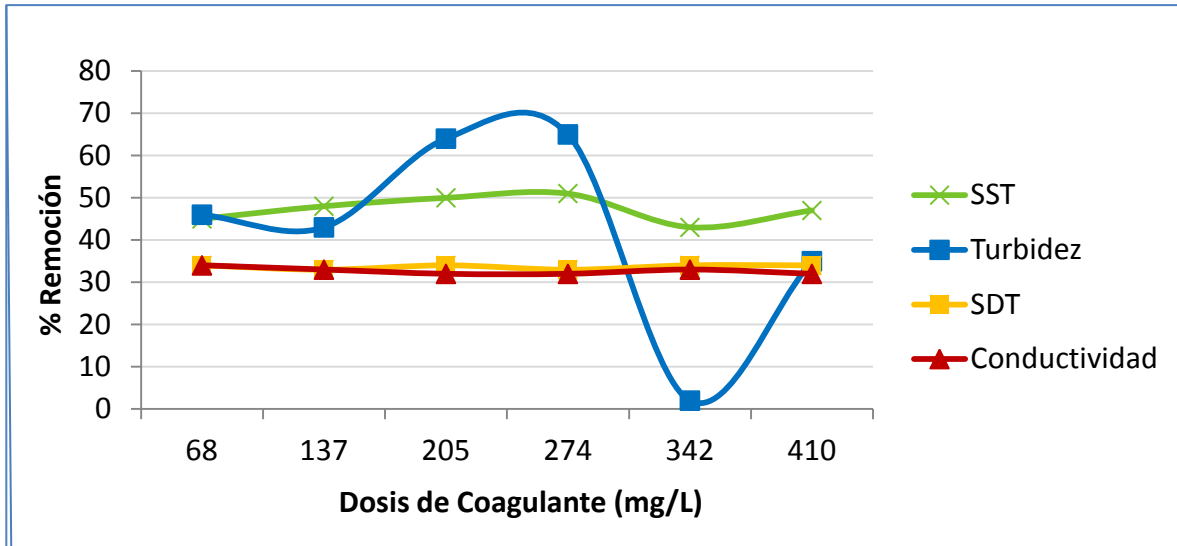


Figura 10. Eficiencias en la variación de la dosis de coagulante con agua gris que contiene detergente en polvo.

Con los cambios en las velocidades y tiempos de floculación, se alcanzaron eficiencias hasta del 95% en turbidez y de 73% en SST. Las eficiencias de remoción obtenidas para SST, SDT y turbidez se resumen en la Figura 11, la variación en conductividad, pH y los datos registrados de la prueba se desglosan en el Anexo I.

No obstante, al utilizar todas las repeticiones y las gráficas de interacción que se muestran en la Figura 12, se puede decir en resumen que la condición óptima para llevar a cabo la floculación de agua gris es a una velocidad de 10 rpm durante 20 minutos, toda vez que:

1. Se presenta la mejor remoción en los parámetros de turbidez y sólidos suspendidos.
2. El cambio en conductividad y SDT es el mismo que en condiciones de mayor velocidad.
3. Al reducirse los SST se asegura el buen funcionamiento de las membranas (objetivo de esta investigación).

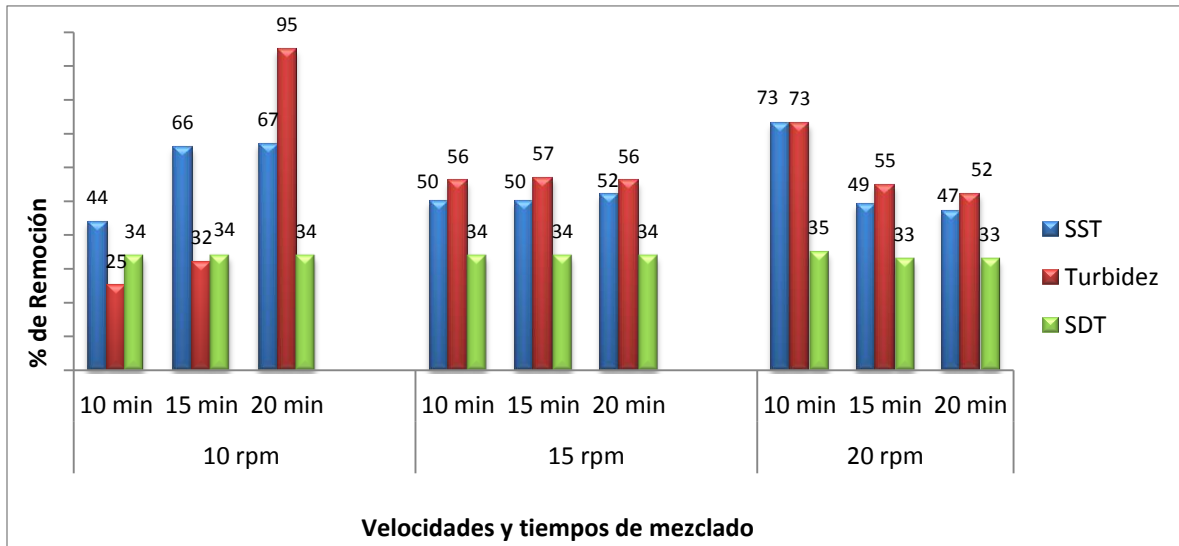


Figura 11. Eficiencias en el cambio en floculación para el agua gris que contiene detergente en polvo.

El recuento de los valores óptimos para la coagulación – floculación del agua gris que contiene detergente en polvo se muestran en la Tabla 21.

Tabla 21. Valores óptimos para CF del agua gris que contiene detergente en polvo.

Parámetro	Valor óptimo
pH de salida	8
Dosis de coagulante $[Al_2(SO_4)_3]$ (mg/L)	250
Coagulación: Velocidad (rpm)	150
Tiempo (min)	1
Floculación: Velocidad (rpm)	20
Tiempo (min)	10

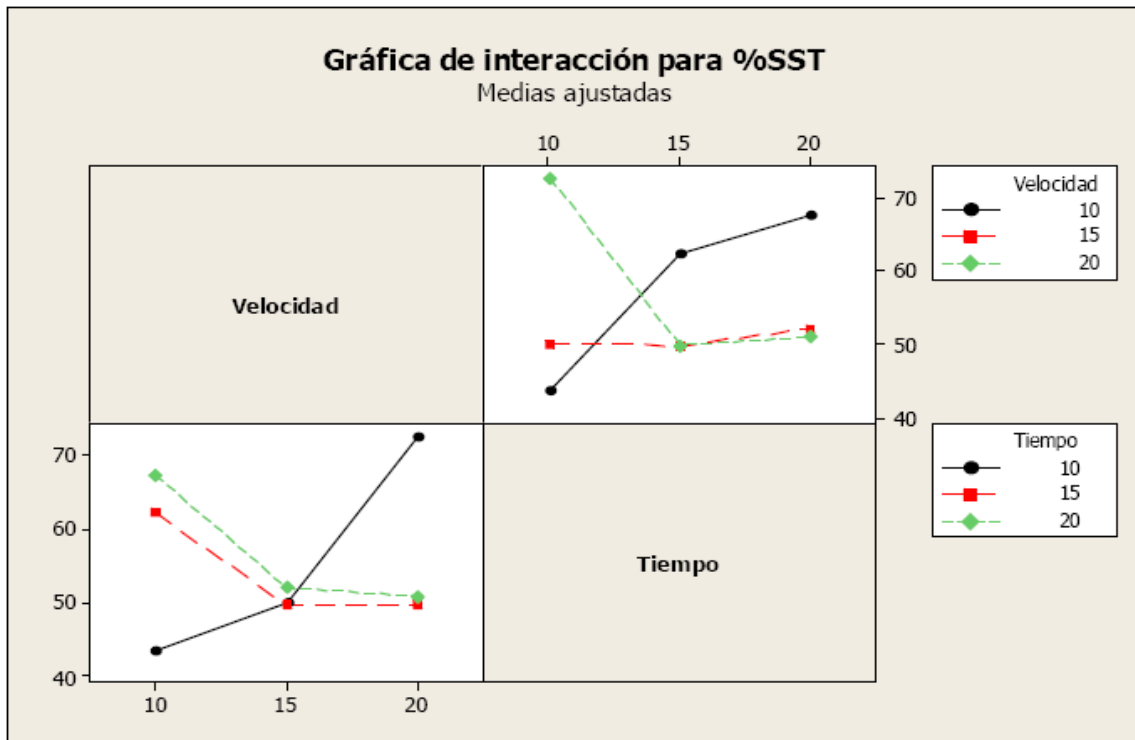


Figura 12. Interacción entre la velocidad y tiempo de mezclado para el agua gris que contiene detergente en polvo.

b) Caso II: Agua gris que contiene detergente líquido

En este caso, se encontró una dosis óptima de coagulante de 205 mg/L, ya que en este punto se logró la mejor eficiencia en remoción de SST y turbidez en conjunto, así como en SDT, el cual resulta despreciable ya que no mejora más allá del 10% y mantiene casi el mismo comportamiento con todas las dosis agregadas. En la condición 137 mg/L se remueve mayor cantidad de SST que en 205 mg/L sin embargo no se tiene disminución en la turbidez, ésto se puede deber a que solamente se haya removido sólidos provenientes de la ropa, como fibras, pero que no se haya eliminado el detergente disuelto, manteniendo así la turbidez en el agua.

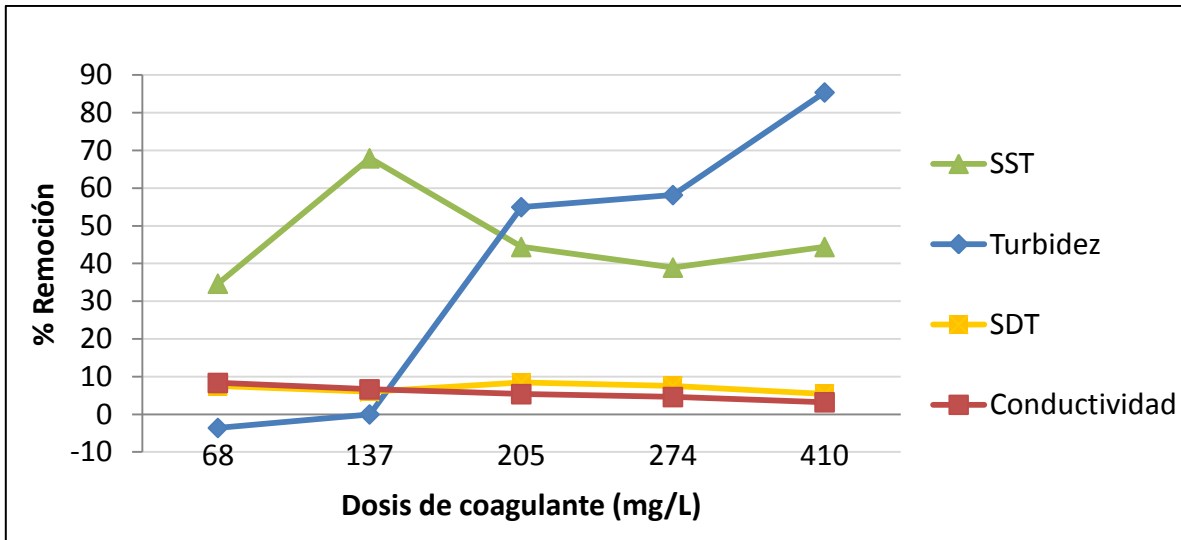


Figura 13. Eficiencias en la variación de la dosis de coagulante con agua gris que contiene detergente líquido.

