Casa abierta al tiempo
Universidad Autónoma Metropolitana
Azcapotzalco

CBI
UAM - Azcapotzalco

FACTIBILIDAD DE APLICACIÓN DE PROCESOS DE OXIDACIÓN QUÍMICA AL EFLUENTE DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO RECICLAGUA

Proyecto de Integración en Ingeniería Química

Presenta:

Rosa Alondra Campuzano Pánfilo

Asesores internos:

M. en C. Margarita Beltrán Villavicencio

M. en C. I. Abelardo González Aragón

Asesor externo:

M. en C. A. Iván Vilchis Mata

Diciembre de 2013

Resumen

Las descargas de aguas residuales que llegan al Río Lerma se caracterizan por presentar un alto valor en los parámetros de la DQO (demanda química de oxígeno) y color. En la NOM-003-SEMARNAT-1997 no se regulan estos parámetros, pero la DBO_5 (demanda bioquímica de oxígeno al quinto día) sí lo está y tiene relación con la DQO, para cumplir con un valor para DBO_5, necesariamente se requiere bajar el contenido de DQO.

Con el fin de mejorar la calidad del agua para cumplir con la NOM-003-SEMARNAT-1997 en los parámetros SST y DBO_5, en este proyecto se evaluó la factibilidad de aplicación de procesos de oxidación química al efluente de la planta de tratamiento Reciclagua mediante la aplicación de cloro/peróxido de hidrógeno a tres calidades de agua: efluente sin tratamiento, efluente acondicionado con filtración previa y efluente acondicionado con el proceso de coagulación-floculación. Este último mostró ser el más eficiente alcanzando una eficiencia de oxidación del 71.04% ± 2.62 en dosis altas de cloro (60 mg/L), seguido por el efluente acondicionado con filtración previa con una eficiencia del 27.14%± 2.66, mientras que en el efluente sin acondicionamiento se obtuvo 17.24% ± 0.97. En las pruebas exploratorias, el peróxido de hidrógeno mostró un comportamiento inestable por lo que se descartó de las siguientes etapas del proyecto.

Utilizar un tratamiento fisicoquímico antes del proceso de oxidación, ayudó a obtener un efluente con mayor calidad, los parámetros evaluados obtuvieron eficiencias de reducción muy altas, la eficiencia más favorable fue la de los sólidos suspendidos totales obteniéndose 71.81 ± 1.97%, seguida por la DBO_5 de 69.73 ± 2.09%, después el color 62.13 ± 1.52% y finalmente la DQO con 51.89 ± 1.46%.

El efluente que cumplió con los valores establecidos por la norma NOM-003-SEMARNAT-1997 para los parámetros SST y DBO_5 aplicando dosis de cloro de 60 mg/L, es el acondicionado con el proceso de coagulación-floculación, obteniéndose en los SST un valor promedio de 16 mg/L y para la DBO_5 un valor de 18.66 mg/L, estos valores cumplen con los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios públicos con contacto directo e indirecto.

Dedicatoria

Primeramente doy gracias a Dios, por permitirme llegar a la meta deseada. A mis padres por el valioso apoyo que siempre me brindaron durante mi carrera profesional en forma económica y moral ya que siempre creyeron en mí, por los valores que me han inculcado, y por haberme dado la oportunidad de tener una excelente educación en el transcurso de mi vida. A ti papá Javier Campuzano Rojas por tu fe y confianza que siempre me brindaste. A ti mamá Sixta Pánfilo Salvador que con tus oraciones y sabios consejos me has guiado siempre hacia adelante.

A ustedes hermanas por el apoyo incondicional que durante mis estudios me brindaron en el logro de un importante objetivo de mi vida.

A toda mi familia, en especial a mi tía Francisca por haberme ayudado en todo lo que pudo y más, dándome buenos consejos los cuales me permitieron crecer; de igual forma agradezco a todos mis familiares que estuvieron conmigo y me dieron su apoyo, gracias.

A Miguel Ángel por motivarme y darme la mano cuando sentía que el camino se terminaba, que siempre estuvo ahí para escucharme y darme ánimos; muchas gracias por tu apoyo incondicional en este proyecto.

A todos ustedes que han estado acompañándome a todo momento, y que son parte fundamental de mi vida “doy gracias al destino por haberlos puesto en mi camino”; por siempre mi corazón y mi agradecimiento.

Agradecimientos

Debo agradecer de manera especial y sincera a mis asesores de Proyecto de Integración; a la M. en C. Margarita Beltrán Villavicencio por aceptarme para realizar este proyecto bajo su dirección. Su apoyo y confianza en mi trabajo y su capacidad para guiar mis ideas ha sido un aporte invaluable, no solamente en el desarrollo de este proyecto, sino también en mi formación como estudiante; siempre la admiraré por su dedicación a la docencia. Al M. en C. I. Abelardo González Aragón por el apoyo que dio en la definición del proyecto y siempre acertados comentarios para el mejoramiento del mismo y al M. en C. A. Iván Vilchis Mata por brindarme el material y equipos para la elaboración del proyecto.