En la Figura 14 se observan altas eficiencias en remoción de turbidez y hasta un 51% en SST; nuevamente al tomar en cuenta todos los datos y las interacciones de la Figura 15, se determina que a una velocidad de 15 rpm durante 15 minutos se tienen los valores óptimos para flocular el agua gris que contiene detergente líquido ya que en este punto se remueve casi lo mismo que con la eficiencia máxima (20 rpm) con una diferencia de 1%, sin embargo por cuestiones de energía no es conveniente aumentar el requerimiento energético del motor para agitar a mayor velocidad el agua si solamente se va a aumentar en 1% la remoción de SST. Este análisis estadístico se muestra completo en el Anexo IV. La recopilación de los valores óptimos para coagulación – floculación del agua gris que contiene detergente líquido se listan en la Tabla 22.

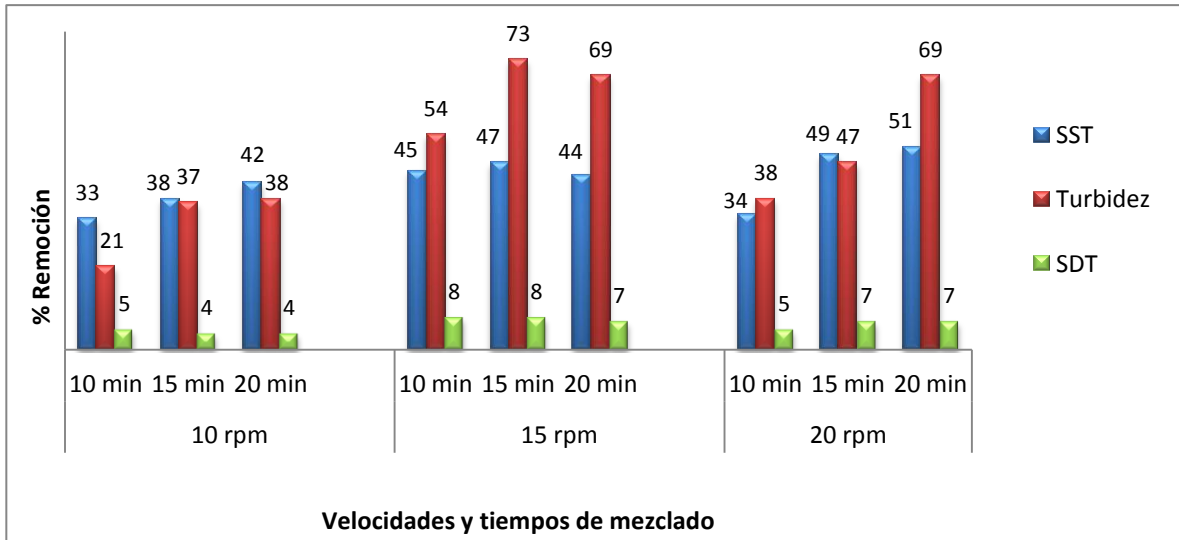


Figura 14. Eficiencias en el cambio en floculación para el agua gris que contiene detergente líquido.

Tabla 22. Valores óptimos para CF con agua gris que contiene detergente líquido.

Parámetro	Valor óptimo
pH de salida	7.9
Dosis de coagulante [Al ₂ (SO ₄) ₃] (mg/L)	205
Coagulación: Velocidad (rpm)	150
Tiempo (min)	1
Floculación: Velocidad (rpm)	15
Tiempo (min)	15

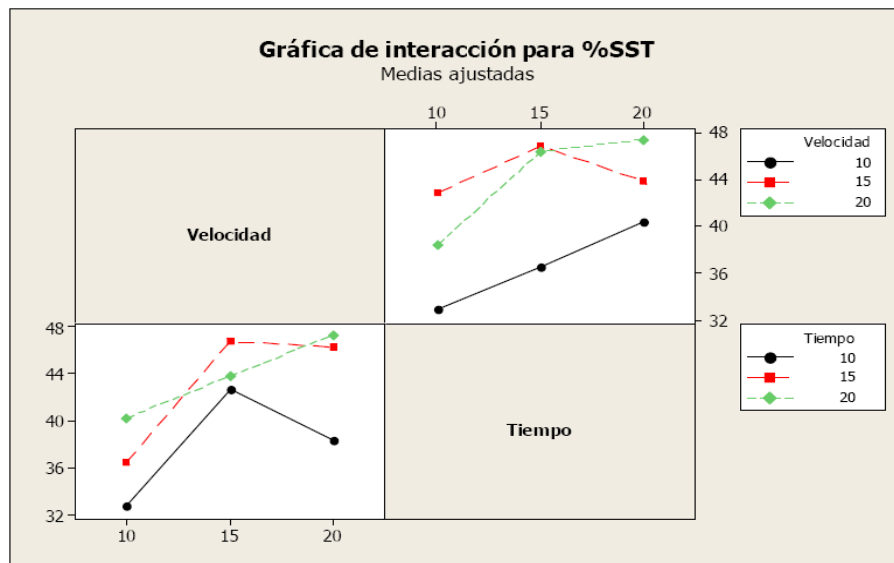


Figura 15. Interacción entre la velocidad y tiempo de mezclado para el agua gris que contiene detergente líquido.

5.3 Evaluación de pre-filtración (PF): Pre-tratamiento 2.

5.3.1 Utilización de materiales individuales

Al utilizar los materiales por sí solos, se remueve menos del 7% en SST y menos del 10% en turbidez con el agua gris que contiene detergente en polvo (Figura 16). A pesar del tamaño de poro, capas utilizadas y tipo de material, el microfiltro no resultó ser tan eficiente como se esperaba, solamente logró reducir turbidez con el detergente líquido (Figura 17), además, el costo de adquisición es alto en comparación con los otros materiales que se descarta como potencial agente reductor de sólidos en el sistema híbrido.

La popelina bondeada parece tener el mejor comportamiento con ambos detergentes, seguida por el fieltro y polyespuma (tomando en cuenta SST) con el detergente líquido. Sin embargo, los resultados en el primer caso fueron muy poco favorables, por lo tanto no se puede escoger como un pre-filtro adecuado para tratar el agua gris.

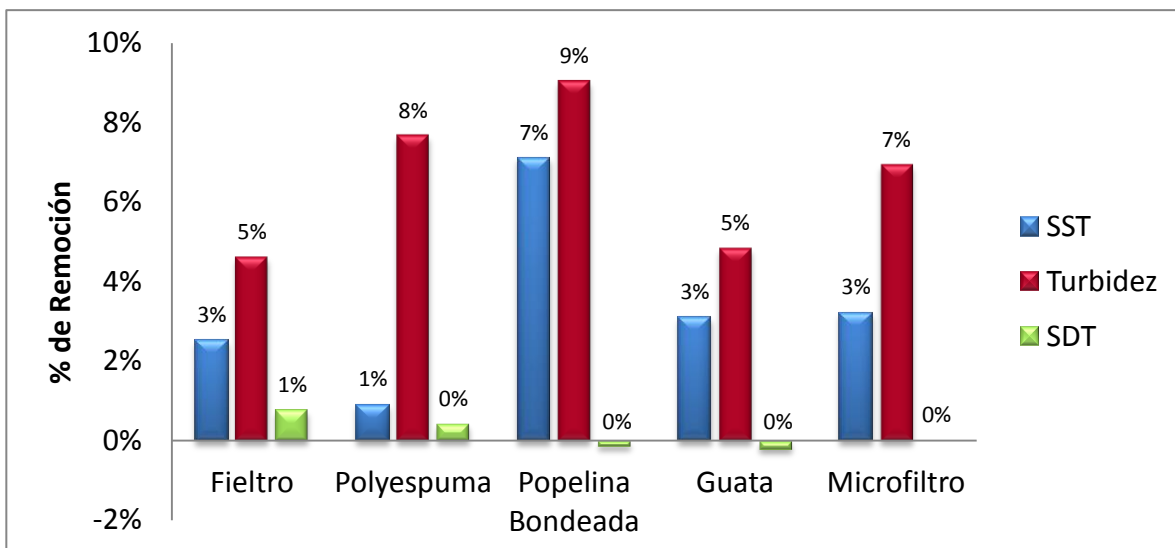


Figura 16. Eficiencias de los materiales filtrantes con agua gris que contiene detergente en polvo.

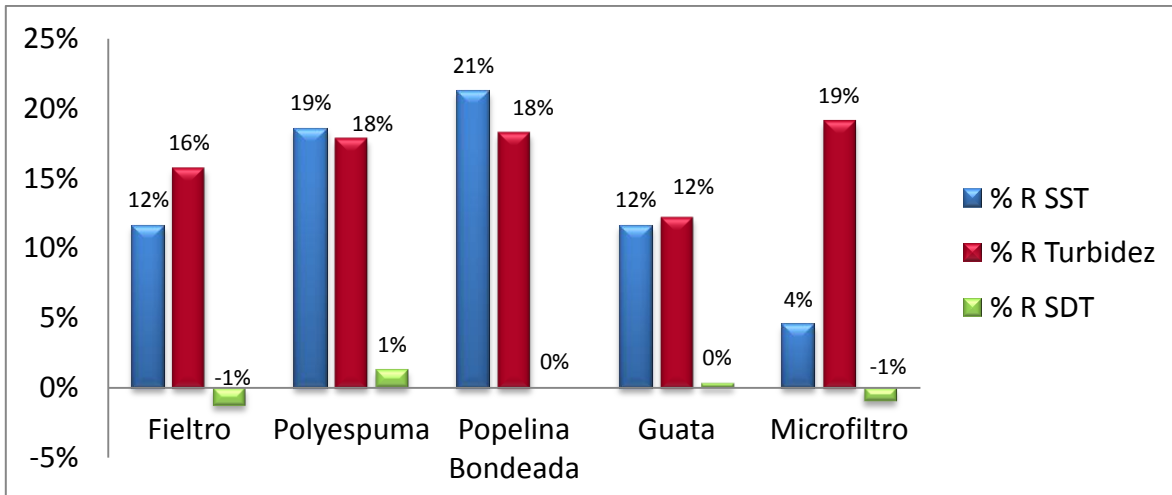


Figura 17. Eficiencias de los materiales filtrantes con agua gris que contiene detergente líquido.