Al personal de la Planta Piloto de Tratamiento de Aguas Residuales de la UAM-A, especialmente a Adán y Laura por el apoyo y las facilidades que me brindaron durante el tiempo que estuve ahí realizando mis pruebas, y por la paciencia que tuvieron conmigo para resolver mis dudas, gracias. A los chicos de servicio social por sus ideas y su apoyo en la realización de este proyecto.

Agradezco a los analistas de la Planta de tratamiento “Reciclagua” por haberme facilitado siempre los medios suficientes para llevar a cabo todas las actividades propuestas de este proyecto, por la paciencia que tuvieron conmigo al momento de la capacitación para poder realizar los análisis correspondientes.

Agradezco a cada una de las personas que hicieron posible este proyecto, gracias por su ayuda y tiempo.

Contenido

Resumen i
Dedicatoria ii
Agradecimientos iii
Contenido iv
Lista de figuras vi
Lista de tablas viii
1 Introducción 1
1.1 Antecedentes 1
1.2 Justificación 3
2 Objetivos 5
2.1 Objetivo general 5
2.2 Objetivos específicos 5
3 Revisión del estado del arte 6
3.1 Reciclagua Ambiental, S.A. de C.V. 6
3.2 Aguas residuales 7
3.2.1 Composición de las aguas residuales 8
3.2.2 Evaluación de la calidad del agua residual 8
3.3 Usos del agua 10
3.3.1 Uso agrícola del agua 10
3.3.2 Uso del agua para abastecimiento público 11
3.3.3 Uso del agua para industria autoabastecida 11
3.3.4 Uso del agua en energía eléctrica 12
3.4 Descargas de aguas residuales 12
3.4.1 Desechos líquidos industriales 13
3.4.2 Descarga de agua industrial en México 14
3.4.3 Impacto ambiental y afectación a ecosistemas 15
3.4.4 Las descargas de agua y la salud pública 15
3.5 Tratamiento de las aguas residuales 16
3.5.1 Nivel de tratamiento de las aguas residuales 16
3.5.2 Remoción según el nivel de tratamiento 21

3.6 Legislación en México en materia de agua 22
3.7 Procesos de oxidación química 24
4 Metodología 27
4.1 Obtención del efluente 30
4.2 Realización de las pruebas de exploración y selección de oxidante 31
4.3 Caracterización del agua 32
4.4 Las 3 calidades de agua utilizadas en la experimentación 36
4.5 Diseño de experimentos 38
4.6 Determinación de la eficiencia de oxidación 39
4.7 Análisis de resultados 40
5 Resultados y discusión 41
5.1 Pruebas de exploración y selección de oxidante 41
5.2 Calidad del agua 46
5.3 Eficiencia de oxidación para el efluente sin tratamiento 47
5.4 Eficiencia de oxidación para el efluente acondicionado con filtración previa 48
5.5 Eficiencia de oxidación para el efluente acondicionado con el proceso de coagulación-floculación 49
5.6 Eficiencia de oxidación en los 3 tratamientos del agua 50
5.7 Parámetros de calidad del agua en el proceso de oxidación en el efluente sin tratamiento 51
5.8 Parámetros de calidad del agua en el proceso de oxidación en el efluente acondicionado con filtración previa 53
5.9 Parámetros de calidad del agua en el proceso de oxidación en el efluente acondicionado con el proceso de coagulación-floculación 56
5.10 Comparativo de los parámetros evaluados en los 3 tratamientos 58
5.11 Determinación de las características finales del agua para verificar el cumplimiento de la normatividad 62
6 Conclusiones 64
7 Referencias bibliográficas 67

Lista de figuras

Figura 3.1 Distribución de los volúmenes concesionados para usos agrupados consuntivos (CONAGUA, 2011)……..10

Figura 4.1 Laboratorio de la PPTAR…….28

Figura 4.2 Diagrama de flujo de las actividades realizadas en el procedimiento experimental.....29

Figura 4.3 Descarga de agua tratada que cumple con la calidad para riego agrícola conforme a la norma NOM-001-SEMARNAT-1996…….31

Figura 4.4 Equipo HACH modelo DRB 200…….33

Figura 4.5 Equipo UV/VIS Spectrometer Perkin Elmer modelo Lambda 25……..33

Figura 4.6 Equipo YSI modelo 59……..34

Figura 4.7 Incubadora Precision modelo 815……..34

Figura 4.8 Estufa Lindberg/blue modelo Gravity 204……35

Figura 4.9 Colorímetro Aquaquant……35

Figura 4.10 Efluente acondicionado con filtración previa……..36

Figura 4.11 Efluente acondicionado con el proceso de coagulación-floculación……..38