5.3.2 Utilización de materiales combinados

Tomando en cuenta los materiales que tuvieron el mejor comportamiento en la sección anterior, se decidió probar las combinaciones que se indicaron en la Tabla 16 de la metodología. Del mismo modo, se ilustró el comportamiento de las mejores combinaciones posterior a la filtración, dichos resultados se muestran en la Figura 18 y en la Figura 19, donde el número de la combinación del eje “x” corresponde a la condición indicada en la Tabla 16.

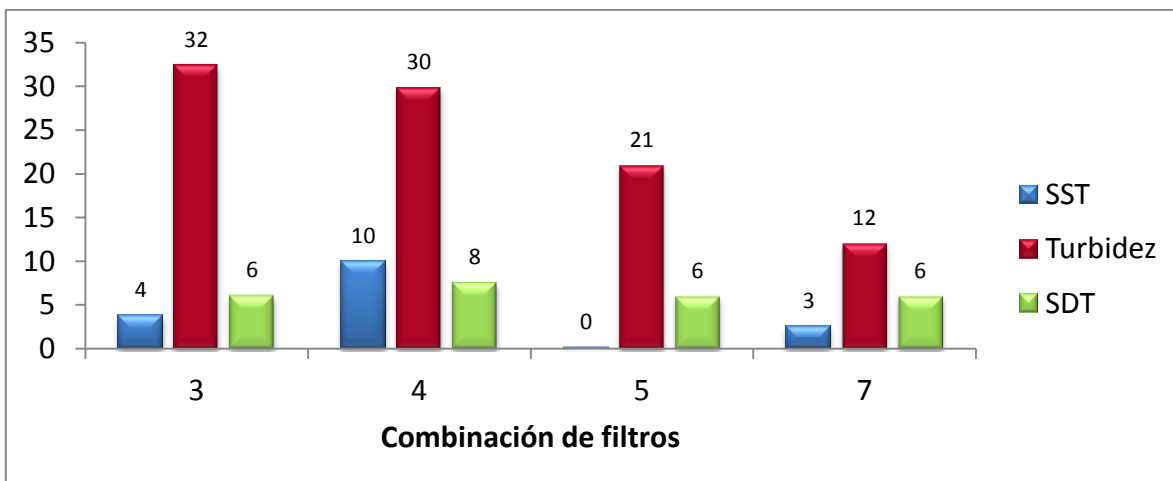


Figura 18. Combinaciones de filtros con mejores eficiencias de remoción, agua gris que contiene detergente en polvo.

Las figuras señalan que la combinación 4 aumentó de 9 a 30% la remoción en turbidez para el agua gris que contiene detergente en polvo, asimismo aumentó de 18 a 26 % en el agua gris que contiene detergente líquido; además también reduce la concentración de SST.

Por lo anterior, se selecciona el uso de popelina bondeada y fieltro (combinación 4) por el buen comportamiento que tienen en comparación a las otras combinaciones.

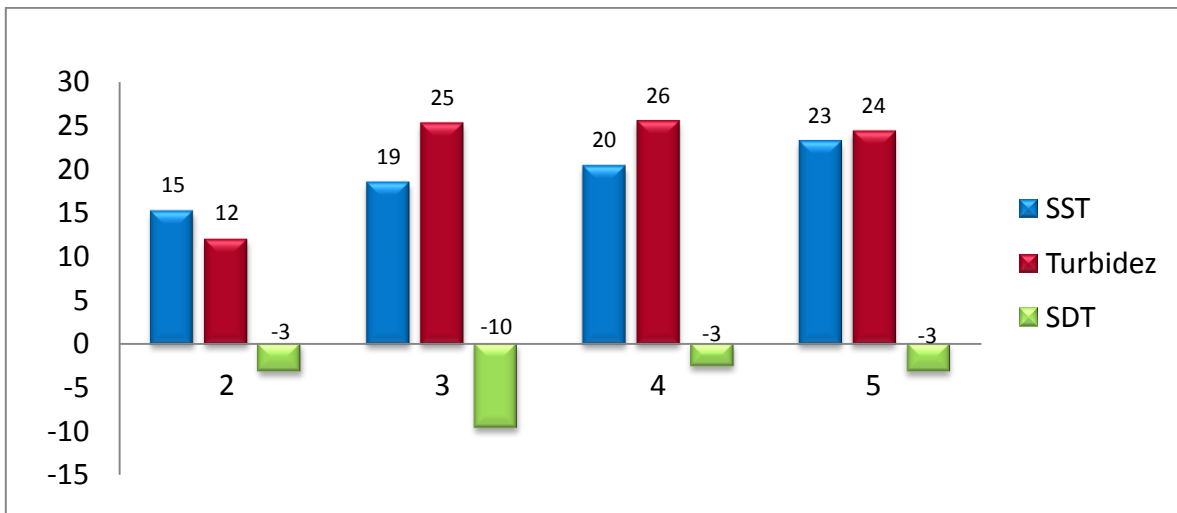


Figura 19. Combinaciones de filtros con mejores eficiencias de remoción, agua gris que contiene detergente líquido.

5.4 Selección del pre-tratamiento más adecuado

5.4.1 Criterios económicos

El costo de los materiales utilizados en cada pre-tratamiento se muestra en la Tabla 23 y

Tabla 24, como se aprecia, la coagulación-floculación resulta más costosa que la pre-filtración al final de cinco ciclos de lavado por el costo de los reactivos utilizados. En cambio, los materiales filtrantes servirán para llevar a cabo el pre-tratamiento más allá de 5 ocasiones por el mismo costo.

Desde este punto de vista, el uso de los pre-filtros ofrece una ventaja económica sobre la CF. Además, para llevar a cabo la CF, se requiere de energía extra a la de las membranas

para agitar el agua, por lo tanto, se estaría ahorrando el recurso hídrico por una parte, pero por otra, se estarían generando más emisiones de gases por el consumo de energía. Si bien las membranas representarán una buena inversión, se desea que el pre-tratamiento no afecte el costo total del sistema híbrido.

Tabla 23. Costo del material para un sistema de coagulación-floculación.

Insumo	Precio
Coagulante	\$ 43.00/ciclo
Total⁹	\$ 215.00

Tabla 24. Costo de los materiales utilizados para pre-filtración.

Material	Dimensiones de venta	Precio (\$/metro)
Filtro	90 cm de ancho	\$ 14.00
Popelina Bondeada	1.20 m de ancho	\$ 45.00
	Total¹⁰	\$ 189.00

5.4.2 Criterios ambientales

a) Cálculo de la generación de lodos

Durante las pruebas de CF se realizó el descarte de lodos, durante dicho procedimiento se recuperó el volumen de lodos producido en cada jarra y se cuantificó, arrojando los datos de la Tabla 25.

Tabla 25. Concentración media de lodos a diferentes velocidades y tiempos de floculación (mg/L).

Tiempo, min	DETERGENTE EN POLVO			DETERGENTE LÍQUIDO		
	Velocidad, rpm			Velocidad, rpm		
	10	15	20	10	15	20
10	59	149	307	113	152	-
15	62	141	203	142	157	146
20	367	160	183	149	167	174

⁹ Total en 5 ciclos de lavado

¹⁰ Para un cartucho de 1.6 m de longitud, tomando en cuenta 2 capas de cada uno de los materiales.

Como se determinó que la coagulación-floculación se llevaría a cabo a 20 rpm durante 10 minutos para el detergente en polvo (Tabla 21) y a 15 rpm durante 15 minutos para el líquido (Tabla 22), los lodos producidos en un ciclo de lavado normal con una carga de ropa alta que genera 166 L de agua gris serían los que se muestran en la Tabla 26.

Tabla 26. Lodos generados en un lavado de ropa habitual.

Detergente	Concentración media de lodos, mg/L	Volumen de agua, L	Lodos totales producidos, g
POLVO	307	166	51
LIQUIDO	157	166	26

Como se observa, la cantidad de lodos producidos es alta (51 y 26 g por ciclo de lavado para el agua gris que contiene detergente en polvo y líquido respectivamente) para manejarlos adecuadamente en las viviendas; en caso de no proporcionar el tratamiento adecuado, se puede impactar negativamente al ambiente si son arrojados al drenaje-agua o suelo. Entonces se tiene un problema importante de residuos secundarios al tratamiento, ya que dichos lodos son ricos en sales de aluminio, surfactantes y materia orgánica.

En contraparte, la pre-filtración es fácil de llevar a cabo, no requiere energía extra, ya que se puede la fuerza centrífuga de la lavadora y aunado a esto, los materiales son fáciles de manejar, se encuentran fácilmente en las tiendas departamentales, tienen un costo accesible y no generan residuos secundarios peligrosos al tratamiento. Por lo tanto, se escogió la pre-filtración como el pre-tratamiento a implementar en el sistema híbrido.

5.5 Efecto del pre-tratamiento en el desempeño del sistema híbrido

5.5.1 Caso I: Agua gris que contiene detergente en polvo.

En la Figura 20 se muestran los resultados de las pruebas realizadas con el sistema de tratamiento híbrido con membranas. En los dos primeros casos solo se evalúa el comportamiento de la microfiltración y el impacto de la pre-filtración en el resultado. En

el tercer y cuarto caso, se indica el mismo fenómeno solo que con la combinación de microfiltración, ultrafiltración y pre-filtración. En la última columna se ejemplifica el porcentaje de eliminación que ofrece el pre-tratamiento en SST, SDT y turbidez. Con esto se indica que del total removido por el tratamiento híbrido, el fieltro y popelina aportan esa eficiencia.

Se observa que en el caso de la microfiltración, el pre-tratamiento aumenta 6% la eliminación de sólidos suspendidos, 10% los sólidos totales y 1% la turbidez.

Al combinar microfiltración con ultrafiltración se alcanza un 96% de remoción en sólidos sin embargo al pre-filtrar el agua se alcanzan eficiencias más altas (98%) y el 100% de eliminación de turbidez (Se redujo de 108 a 0.5 NTU).