Figura 5.1 Eficiencia de reducción de DQO del cloro en las pruebas exploratorias…….42

Figura 5.2 Eficiencia de reducción de DQO del peróxido de hidrógeno en las pruebas exploratorias……..42

Figura 5.3 Comportamiento de mg DQO reducida/mg cloro aplicado en las pruebas exploratorias……..43

Figura 5.4 Comportamiento de mg DQO reducida/mg peróxido de hidrógeno aplicado en las pruebas exploratorias……..44

Figura 5.5 Eficiencias de DQO en un tiempo de reacción de 20 minutos……..45

Figura 5.6 Eficiencias de DQO en un tiempo de reacción de 30 minutos……..45

Figura 5.7 Eficiencias de DQO en un tiempo de reacción de 40 minutos……..46

Figura 5.8 Eficiencia de DQO para el efluente sin tratamiento……...48

Figura 5.9 Eficiencia de DQO para el efluente acondicionado con filtración previa……49

Figura 5.10 Eficiencia de DQO para el efluente acondicionado con el proceso de coagulación-floculación……...50

Figura 5.11 Eficiencia promedio de DQO en los tres tratamiento de oxidación…….....51

Figura 5.12 Eficiencias de reducción en los parámetros evaluados antes del proceso de oxidación al acondicionar el efluente con filtración previa…….55

Figura 5.13 Eficiencias de reducción en los parámetros evaluados antes del proceso de oxidación al acondicionar el efluente con el proceso de coagulación……58

Fig.5.14 Comparativa de pH en los tres tratamientos……59

Fig.5.15 Comparativa de sólidos suspendidos totales en los tres tratamientos……59

Fig.5.16 Comparativa de color en los tres tratamientos……60

Fig.5.17 Comparativa de DQO en los tres tratamientos……...60

Fig.5.18 Comparativa de DBO_5 en los tres tratamientos……..61

Lista de tablas

Tabla 1.1 Límites máximos permisibles de contaminantes (NOM-003-SEMARNAT-1997)…….2

Tabla 1.2 Principales aspectos positivos y negativos en la utilización de los procesos oxidativos avanzados para el tratamiento de efluentes (Rodríguez *et al*., 2008)…….3

Tabla 3.1 Constituyentes de las aguas residuales típicas (Rojas *et al.,* 2002)……8

Tabla 3.2 Principales parámetros en la evaluación de la calidad del agua residual (Rojas *et al.,* 2002)……..9

Tabla 3.3 Descargas de aguas residuales municipales y no municipales (CONAGUA, 2011)……...13

Tabla 3.4 Promedio y carga de DQO Y SST en agua industrial de acuerdo al giro (Jiménez, 2001)……...…14

Tabla 3.5 Remoción según el nivel de tratamiento (Tchobanoglous, 2000)……...…22

Tabla 3.6 Normas oficiales mexicanas sobre la calidad de agua (CONAGUA, 2012; Carabia y Landa, 2005)……..…23

Tabla 3.7 Comparación de diferentes oxidantes químicos (Oliver, 1999)……..25

Tabla 4.1 Parámetros y técnicas……32

Tabla 4.2 Diseño de experimentos……39

Tabla 4.3 Condiciones para las pruebas de oxidación……..39

Tabla 5.1 Calidad del agua antes del proceso de oxidación……47

Tabla 5.2 Resultados obtenidos de los parámetros de calidad del agua en el efluente sin acondicionamiento, después de la oxidación con cloro……....52

Tabla 5.3 Promedio de resultados para cada parámetro con su desviación estándar……52

Tabla 5.4 Resultados obtenidos de los parámetros de calidad del agua en el efluente acondicionado con filtración previa……..54

Tabla 5.5 Promedio de resultados para cada parámetro con su desviación estándar……...54

Tabla 5.6 Resultados obtenidos de los parámetros de calidad del agua en el efluente acondicionado con el proceso de coagulación……..56

Tabla 5.7 Promedio de resultados para cada parámetro con su desviación estándar……...57

Tabla 5.8 Límites máximos permisibles de contaminantes de DBO_5 y SST (NOM-003-SEMARNAT-1997)……62

Tabla 5.9 Parámetros obtenidos en las 9 pruebas del efluente acondicionado con coagulación-floculación……63

1 Introducción

1.1 Antecedentes

La cuenca Lerma-Chapala es una de las más importantes de América Latina, incluye la cuenca del río Lerma que se encuentra en el centro de México. Esta región contiene a la segunda zona industrial más importante del país; concentra casi 300 empresas que generan empleos, recursos económicos y calidad de vida; es densamente poblada e industrializada y se encuentra a una altitud de 2850 m. La región se enfrenta a dos problemas: la baja disponibilidad de agua y la grave contaminación de los ríos. Un polo de desarrollo de esta magnitud requiere de normas y acciones orientadas a proteger su entorno. En este sentido y considerando el volumen de aguas residuales generado, el Gobierno del Estado de México creó la planta Reciclagua Ambiental S.A. de C.V. (GACETA DEL GOBIERNO, 2011).

La planta de tratamiento de aguas residuales industriales (Reciclagua) fue construida en 1982 para recibir los efluentes de varios parques industriales. El proceso de tratamiento de lodos activados que se utiliza, funciona relativamente bien, debido a un buen control y selección de las descargas autorizadas.

Los efluentes recibidos en la planta Reciclagua son previamente tratados en la fuente y se originan por más de 160 industrias diferentes, entre ellas se tienen las del giro químico, metal-mecánico, textil, farmacéutico, alimenticio, plásticos, automotriz, de calzado, entre otros, que incluyen muchas empresas multinacionales (Fall *et al*., 2012).

La información pública disponible sobre las contribuciones al tratamiento de aguas residuales industriales es inexacta. La industria de alimentos (bebidas, leche, levadura, pan) es uno de los sectores más importantes para la contaminación de las aguas residuales. Las características dominantes del efluente total, color marrón y alta salinidad, apuntan a una posible presencia de taninos (de curtiembres y plantas textiles) y la melaza (cultivo de hongos y la producción de etanol (Fall *et al*., 2012).

Una medida para disminuir el consumo indiscriminado de agua consiste en recurrir a la reutilización de aguas residuales para llenado de acuíferos, riego de cultivos o jardines, procesos industriales, aguas de baño, recreo y otros usos (Calvo, 2006).

La NOM-003-SEMARNAT-1997 es la norma mexicana que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público, con el objeto de proteger el ambiente y la salud de la población, y es de observancia obligatoria para las entidades públicas responsables de su tratamiento y reuso (DOF, 1998).

Los límites máximos permisibles de contaminantes en aguas residuales tratadas son los establecidos en la Tabla 1.1 de esta Norma Oficial Mexicana.

Otra norma referente al agua residual, es la norma NOM-001-SEMARNAT-1996 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales (DOF, 1997), en ésta se regulan entre otros parámetros los sólidos suspendidos, la DBO_5 y además la materia flotante debe estar ausente en el agua residual tratada. El efluente podrá ser usado en riego si cumple las características.

Tabla 1.1 Límites máximos permisibles de contaminantes (NOM-003-SEMARNAT-1997).

Tipo de reuso	**Coliformes Fecales NMP/100mL**	**Huevos de Helminto (h/L)**	**Grasas y Aceites mg/L**	**DBO_5 mg/L**	**SST mg/L**
Servicios al público con contacto directo	240	≤ 1	15	20	20
Servicios al público con contacto indirecto u ocasional	1000	≤ 5	15	30	30

Los principales aspectos positivos y negativos del uso de los procesos oxidativos avanzados en el tratamiento de efluentes se presenta en la tabla 1.2

Tabla 1.2 Principales aspectos positivos y negativos en la utilización de los procesos oxidativos avanzados para el tratamiento de efluentes (Rodríguez *et al*., 2008).

Aspectos positivos	Aspectos negativos
No transfieren de fase los contaminantes (como ocurre en las técnicas de membranas, carbón activado, entre otras), pero sí transforman químicamente los compuestos	Pueden formar subproductos de reacciones indeseables en algunos casos
Poseen potencial para transformar productos refractarios en compuestos biodegradables	Necesitan, en algunos procesos, de tiempos de reacción grandes
Usualmente no hay generación de lodo	
Pueden proporcionar mineralización completa de algunos contaminantes	
En algunos casos, consumen menos energía que otros métodos (por ejemplo, en comparación con la incineración)	

1.2 Justificación

El efluente tratado en la planta Reciclagua Ambiental S.A. de C.V. cumple con las normas reglamentarias como la NOM-001-SEMARNAT-1996 para descargas de efluentes a cuerpos de competencia federal y la NOM-085-SEMARNAT-1994 para emisiones atmosféricas, el agua tratada se descarga en el río Lerma. Sin embargo, muchas de las preocupaciones permanecen sobre los parámetros no regulados como la DQO (demanda química de oxígeno) y color, ya que resultan más difíciles de tratar.