Si bien la contribución del pre-tratamiento no parece relevante, se debe recordar que la membrana corre el riesgo de obturarse y requerir un incremento de energía para filtrar el agua gris, por lo tanto a largo plazo, el uso de este pre-tratamiento contribuirá a mejorar el comportamiento y vida útil de la membrana.

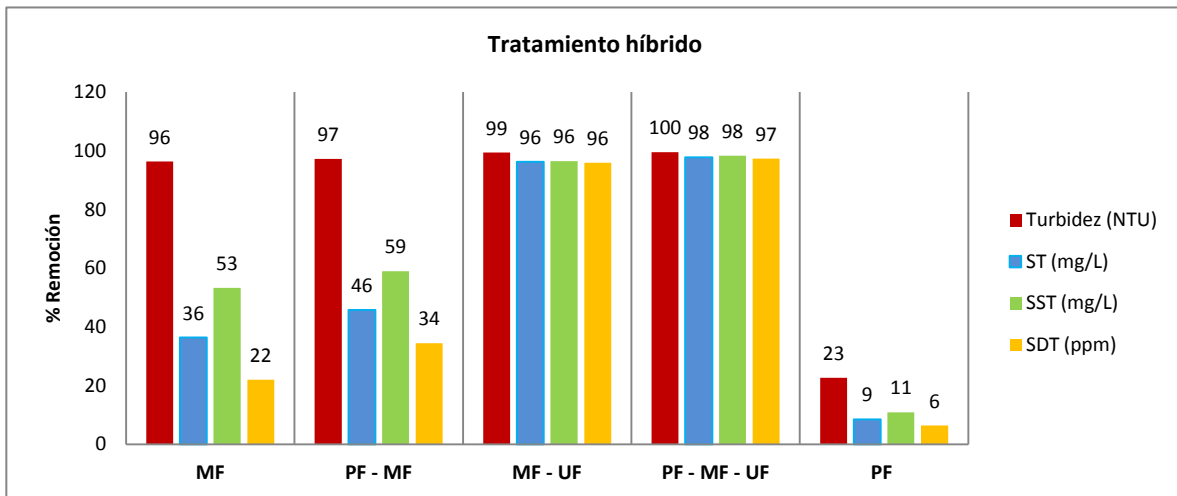


Figura 20. Eficiencias de tratamientos híbridos con membranas, detergente en polvo.
PF, pre-filtración; MF, microfiltración; UF, ultrafiltración.

Lo anterior se comprueba en la Figura 21, donde se ejemplifica la razón de flujo observada en el periodo de filtración. Se observa que tanto en la microfiltración como en la microfiltración – ultrafiltración (a excepción de dos puntos), el pre-tratamiento aumenta

el flujo hasta en 3 L/min. Tal caso es un indicador de la reducción en el taponamiento de la membrana con lo cual se puede alargar su vida útil.

Tales resultados favorecen el tratamiento híbrido y al mismo tiempo ayudan a mejorar el efluente tratado. En la Figura 22 se muestra una fotografía con agua gris, agua tratada con el sistema híbrido y agua producto de ósmosis inversa. Se observa que el agua tratada con el sistema propuesto luce tan limpia como la que se produce con ósmosis inversa, por lo que resulta socialmente aceptable para usos no potables.

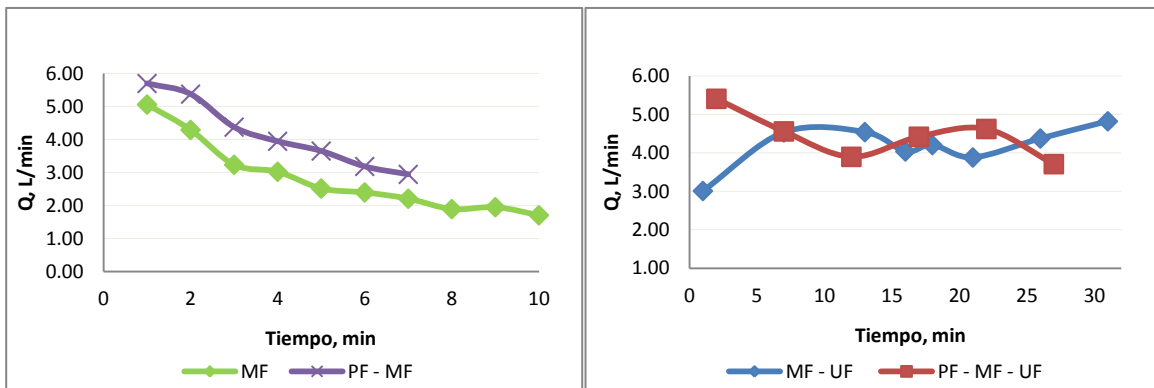


Figura 21. Flujo de permeado con y sin pre-tratamiento, detergente en polvo.



Figura 22. Agua gris y agua tratada con el sistema híbrido.

De izquierda a derecha se presenta un vaso con agua producto de ósmosis inversa, en medio una muestra que paso por PF-MF-UF y en último lugar se encuentra el agua gris recolectada de la lavadora.

En la Tabla 27 se muestra la calidad final del efluente tratado, con los dos sistemas híbridos y su equivalente sin el pre-tratamiento. Si bien, la PF-MF aclara en gran medida el

agua, no alcanza a cumplir con los lineamientos de la norma NOM-003-ECOL-1997 para agua de reuso en servicios al público. No obstante, al implementar PF-MF-UF sí se cumple con la norma en cuestión de SST, coliformes fecales, huevos de helminto, materia flotante y metales pesados (estos últimos no se encontraban en la muestra original).

Por lo tanto no es suficiente utilizar únicamente microfiltración en el sistema híbrido, es necesario implementar PF-MF-UF para poder cumplir con lo establecido por la ley.

Tabla 27. Calidad del efluente tratado con agua gris que contiene detergente en polvo.

	Sistemas híbridos y no híbridos			
	MF	PF - MF	MF - UF	PF - MF - UF
pH	8.57	8.38	7.44	7.32
T (°C)	24.7	22.5	22.7	24.5
Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}^2$)	1537	1302	79	51
SDT (ppm)	775	651	40	26
Turbidez (NTU)	3.87	2.93	0.63	0.52
ST (mg/L)	1174	1001	70	40
SST (mg/L)	399	350	30	14

5.5.2 Caso II: Agua gris que contiene detergente líquido.

Se llevó a cabo el mismo procedimiento que con el detergente en polvo y también se observó esa tendencia de mejora con el uso del pre-tratamiento. En cuanto a los sólidos totales se mejoró en 3% la eficiencia del sistema con PF – MF – UF mientras que con la MF y la PF – MF este incremento llegó hasta un 5%.

Asimismo, para los sólidos disueltos se incrementó la eliminación en 3% con el uso de la pre-filtración, además de un mayor filtrado. Estas tendencias se muestran en la Figura 24, ahí se distingue claramente como en PF – MF – UF el flujo es notoriamente mayor al existente sin el pre-tratamiento (filtrando el mismo volumen de agua), en este caso, se requirieron 12 minutos más en la combinación MF – UF que en su equivalente con pre-tratamiento.

De esta manera se concluye definitivamente que llevar a cabo la pre-filtración antes de utilizar las membranas es de vital importancia para el sistema si se quiere mejorar su

desempeño y si se desea un consumo energético razonable. Además puede representar un ahorro económico en el consumo de energía del sistema híbrido.

En la Tabla 28 se aprecia que la pre-filtración mejora en todos los casos los parámetros de calidad y que el efecto de la ultrafiltración es necesario para obtener agua de calidad suficiente para ser reutilizada en las actividades domésticas ya que se sobrepasaría los límites establecidos por la ley.

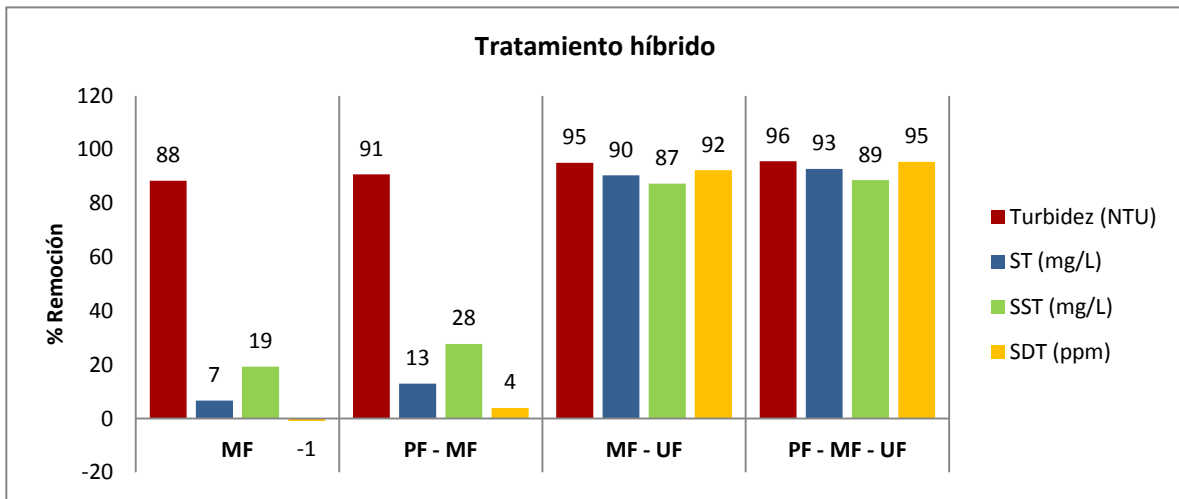


Figura 23. Eficiencias de tratamientos híbridos con membranas, detergente líquido.
 PF, pre-filtración; MF, microfiltración; UF, ultrafiltración.

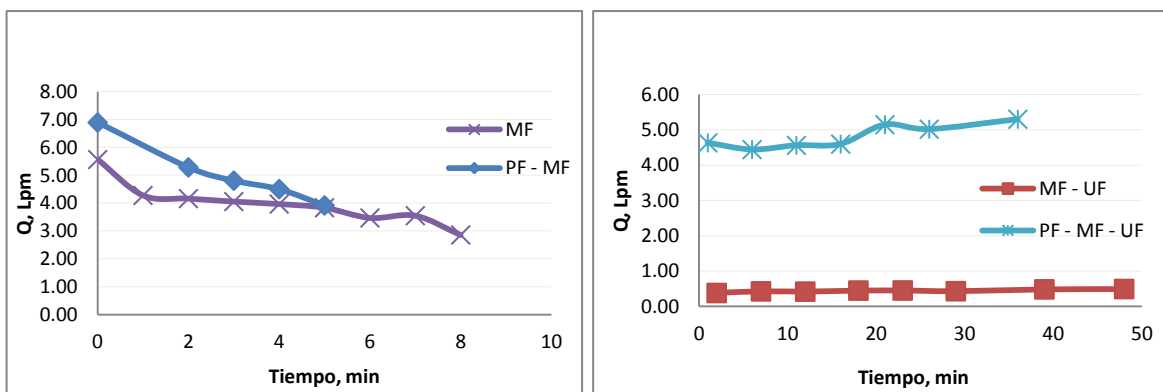


Figura 24. Flujo de permeado con y sin pre-tratamiento, detergente líquido.