El color puede reducir tanto la fotosíntesis y el oxígeno disuelto en los ríos, mientras que la materia orgánica recalcitrante inerte (incluida en la DQO) puede ser persistente bioacumulable y/o tóxica para el medio ambiente. Por ello es conveniente el estudio y el empleo de tecnologías de oxidación química, las cuales pueden constituir una alternativa viable para tener un efluente con mayor calidad, con el fin de cumplir con la NOM-003-SEMARNAT-1997 que estable los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios públicos.

La planta de tratamiento Reciclagua, preocupada por un mejor tratamiento del efluente, se ha enfrentado a uno de los mayores problemas ambientales: la remoción de color y bajar la concentración de la DQO, que aunque no están regulados en la NOM-003-SEMARNAT-1997 van ligados con los demás parámetros que sí lo están. Actualmente el efluente de salida tiene un valor muy elevado en la DQO que se encuentra entre los 1000-2000 mg/L, según las condiciones del proceso; es un parámetro de difícil reducción por tratamientos convencionales, pero se puede conseguir aplicando tecnologías como la oxidación química; la importancia de este proyecto radica en la aplicación de un proceso para la búsqueda de una solución a un problema real.

2 Objetivos

2.1 Objetivo general

Evaluar la factibilidad de aplicación de procesos de oxidación química al agua residual industrial tratada de la planta de tratamiento “Reciclagua” con el fin de cumplir con la NOM-003-SEMARNAT-1997

2.2 Objetivos específicos

- Evaluar las características del efluente de la planta de acuerdo a la normatividad
- Reproducir en condiciones de laboratorio un tratamiento fisicoquímico de coagulación-floculación mediante la “prueba de jarras” para determinar el cambio en las características del agua como acondicionamiento para el proceso de oxidación química
- Evaluar el proceso de oxidación mediante la aplicación de peróxido de hidrógeno o cloro a tres calidades de agua: efluente sin acondicionamiento, efluente acondicionado con filtración previa y efluente acondicionado con el proceso de coagulación
- Determinar el proceso de oxidación viable de acuerdo a las características finales del efluente de agua

3 Revisión del estado del arte

Con el desarrollo industrial y el crecimiento de la población se han ido incrementando los caudales y descargas de aguas residuales a los cuerpos naturales de agua, como ríos, lagos, entre otros; elevando de esta manera la contaminación de los mismos y generando a su vez problemas ambientales, lo que hace que el tratamiento de las aguas residuales sea una necesidad evidente de la sociedad actual así como también implementar nuevas tecnologías para el reúso de aguas tratadas, son algunos temas que se abordarán en este capítulo.

3.1 Reciclagua Ambiental, S.A. de C.V.

La planta Reciclagua ocupa un terreno de 70,000 m^2 de superficie y cuyo inicio de operaciones data de la década de los setentas. Reciclagua recibe los 365 días del año, las aguas residuales de empresas usuarias de diversas actividades económicas; está ubicada a un costado del río Lerma, municipio de Lerma, Estado de México, esta región pertenece a la cuenca Lerma-Chapala (Pacheco *et al*., 2010).

La superficie de la cuenca Lerma-Chapala involucra cinco estados de la República Mexicana (México, Querétaro, Guanajuato, Michoacán y Jalisco) y abastece de agua a más de 10 millones de personas. La industria asentada en esta área contribuye con el 33% del Producto Interno Bruto (PIB), mientras que la agricultura de riego favorece significativamente a las exportaciones de este sector y desarrolla el 20% del comercio; de ahí que esta cuenca sea considerada como una región estratégica para el país (Pacheco *et al*., 2010).

En la cuenca se generan alrededor de 17 mil L/s de aguas residuales, de los cuales se tratan poco más del 45%, por lo que es necesario abordar su problemática hídrica con un enfoque de gestión integral, además de fortalecer los compromisos e inversiones para aumentar el volumen tratado de las descargas que se generan en poblaciones urbanas y rurales, así como del sector industrial (Pacheco *et al*., 2010).

La planta de tratamiento Reciclagua depura 12.6 millones m^3/año (400 L/s) a través de un proceso de lodos activados; cuyo sistema de tratamiento resulta complejo por la heterogeneidad de perfiles de contaminantes y de variaciones de los flujos volumétricos. Es importante mencionar, que diversas empresas establecidas en la zona industrial Toluca -

Lerma, que descargan sus efluentes a la planta RECICLAGUA, han instalado pretratamientos de sus aguas residuales (de procesos industriales y de servicios generales); por consiguiente, el agua a tratar, contiene un perfil de contaminantes aún más complejo para depurar (Pacheco *et al*., 2010).

Reciclagua cuenta con tres colectores: Norte, Toluca y Parque Industrial Lerma que convergen a un cárcamo de bombeo para ser introducidas al sistema de tratamiento de la planta, el cual consta de las siguientes operaciones unitarias: tratamiento primario, secundario y terciario (Pacheco *et al*., 2010).

3.2 Aguas residuales

En la naturaleza el agua que se encuentra contiene disueltas o en suspensión sustancias que adquiere a lo largo de su recorrido o su ciclo natural, sin embargo, no sólo contiene sustancias de origen natural sino también sustancias consecuencia de la actividad humana utilizándola como vehículo para eliminar productos (Calvo, 2006).

Toda la comunidad genera residuos, tanto líquidos como sólidos. La fracción líquida (residual) está constituida, esencialmente, por el agua de abastecimiento, después de haber sido contaminada por los diversos usos a que ha sido sometida. Desde el punto de vista de su origen, las aguas residuales pueden definirse como una combinación de los desechos líquidos procedentes de viviendas, instituciones y establecimientos comerciales e industriales, junto con las aguas subterráneas, superficiales y de lluvia que puedan agregarse a los anteriores (Metcalf & Eddy, 1995).

Las aguas residuales industriales varían en su composición de acuerdo con los procesos industriales a los que son sometidas. Algunas son aguas de drenaje relativamente limpias, otras se encuentran fuertemente cargadas de materia orgánica o mineral, o con sustancias corrosivas, venenosas, inflamables o explosivas (Gordon, 1987).

Según la normatividad las aguas residuales son aquellas de composición variada proveniente de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios, agrícola, pecuaria, doméstica, incluyendo fraccionamientos y en general de cualquier otro uso, así como las mezclas de ellas (DOF, 1997).

3.2.1 Composición de las aguas residuales

La composición de las aguas residuales es muy variable en razón de los diversos factores que lo afectan. Entre estos se tiene el consumo promedio de agua por habitante y por día que afecta su concentración (cantidad) y los hábitos alimenticios de la población que caracteriza su composición química (calidad) (Rojas *et al*., 2002).

En general, las aguas residuales contienen aproximadamente un 99.9% de agua y el resto está constituido por materia sólida como se muestra en la tabla 3.1. Los residuos sólidos están conformados por materia mineral y materia orgánica. La materia mineral proviene de los subproductos desechados durante la vida cotidiana y de la calidad de las aguas de abastecimiento. La materia orgánica proviene exclusivamente de la actividad humana y está compuesta por materia carbonácea, proteínas y grasas (Rojas *et al*., 2002).

Tabla 3.1 Constituyentes de las aguas residuales típicas (Rojas *et al.,* 2002).

Agua potable	**Sólidos**	**Gases disueltos**	**Componentes biológicos**
99,9%	0,1 % (por peso) Suspendidos Disueltos Coloidales Sedimentables	O_2 CO_2 H_2S N_2	Bacterias Micro y macroorganismos Virus

3.2.2 Evaluación de la calidad del agua residual

El diseño y manejo de las plantas de tratamiento de aguas residuales requieren de una evaluación de la calidad de las aguas residuales. Los principales parámetros a ser evaluados a este respecto se presentan en la tabla 3.2 (Rojas *et al*., 2002).

Tabla 3.2 Principales parámetros en la evaluación de la calidad del agua residual (Rojas *et al.,* 2002).

Parámetro	Descripción
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	Están compuestos por partículas orgánicas o inorgánicas fácilmente separables del líquido por sedimentación, filtración o centrifugación.
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	Es la cantidad de oxígeno necesaria para la oxidación química (destrucción) de la materia orgánica. Esta prueba proporciona un medio indirecto de la concentración de materia orgánica en el agua residual.
Demanda Bioquímica de Oxígeno en cinco días (DBO_5)	Es la cantidad de materia orgánica fácilmente biodegradable durante cinco días y a 20°C y corresponde a la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar biológicamente la materia orgánica. La relación DQO/DBO_5 proporciona una indicación de la biodegradabilidad de las aguas residuales.
Nitrógeno (N) y fósforo (P)	Estos compuestos, conjuntamente con la materia carbonácea o DBO_5 indican si las aguas residuales tienen la adecuada proporción de nutrientes como para facilitar la degradación de la materia orgánica presente en las aguas residuales.
Metales pesados	La presencia en las aguas residuales de metales pesados tales como plomo, cadmio, selenio, cromo, cobre, entre otros., pueden ser contraproducentes para su adecuado tratamiento, al afectar a la biomasa encargada de la estabilización de la materia orgánica.

3.3 Usos del agua

El agua es empleada de diversas formas prácticamente en todas las actividades humanas, ya sea para subsistir o para producir e intercambiar bienes y servicios. El 63% de agua utilizada en el país para uso consuntivo: el agrícola, el abastecimiento público, la industria autoabastecida y la generación de energía eléctrica proviene de fuentes superficiales (ríos, arroyos, lagos), mientras que el 37% restante proviene de fuentes subterráneas (acuíferos) (CONAGUA, 2011).