Tabla 28. Calidad del efluente tratado con agua gris que contiene detergente líquido.

	LIQUIDO			
	MF	PF-MF	MF-UF	PF-MF-UF
pH	7.88	7.78	7.21	6.73
T (°C)	28.6	30.8	27.2	24.3
Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}^2$)	1056	1007	79	47
SDT (ppm)	530	504	40	24
Turbidez (NTU)	2.45	1.94	1.03	0.916
ST (mg/L)	786	733	80	60
SST (mg/L)	256	229	40	36

6. Conclusiones y recomendaciones

6. Conclusiones y recomendaciones

6.1. Conclusiones

Durante la investigación se determinó que el agua gris que contiene detergente en polvo modifica en mayor medida las características del agua potable en comparación con el agua gris que contiene detergente líquido (principalmente en SST, turbidez y SDT), sin embargo es posible que el detergente líquido altere negativamente el medio ambiente por su composición química.

La coagulación-floculación mejora las características del agua gris, disminuye hasta un 70% los SST en ambos detergentes, además elimina en buena medida la concentración de SDT y turbidez, pese a esto no es un procedimiento factible ya que genera una gran masa de lodos por ciclo de lavado que deben disponerse adecuadamente para no afectar el entorno. Además genera altos costos de instalación y probablemente de operación y mantenimiento.

El descarte, volumen y manejo de lodos, el tamaño del equipo y la precisión para agregar la dosis adecuada de coagulante en comparación con la practicidad, economía y eficiencia de los filtros propició que se descartara el proceso de coagulación-floculación del sistema híbrido.

Se probó la capacidad de cada material filtrante para retener sólidos y turbidez, sin embargo el resultado no fue tan alentador como las combinaciones entre los filtros que habían tenido mejores eficiencias de eliminación. De estas combinaciones, el fieltro y popelina bondeada resultaron ser los filtros con mejor desempeño en el tratamiento del agua gris; se encontró que para alcanzar hasta un 30% en reducción de SST se deben combinar 2 capas de fieltro y 2 de popelina, con el poro más ancho de la popelina teniendo el contacto directo con el agua gris y el poro más pequeño del fieltro al final de la capa de filtros.

La pre-filtración con materiales de uso común permite remover SST y turbidez a un bajo costo (económico y ambiental); además, es una operación sencilla que cualquier persona puede llevar a cabo.

El uso de PF en el sistema híbrido tiene un alto impacto en el aumento del caudal permeado, lo cual es un indicador de reducción en el taponamiento de la membrana. Se encontró que el uso de la pre-filtración mejora la eficiencia de la microfiltración en la remoción de SST; aun así, el filtrado obtenido no cumple con los límites permisibles establecidos por la norma NOM-003-ECOL-1997 para los SST.

Al implementar microfiltración y ultrafiltración con el pre-tratamiento propuesto, se redujo la turbidez a menos de una unidad¹¹ y se aumentó el flujo de permeado de 0.5 a 5 L/min reduciendo el taponamiento de la membrana y alcanzando una eficiencia en remoción de SST del 90 al 95% con una presión de operación de 120 psi. De tal manera, es necesario implementar ultrafiltración en el sistema híbrido para poder cumplir con los parámetros de la norma en SST, coliformes fecales, huevos de helminto, materia flotante y metales pesados.

El permeado obtenido tiene la calidad suficiente para ser reutilizado en el inodoro, en el mismo lavado de ropa, e incluso en la regadera. Asimismo se puede aplicar en sitios donde se presten servicios que generen agua gris por el lavado de ropa como lo son lavanderías, hoteles, restaurantes, hospitales, etc.

Cabe destacar que esta investigación se llevó a cabo bajo condiciones críticas, ya que se utilizó la máxima cantidad de detergente recomendada, por lo tanto, el agua gris estaba altamente concentrada. Es por esto que los resultados obtenidos pueden superarse con el agua gris habitual, que presenta una concentración más baja de contaminantes.

¹¹ La norma oficial mexicana 127 indica que el agua potable no debe contener más allá de 5 NTU.

6.2. *Recomendaciones*

Durante la realización de este trabajo se desprenden diferentes dudas, observaciones y áreas de oportunidad donde se puede explorar en futuras investigaciones, algunas de ellas se presentan a continuación:

- Es recomendable evaluar qué tan sensible es el sistema híbrido con diferentes marcas de detergente, de esta manera se puede comprobar si es factible generalizar el proceso para todos los tipos de detergentes.
- Determinar el impacto ambiental del detergente líquido en comparación con el detergente en polvo.
- Sería interesante evaluar el efecto de los suavizantes en la coagulación-floculación. Asimismo, se pueden evaluar productos alternos de limpieza como cloro o quitamanchas.
- Durante esta investigación no se modificó el pH ya que el coagulante trabajó satisfactoriamente al pH de la muestra de agua, sin embargo se puede evaluar su efecto en un efluente de agua gris mezclada donde no solo existe la descarga de la lavadora sino también la de las regaderas y lavabos por lo tanto se espera que la concentración de sólidos, detergente y pH varíen. En el proceso de filtración con membranas se observa que el agua de rechazo tiene una alta concentración de detergente debido a que se visualiza muy blanca al salir, por esto sería muy interesante llevar a cabo una caracterización y determinar la posibilidad de recuperar el detergente presente en el agua gris.

Referencias

Abu-Zreig, M., Rudra, P., & Dickinson, T. (2003). Effect of application of surfactants on hydraulic properties of soils. *Biosystems Engineering*, 84, 363-372.

Ahmad, J., Ahmed, A.-F., Sanmugan, P., & Ali Al, H. (2008). Evaluating greywater reuse potential for sustainable water resources management in Oman. *Environmental Monitoring & Assessment*, 137 (1-3), 315-327.

Al-Jayyousi, O. R. (2003). Greywater reuse: towards sustainable water management. *Desalination*, 156, 181-192.

Asano, T., Burton, F. L., Leverenz, H. L., Tsuchihashi, R., & Tchobanoglous, G. (2007). *Water Reuse, Issues, Technologies, and Applications*. United States of America: McGraw-Hill.

Budd, G., Hess, A., Shorney-Darby, H., Neemann, J., Spencer, C., Bellamy, J., Hargette, P. (2004). Coagulation applications for new treatment goals. *Journal AWWA*, 102-113.

CONAGUA. (2010). *Estadísticas del agua en México*. México: Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Contreras Rivero, J. d. (2003). *Selección de un coagulante óptimo para el tratamiento de los efluentes residuales del ITESM, campus Monterrey*. Monterrey, N.L.

Crittenden, J. C., Trussell, R. R., Hand, D. W., Howe, K. J., & Tchobanoglous, G. (2005). *Water Treatment: Principles and Design*. New Jersey: Willey.

D. Letterman, R. (1999). *Water Quality and Treatment* (Fifth ed.). United States of America: McGraw-Hill.

Erickson, E., Auffarth, M., & Ledin, H. a. (2002). Characteristics of greywater. *Urban Water*, 4, 85-104.

Fewkes, A. (1996). Field testing of a rain water collection and reuse system. *Proc. Water Recycling: Technical and Social Implications* .

Friedler, E., Kovalio, R., & Galil, N. (2005). On-site greywater treatment and reuse in multi-storey buildings. *Water Science & Technology*, *51*, 187-194.

Gilron, J., Belfer, S., Vaisanen, P., & Nystrom, M. (2001). Effects of surface modification on antifouling and performance properties of reverse osmosis membranes. *140*, 167-179.

Goosen, M., Sablani, S., Al-Hinai, H., Al-Obeidani, S., Al-Belushi, R., & Jackson, D. (2005). Fouling of reverse osmosis and ultrafiltration membranes: a critical review. *Separation Science and Technology*, *39*, 2261-2297.

Gross, A., Azulai, N., Oron, G., Ronen, Z., & Arnold, M. (2005). Environmental impact and health risks associated with greywater irrigation: a case of study. *Water Science & Technology*, *52*, 161-169.

Gual, M., Moià, A., & March, J. (2008). Monitoring of an indoor pilot plant for osmosis rejection and greywater reuse to flush toilets in a hotel. *Desalination*, *219*, 81-88.

Howe, K., Maewah, A., Chiu, K., & Adhamn, S. (2006). Effect of coagulation on the size of MF and UF membrane foulants. *Environmental Science and Technology*, *40*, 7908-7913.

INEGI. (22 de Marzo de 2009). *Estadísticas a propósito del Día Mundial del Agua*. Recuperado el 27 de Agosto de 2009, de <http://www.inegi.org.mx/inegi/contenidos/espanol/prensa/default.asp?c=269&e=>

Jacangelo, J. G., & Noack, R. K. (2005). System Concepts. En A. W. Association, *Microfiltration and ultrafiltration membranes for drinking water* (págs. 51-64). Denver: American Water Works Association.

Jefferson, B., Judd, S., & Diaper, C. (2001). Treatment methods for grey water. En *Decentralized sanitation and reuse* (págs. 335-353). London: IWA publishing.

Jefferson, B., Melin, T., Bixio, D., Thoeye, C., De wilde, W., De Koning, J., Van der Graaf, J., Wintgens, T. (2006). Membrane bioreactor technology for wastewater treatment and reuse. *Desalination*, *187*, 271-282.

Jefferson, B., Palmer, A., Jeffrey, P., Stuetz, R., & Judd, S. (2004). Greywater characterisation and its impact on the selection and operation of technologies for urban reuse. *Water Science and Technology*, *50*, 157-164.

Jeppesen, B. (1995). Domestic greywater re-use: Australia's challenge for the future. *Desalination*, *106*, 311-315.

Jiménez Cisneros, B. E. (2001). *La Contaminación Ambiental en México. Causas, efectos y tecnología apropiada*. Cd. de México: Limusa.

Kabsch-Korbutowicz, M. (2005). Application of ultrafiltration integrated with coagulation for improved NOM removal. *Desalination*, *174*, 13-22.

Kerri, K. D., Dendy, B. D., Brady, J., & Crooks, W. (2008). *Operation of wastewater treatment plants* (Vol. I). Sacramento: University Enterprises, Inc.