El mayor volumen concesionado para usos consuntivos del agua es el que corresponde al uso agrupado agrícola como se observa en la figura 3.1. En este caso, se está considerando principalmente el agua empleada para riego; cabe destacar que México es uno de los países con mayor infraestructura en el mundo (CONAGUA, 2011).

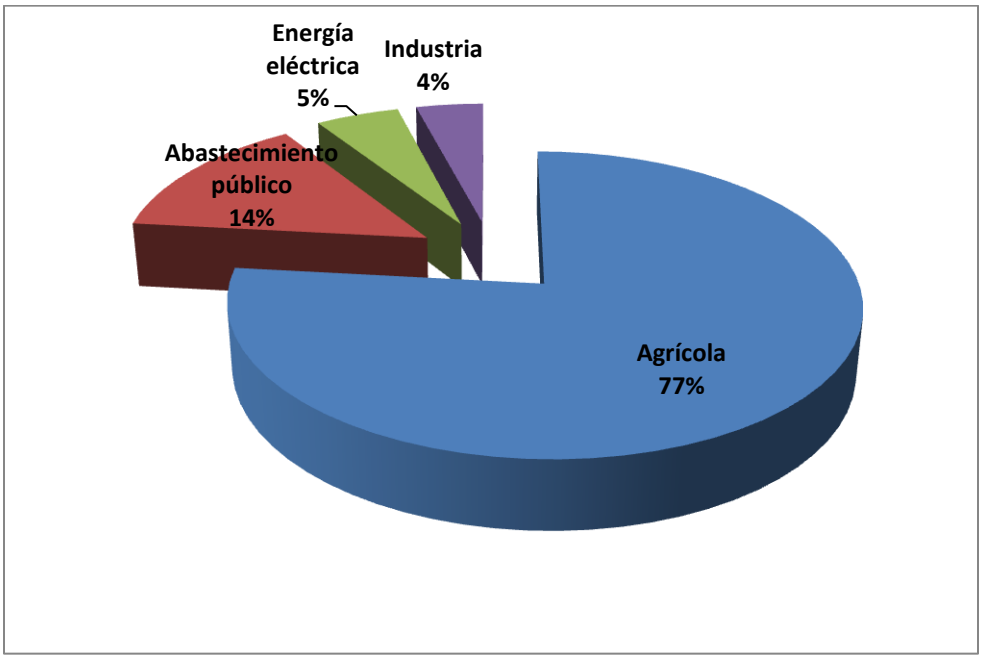


Figura 3.1 Distribución de los volúmenes concesionados para usos agrupados consuntivos (CONAGUA, 2011).

3.3.1 Uso agrícola del agua

El principal uso del agua en México es el agrícola, el cual en términos de uso de aguas nacionales se refiere principalmente al agua utilizada para el riego de cultivos. La superficie en unidades agrícolas de producción fue de 30.22 millones de hectáreas, de las cuales el

18% era de riego y el resto tenía régimen de temporal. La superficie sembrada anualmente varía entre 20 y 23 millones de hectáreas; por otra parte, anualmente la superficie cosechada oscila entre 17 y 21 millones de hectáreas por año.

México ocupa el sexto lugar mundial en términos de superficie con infraestructura de riego con 6.46 millones de hectáreas, de las cuales el 54% corresponde a 85 distritos de riego, y el restante a más de 39 mil unidades de riego. El 33.8 % del agua concesionada para el uso agrícola, acuacultura, pecuario, múltiple y otros, es de origen subterráneo, lo que representa un incremento del 23.2% en el volumen concesionado (CONAGUA, 2011).

3.3.2 Uso del agua para abastecimiento público

El uso para abastecimiento público consiste en el agua entregada a través de las redes de agua potable, las cuales abastecen a los usuarios domésticos (domicilios), así como a las diversas industrias y servicios conectados a dichas redes. El disponer de agua en cantidad y calidad suficiente para el consumo humano es una de las demandas básicas de la población, pues incide directamente en su salud y bienestar en general.

Para el abastecimiento público, que agrupa al uso público urbano y al doméstico, el tipo de fuente predominante es la subterránea con el 62.2% del volumen, cabe destacar que en el periodo 2001-2009 el agua superficial asignada para este uso creció en un 30.3%.

En México, el servicio de agua potable, junto con los de drenaje, alcantarillado, tratamiento y disposición de aguas residuales se encuentra a cargo de los municipios, generalmente a través de organismos operadores (CONAGUA, 2011).

3.3.3 Uso del agua para industria autoabastecida

En este rubro se incluye la industria que toma el agua que requiere directamente de los ríos, arroyos, lagos o acuíferos del país. Conforme al Sistema de Clasificación Industrial de América del Norte (SCIAN) las actividades secundarias, conocidas tradicionalmente como “la industria”, están conformadas por los sectores minería, electricidad, agua y suministro de gas por ductos al consumidor final, así como las construcción y las industrias manufactureras.