Kilduff, J., Mattaraj, S., Zhou, M., & Belfort, G. (2005). Kinetics of membrane flux decline: the role of natural colloids and mitigation via membrane surface modification. *Nanoparticle Research*, *7*, 525-544.

Kim, R.-H., Lee, S., Jeong, J., Lee, J.-H., & Kim, Y.-K. (2007). Reuse of greywater and rainwater using fiber filter media and metal membrane. *Desalination*, *202*, 326-332.

Kuhnt, G. (1993). Behavior and fate of surfactants in soil. *Environmental Toxicology Chemistry*, *12*, 1813-1820.

Le-Clech, P., Jefferson, B., & Judd, S. (2003). Impact of aeration, solids concentration and membrane characteristics on the hydraulic performance of a membrane bioreactor. *Journal of Membrane Science*, *218*, 117-129.

Letterman, R., Amirtharajah, A., & O'Melia, C. (1999). *Coagulation and Flocculation in Water Quality and Treatment*. New York: McGraw-Hill.

Lettinga, G., Lens, P., & Zeeman, G. (2001). Environmental protection technologies for sustainable development. En *Decentralised sanitation and reuse (DESAR)* (págs. 4-10). London: IWA publishing.

Liang, h., Gong, W., Chen, J., & Li, G. (2008). Cleaning fouled ultrafiltration (UF) membrane by algae during reservoir water treatment. *Desalination*, 220, 267-272.

Lipscomb, G. G. (2008). Membrane separation technology: Past, present and future. En W. H. Flank, & M. A. Abraham (Edits.), *Innovations in industrial and engineering chemistry* (Vol. 1000, págs. 281-323). Toledo, Ohio: American Chemical Society.

López Andrade, X., Mijaylova Nancheva, P., & Martínez Pereda, P. *Caracterización y tratabilidad físico-química de aguas residuales jabonosas para su reúso*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, DEPI-UNAM CAMPUS Morelos, Jiutepec.

Masi, F. (2009). Water reuse and resources recovery: the role of constructed wetlands in the ecosan approach. *Desalination*, 246, 27-34.

National Academy of Sciences. (2008). *El agua potable segura es esencial*. Recuperado el 11 de Marzo de 2010, de <http://www.drinking-water.org/html/es/Treatment/Coagulation-Flocculation-technologies.html#tech0>

Nghiem, L. D., Oschmann, N., & Schäfer, A. I. (2006). Fouling in greywater recycling by direct ultrafiltration. *Desalination*, 187, 283-290.

Nolde, E. (2000). Greywater reuse systems for toilet flushing in multi-storey buildings - over ten years experience in Berlin. *Urban Water*, 1, 275-284.

Norton, J. W., & Weber Jr., W. J. (2006). Breakeven costs for distributed advanced technology water-treatment systems. *Water Research*, 40, 3541-3550.

Park, P. K., Lee, C. H., Choib, S. J., Choo, K. H., Kimd, S. H., & Yoone, C. H. (2002). Effect of the removal of DOMs on the performance of coagulation-UF membrane system production. *Desalination*, 145, 237-245.

Qasim, S. R. (1999). *Wastewater treatment plants: Planning, design and operation*. United States of America: CRC Press LCC.

Romero, J. A. (2008). *Tratamiento de aguas residuales, Teoría y principios de diseño*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.

Sablani, S., Goosen, M., Al-Belushi, R., & Wilf, M. (2001). Concentration polarization in ultrafiltration and reverse osmosis: a critical review. *Desalination*, 39, 269-289.

Schwinge, J., Neal, P., Wiley, D., Fletcher, D., & Fane, A. (2004). Spiral wound modules and spacers - Review and analysis. *Membrane Science*, 124, 129-153.

Shafran, A., Gross, A., Ronen, Z., Weisbrod, N., & Adar, E. (2005). Effects of surfactants originating from reuse of greywater on capillary rise in the soil. *Water Science & Technology*, 52, 157-166.

United Nations Environment Programme Division of Technology, I. a. (2005). *Water and wastewater reuse: An environmental sound approach for sustainable urban water management*. Recuperado el 11 de Marzo de 2010, de http://www.unep.or.jp/letc/Publications/Water_Sanitation/wastewater_reuse/index.asp

United Nations Environment Programme. (2010). *UNEP Year Book 2010 New Science and developments in our changing environment*. Recuperado el 11 de Marzo de 2010, de <http://www.unep.org/yearbook/2010>

Weber, J. W. (2002). Distributed optimal technology networks: a concept and strategy for potable water sustainability. *Water Science and Technology*, 46, 241-246.

Weber, J. W. (2004). Optimal uses of advanced technologies for water and wastewater treatment in urban environments: Water Science and Technology. *Water Supply*, 4, 7-12.

Wilderer, P. (2001). Decentralized versus centralized wastewater management. En *Decentralized sanitation and reuse* (págs. 39-54). London: IWA publishing.

Xia, S., Li, X., Zhang, Q., Xu, B., & Li, G. (2007). Ultrafiltration of surface water with coagulation pretreatment by streaming current control. *Desalination*, 204, 351-358.

Xiangli, Q., Zhenjia, Z., Nongcun, W., Wee, V., Low, M., Loh, C., y otros. (2008). Coagulation pretreatment for a large-scale ultrafiltration process treating water from the Taihu river. *Desalination*, 230, 305-313.

Yeomans Galli, L. M. (2001). *Evaluación de la tecnología de membranas en la generación de agua de reuso para la industria manufacturera de alfombras*. Monterrey: Tesis de maestría.

Anacos

Anexo I

*Determinación de las condiciones óptimas de Coagulación-Floculación.
Resultados en las pruebas de laboratorio.*

Tabla 29. Efecto de la dosis de coagulante en las eficiencias de remoción (Detergente en polvo).

Dosis de coagulante	Porcentajes de Remoción (%)				
	Turbidez	Conductividad	SST	SDT	DQO
68.4	46	34	45	34	60
136.8	43	33	48	33	60
205.2	64	32	50	34	60
273.6	65	32	51	33	60
342	2	33	43	34	80
410.4	35	32	47	34	60

Los datos iniciales en el agua gris en cuanto a pH se encontraban entre 10.32 ± 0.1 y en conductividad $2829 \pm 32 \mu\text{S}/\text{cm}^2$.

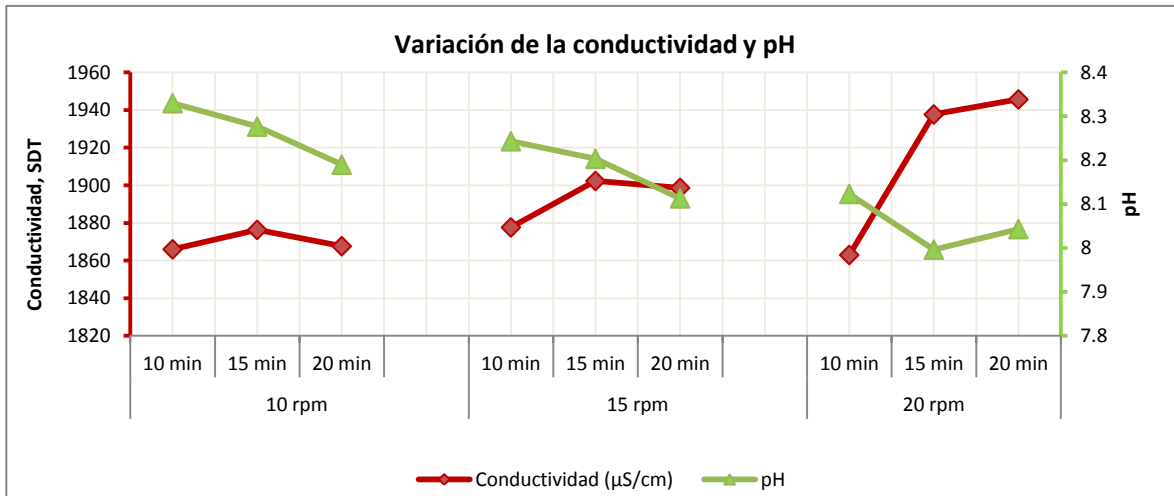


Figura 25. Variación del pH y la conductividad con la velocidad de mezclado en la floculación, detergente en polvo.

Tabla 30. Efecto de la dosis de coagulante en las eficiencias de remoción (Detergente líquido).

Dosis de coagulante	Porcentajes de Remoción (%)				
	Turbidez	Conductividad	SST	SDT	DQO
68.4	16	9	19	10	50
136.8	-4	8	32	7	50
205.2	-27	6	33	5	50
273.6	52	5	44	7	50
342	52	5	39	7	50
410.4	45	3	41	5	50

Tabla 31. Efecto de la concentración de detergente líquido en las eficiencias de remoción de turbidez.

Concentración del detergente (ml/L)	Dosis de Coagulante (mg/L)	% Remoción	Concentración del detergente (ml/L)	Dosis de Coagulante (mg/L)	% Remoción
1.08	34	51	0.72	34	68
1.08	68	57	0.72	68	71
1.08	137	80	0.72	137	71
1.08	205	63	0.72	205	63
1.08	410	76	0.72	410	79
0.96	34	53	0.6	34	74
0.96	68	66	0.6	68	70
0.96	137	73	0.6	137	72
0.96	205	71	0.6	205	70
0.96	410	76	0.6	410	115
0.84	34	60	0.48	34	73
0.84	68	67	0.48	68	66
0.84	137	72	0.48	137	76
0.84	205	77	0.48	205	67
0.84	410	76	0.48	410	80

Los datos iniciales de agua gris se presentaban entre 7.96 ± 0.16 en pH y $666 \pm 46 \mu\text{S}/\text{cm}^2$ en conductividad.

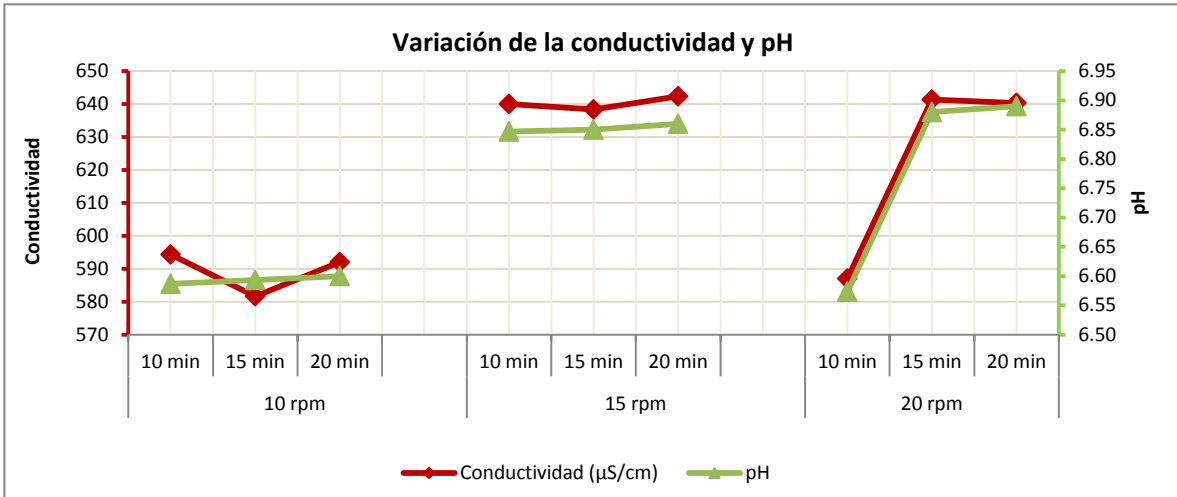


Figura 26. Variación del pH y la conductividad con la velocidad de mezclado en la floculación, detergente líquido.

Anexo II

Características de los detergentes utilizados

Tabla 32. Ingredientes activos en la formulación del detergente en polvo Viva®¹².

Ingredientes	Observaciones
1 Sulfato de sodio	
2 Triposulfato de sodio	
3 Surfactante aniónico	Facilita la floculación con Al ⁺³
4 Carbonato de sodio	
5 Silicato de sodio	
6 Agente antirredepositante	Dificulta la formación de flóculos
7 Perfume	
8 Enzima	
9 Abrillantadores ópticos	
10 Colorante	

Tabla 33. Ingredientes activos en la fórmula del detergente líquido Mas color®¹².

Ingredientes	Observaciones
Agua	
Surfactantes aniónicos	
Sal	
Conservador	
Perfume	
Polímero	
Abrillantador óptico	
Enzima celulasa, proteasa y amilasa	
Colorante	
No contiene fosfatos	

¹² Según la etiqueta del fabricante

Anexo III
Características de los materiales filtrantes

Tabla 34. Características y costos de los materiales filtrantes utilizados.

Material	Dimensiones de venta	Precio (Pesos/metro)
Polyespuma	Placa de 45x45x3 cm	\$20.00
Guata	Tela de 1.50 m de ancho	\$19.00
Fieltro	Tela de 90 cm de ancho	\$14.00
Popelina Bondeada	Tela de 1.20 m de ancho	\$45.00
Microfiltro	Bolsa filtrante de 10 μ m	\$130.00 (bolsa)

Anexo IV

Análisis estadístico de los datos en coagulación – floculación.

En la Tabla 35 se recopilan los resultados de remoción en SST obtenidos a las tres velocidades y tres tiempos de mezclado. Para tener un resultado confiable, se tomaron en cuenta tres repeticiones en cada caso cuyos datos también se integran en la misma tabla.

Con el uso de minitab se evaluó la distribución de los datos utilizando las gráficas que se presentan en la Figura 27, donde se identificó una tendencia con distribución normal, ya que en su mayoría se alinean a la línea recta, a excepción de dos puntos que no siguen este comportamiento, lo cual se puede deber a valores atípicos producto de un error en la medición. Así también en la gráfica residuo vs ajustes se puede observar que no se presenta un patrón de distribución definida de los puntos, lo cual indica que éstos tienen una varianza constante.

Tabla 35. Porcentajes de remoción en SST a diferentes velocidades y tiempos de mezclado con tres réplicas.

Tiempo	POLVO			LIQUIDO		
	Velocidad			Velocidad		
	10 rpm	15 rpm	20 rpm	10 rpm	15 rpm	20 rpm
10 min	49	49	86	33	39	33
	39	46	69	32	46	34
	44	56	63	33	44	48
15 min	66	46	49	33	47	49
	55	50	49	38	47	41
	66	53	52	38	47	49
20 min	75	51	48	42	43	40
	69	50	58	38	44	51
	58	56	46	41	44	51

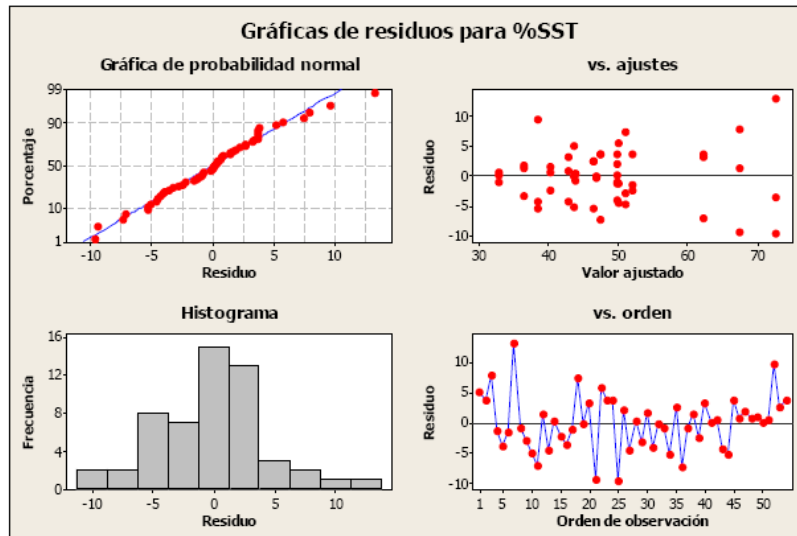
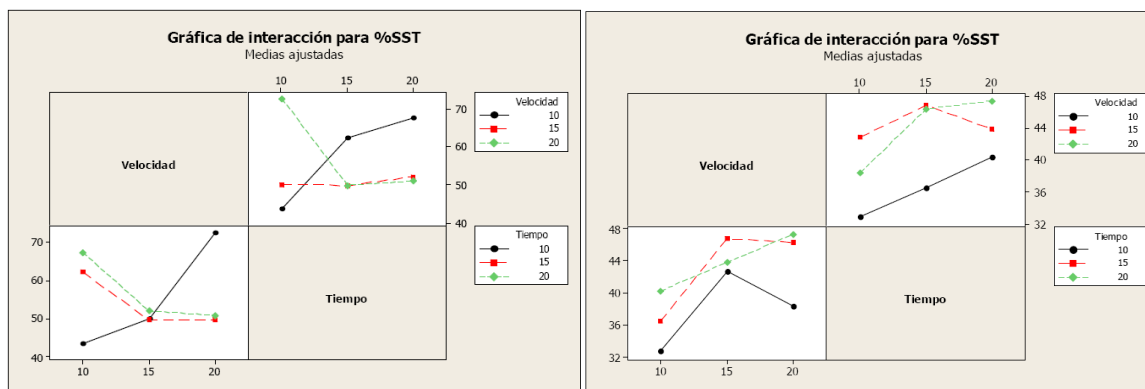


Figura 27. Gráficas de residuos para el porcentaje de SST removidos con todos los datos.

A partir de conocer la distribución normal de los datos, se procedió a analizar las interacciones dobles de los factores a través de gráficas de interacción. En la Figura 28 se muestran las interacciones entre velocidad y tiempo tanto para el detergente en polvo como para el líquido. En el primer caso, la gráfica de la segunda columna indica que a un tiempo de 10 minutos y con una velocidad de 20 rpm se obtiene un porcentaje de remoción en SST de 72.59%, seguido de la combinación con velocidad de 10 rpm durante 20 minutos, en la que se obtiene un porcentaje de remoción del 67.4%. Con la primer combinación (20 rpm, 10 min) se logra 5.19% más remoción en SST que en la segunda combinación. Una vez identificadas las condiciones ideales solo resta definir si esta cantidad es significativa, tomando en cuenta que es más conveniente ahorrar, tiempo o energía, ya que a mayor velocidad se requiere mayor potencia en el motor para agitación.

Las gráficas correspondientes al detergente líquido muestran que a una velocidad de 20 rpm durante 20 minutos se obtiene el mayor porcentaje de remoción en SST (47.33%), seguido de la velocidad 15 rpm durante 15 minutos con 46.77% de sólidos removidos. Estos valores son muy parecidos, por lo tanto se debe analizar que condición convendría más para el tratamiento.



a) b)
Figura 28. Gráficas de interacción para los dos detergentes.
 a) Detergente en polvo; b) Detergente líquido.

Para elegir la combinación más adecuada, se analizaron las siguientes consideraciones:

- El requerimiento energético del motor estará dado por la velocidad de coagulación, por lo que la velocidad de floculación no juega un papel importante en la toma de decisiones.
- ¿La interacción tiempo – velocidad – tipo de detergente es significativa para la toma de decisiones?
- ¿Se pueden generalizar las condiciones de operación para el agua gris sin importar el tipo de detergente que se utilice?

Además de la inversión inicial realizada en el motor de agitación, se debe tomar en cuenta el costo de operación y mantenimiento del sistema, por ello, se debe evaluar la significancia de la velocidad y el tiempo con respecto a la variable de respuesta que es la eficiencia de remoción en SST.

Para evaluar el efecto que tiene la naturaleza del detergente, velocidad y tiempo de floculación en el resultado final, se llevó a cabo una gráfica de factores potencialmente significativos en minitab (Figura 29), en donde se muestra el efecto individual que tiene cada factor sobre el porcentaje de remoción en SST.

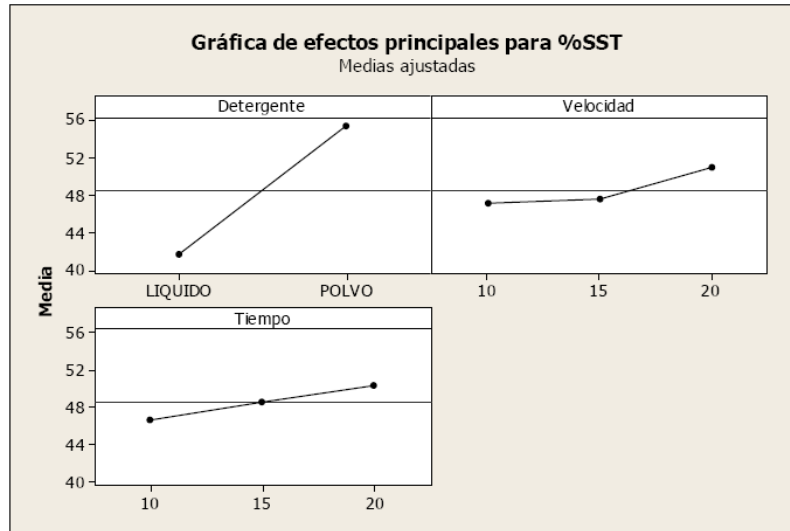


Figura 29. Gráfica de efectos principales para el porcentaje de SST removidos.

En la gráfica se observa que el factor más significativo es el “Detergente” ya que existe un aumento considerable en el porcentaje de remoción entre el polvo y el líquido, mientras tanto, al cambiar la “Velocidad” y el “Tiempo” no se presenta una variación significativa entre sus niveles.

Esto demuestra la variación en los resultados obtenidos en el estudio, donde se tienen muy buenos resultados al tratar el agua gris que contiene detergente en polvo en comparación con el líquido. El efecto del detergente se debe a que al utilizar un detergente en polvo se cuenta desde un inicio con partículas suspendidas fácilmente de encapsular, a diferencia del líquido donde todo se encuentra disuelto en el agua, además de los componentes que integran cada detergente.

De manera que ya se identificó estadísticamente el factor significativo en el tratamiento (Tipo de detergente) y como se mencionó en secciones anteriores, cada caso tiene sus parámetros óptimos de operación particulares, de manera que, para determinar si existe diferencia significativa entre las condiciones de operación con un detergente y otro, se realizó en minitab una gráfica de interacción donde se analizan las interacciones dobles con al menos dos de los factores utilizados. En la Figura 30 se pueden observar estas interacciones.

La primera gráfica señala la interacción entre los factores “Detergente” y “Velocidad”, en primer instancia indica que al utilizar detergente en polvo a cualquier velocidad de mezclado se obtiene un mayor porcentaje de remoción de SST; así también, es importante observar que al tener una velocidad de 20 rpm tanto con detergente en polvo como líquido, el porcentaje de SST removido es mayor en comparación con las otras velocidades (44% y 57.77% en promedio, respectivamente). Además es importante observar como en una velocidad de 10 rpm sí influye notablemente el tipo de detergente que se utilice sobre el porcentaje de remoción, ya que con el detergente líquido se remueve 36.52% mientras que con el polvo alcanza el 57.77% a 20 rpm.

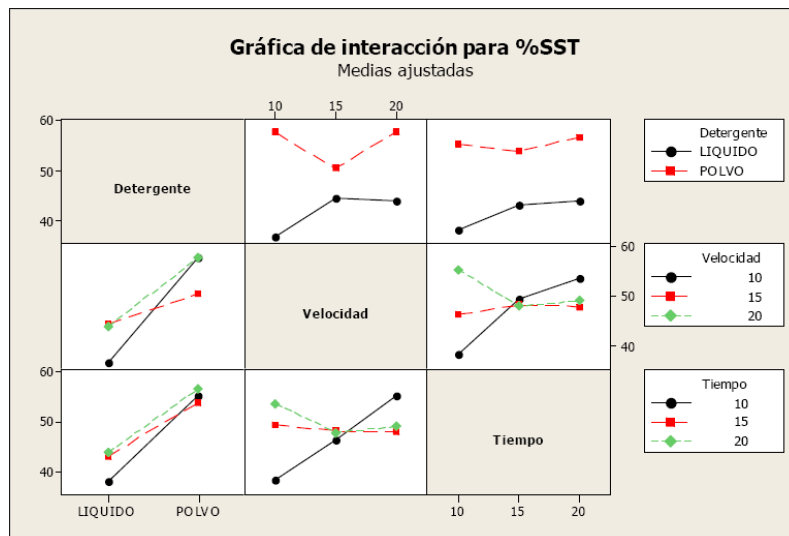


Figura 30. Gráfica de interacción detergente – velocidad – tiempo en el porcentaje de remoción de SST.

El segundo gráfico de la columna izquierda muestra la interacción entre los factores “Detergente” y “Tiempo”, en ésta se observa también que a cualquier tiempo de mezclado utilizando el detergente en polvo se obtiene un mayor porcentaje de remoción de SST; con un tiempo de 20 min, tanto con detergente líquido como en polvo se obtienen mayores porcentajes de remoción (43.82% y 56.82% en promedio, respectivamente); asimismo, con un tiempo de 10 minutos se observa cómo influye notablemente el tipo de detergente utilizado, ya que con Mas Color® se remueve un 37.96%, mientras que con Viva® solo 55.4% de SST.

Con esta información se concluye que al utilizar detergente en polvo es indistinto el tiempo que se mezcle el agua, ya que a 10 o 20 minutos se obtienen valores muy similares de remoción, con menos de 2% en diferencia (20 minutos tiene la ventaja), sin embargo, por cuestiones de ahorro, se recomendaría utilizar 10 minutos.

Las gráficas de la columna central señalan como interactúa el tipo de detergente con el tiempo y la velocidad de mezclado. La primera gráfica indica la interacción entre los factores “Velocidad” y “Detergente”, en esta se puede observar cómo con detergente en polvo se obtienen mayores porcentajes de remoción de SST a cualquier velocidad en comparación con el detergente líquido; en cuanto al detergente en polvo, a velocidades de 10 rpm y 20 rpm se presentan las más altas eficiencias (57.77% en promedio para ambos casos), mientras que para el detergente líquido los mayores porcentajes se alcanzan con velocidades de 15 rpm y 20 rpm, obteniéndose valores de 44.45% y 44% en promedio respectivamente.

En la segunda gráfica de la columna central se muestra la interacción entre los factores “Velocidad” y “Tiempo”, en ésta es importante hacer notar que la mayor remoción se logra con un tiempo de 10 minutos a una velocidad de 20 rpm (55.56% en promedio) seguido del 53.84% obtenido de utilizar un tiempo de 20 minutos a una velocidad de 10 rpm.

Las gráficas de la columna derecha señalan como interactúan tanto el tipo de detergente como la velocidad con el tiempo de mezclado. La primera gráfica indica la interacción entre los factores “Tiempo” y “Detergente”, en ella se puede observar cómo con detergente en polvo se obtienen mayores porcentajes de remoción de SST a cualquier tiempo que con detergente líquido; en cuanto al detergente en polvo, a 10 y 20 minutos se presentan los más altos porcentajes, mientras que para el detergente líquido los se alcanzan a tiempos de 15 y 20 minutos, obteniéndose valores de 43.2% y 43.82% en promedio respectivamente.

La segunda gráfica de la columna derecha muestra la interacción entre los factores “Tiempo” y “Velocidad”, en ésta es importante hacer notar que el mayor porcentaje de

remoción se alcanza con el detergente en polvo a una velocidad de 20 rpm y un tiempo de 10 minutos (55.46%), seguido del alcanzado con una velocidad de 10 rpm y un tiempo de 20 minutos (53.84%), la diferencia entre ambas combinaciones es de 1.62%.

El “Diseño Factorial General” utilizado para el análisis estadístico de los datos requiere complementarse con un análisis de varianza para justificar el resultado final, en este caso, se corrió un modelo lineal general con los factores “Detergente”, “Velocidad” y “Tiempo”, así como sus interacciones. La ANOVA resultante se muestra a continuación:

Modelo lineal general: %SST vs. Detergente, Velocidad, Tiempo

Factor	Tipo	Niveles	Valores
Detergente	fijo	2	LIQUIDO, POLVO
Velocidad	fijo	3	10, 15, 20
Tiempo	fijo	3	10, 15, 20

Análisis de varianza para %SST, utilizando SC ajustada para pruebas

Fuente	GL	SC sec.	SC ajust.	MC ajust.	F
Detergente	1	2542.87	2542.87	2542.87	84.79
0.000					
Velocidad	2	152.32	152.32	76.16	2.54
0.093					
Tiempo	2	118.84	118.84	59.42	1.98
0.153					
Detergente*Velocidad	2	512.77	512.77	256.39	8.55
0.001					
Detergente*Tiempo	2	105.09	105.09	52.54	1.75
0.188					
Velocidad*Tiempo	4	862.67	862.67	215.67	7.19
0.000					
Detergente*Velocidad*Tiempo	4	1107.19	1107.19	276.80	9.23
0.000					
Error	36	1079.65	1079.65	29.99	
Total	53	6481.40			
S = 5.47634 R-cuad. = 83.34% R-cuad. (ajustado) = 75.48%					

Observaciones inusuales de %SST

Obs	%SST	Ajuste	Ajuste SE	Residuo	Residuo estándar
7	85.8114	72.5877	3.1618	13.2237	2.96 R
21	57.9822	67.3986	3.1618	-9.4164	-2.11 R
25	62.9167	72.5877	3.1618	-9.6711	-2.16 R
52	48.0000	38.3333	3.1618	9.6667	2.16 R

R denota una observación con un residuo estandarizado grande.

Partiendo de que los efectos analizados son fijos, las pruebas de hipótesis analizadas indican que las medias de los resultados en cada factor, así como su interacción son iguales o no, con cual se puede definir si son estadísticamente significativas.

Debido a que el valor-p del factor principal “Detergente” (0.000) es menor a $\alpha=0.05$, se rechaza la prueba de hipótesis nula, por lo tanto, sí es estadísticamente significativo. Esto también aplica para las interacciones dobles “Detergente*Velocidad” y “Detergente*Tiempo” donde sus p-valores, 0.001 y 0.000, respectivamente, también son menos a 0.05. Así también es significativamente la interacción triple “Detergente*Velocidad*Tiempo”.

Esto permite concluir que, a pesar de que a 10 rpm se alcanzan buenas eficiencias de eliminación de SST con detergente en polvo, se requiere mayor tiempo de mezclado, así conviene utilizar una velocidad de floculación de 20 rpm, durante 10 minutos para el detergente en polvo, mientras que para el líquido es más conveniente utilizar 15 rpm durante 15 minutos para alcanzar los mejores resultados.

El recuento de los parámetros óptimos de operación con los detergentes probados, se encuentra resumido en la Tabla 36, en ella se observa la influencia del detergente en la dosis de coagulante (el detergente en polvo pareciera tener efectos negativos en la calidad del agua gris, por lo tanto requiere mayor dosis de coagulante). La velocidad de floculación se generalizó para los dos detergentes con el objetivo de eliminar confusión en el usuario al momento de operar el equipo.

Tabla 36. Condiciones óptimas de operación para coagulación – floculación.

Parámetro	Condición óptima	
	Detergente en polvo	Detergente líquido
pH de salida	8*	7.9*
Dosis de coagulante $[Al_2(SO_4)_3]$ (mg/L)	250	205.2
Coagulación: Velocidad (rpm)	150	150
Tiempo (min)	1	1
Floculación: Velocidad (rpm)	20	15
Tiempo (min)	10	15

* Correspondiente a la mezcla entre la primer y segunda descarga.