Si bien representa solamente el 4.1% del uso total, el uso agrupado industrial autoabastecido, que agrupa a los rubros industriales, servicios, agroindustrial y comercio, presenta la dinámica de crecimiento y de ser originalmente superficial, la fuente pasó a ser

predominantemente subterránea, con un crecimiento del 40.5% del volumen concesionado para esta fuente (CONAGUA, 2011).

3.3.4 Uso del agua en energía eléctrica

El agua incluida en este rubro se refiere a la utilizada en generación de energía eléctrica excepto la hidroelectricidad, por lo que contempla centrales de vapores duales, carboeléctricas, de ciclo combinado, de turbo gas y de combustión interna. De acuerdo con lo reportado por la Secretaría de Energía, las centrales de Comisión Federal de Electricidad consideradas en este uso agrupado, incluyendo productores externos de energía para el servicio público, generaron 207 TWh, lo que representó el 88.7% de la energía eléctrica producida en el país.

En las plantas correspondientes existe una capacidad instalada de 40,303 MW o el 78% del total del país. Cabe aclarar que el 76.6% del agua concesionada a este uso en el país corresponde a la planta carboeléctrica de Petacalco, ubicada en las costas de Guerrero, muy cerca de las desembocadura del río Balsas (CONAGUA, 2011).

3.4 Descargas de aguas residuales

Las descargas de aguas residuales se clasifican en municipales e industriales. Las primeras corresponden a las que son manejadas en los sistemas de alcantarillado municipales urbanos y rurales, en tanto que las segundas son aquellas descargas directamente a los cuerpos receptores de propiedad nacional, como es el caso de la industria autoabastecida. La secuencia generación, recolección, tratamiento se muestra en la tabla 3.3

Tabla 3.3 Descargas de aguas residuales municipales y no municipales (CONAGUA, 2011).

Centros urbanos (descargas municipales):		
Aguas residuales	7.49	km^3/año ($237.5m^3$/s)
Se recolectan en alcantarillado	6.59	km^3/año ($209.1m^3$/s)
Se tratan	2.78	km^3/año ($88.1m^3$/s)
Se generan	2.02	millones de toneladas de DBO_5 al año
Se recolectan en alcantarillado	1.78	millones de toneladas de DBO_5 al año
Se remueven en los sistemas de tratamiento	0.61	millones de toneladas de DBO_5 al año
Usos no municipales, incluyendo a la industria:		
Aguas residuales	6.01	km^3/año ($190.4m^3$/s)
Se tratan	1.16	km^3/año ($36.7m^3$/s)
Se generan	6.95	millones de toneladas de DBO_5 al año
Se remueven en los sistemas de tratamiento	1.33	millones de toneladas de DBO_5 al año

3.4.1 Desechos líquidos industriales

Son las descargas líquidas que provienen de la industria y cuyas características dependen de la naturaleza de la fábrica, los efluentes industriales tienen características y volúmenes muy variables, dependen tanto del proceso como la hora del día o la estación del año. Cabe mencionar que, en ocasiones, éstas no contienen agua (en algunos casos, por ejemplo, se vierten solventes). En la industria, el tratamiento del agua residual tiene dos objetivos: abatir, en lo posible, la contaminación admisible en las plantas que tratan el agua del drenaje y

cumplir con los estándares de calidad, que en México están dados por las Condiciones Particulares de Descarga o la Norma Oficial Mexicana correspondiente (Jiménez, 2001).

3.4.2 Descarga de agua industrial en México

La tabla 3.4 presenta los valores promedios de la DQO y de los sólidos presentes en agua de acuerdo con el giro industrial, de conformidad con los datos del Sistema de Actualización de Descargas de Aguas Residuales (Sacdar) de la CNA. En términos de cantidad de agua residual generada destacan las plantas termoeléctricas, los ingenios azucareros y la industria química, petroquímica y farmacéutica.

Tabla 3.4 Promedio y carga de DQO Y SST en agua industrial de acuerdo al giro (Jiménez, 2001).

Giro Industrial	DQO (mg/L)	SST (mg/L)	Carga	
	Promedio	Promedio	Ton DQO/d	%
Celulosa y papel	940	514	371.2	1.3
Textil	793	162	222.0	0.8
Curtiduría	2978	320	10.3	0.04
Petroquímica	1546	338	1823.3	6.3
Azucarera	1900	942	10642.5	36.9
Alimentaria	2208	658	1045.4	3.6
Petrolera (PEMEX)	1064	219	533.2	1.9
Termoeléctricas	491	154	11066.7	38.4
Cervecera	1656	535	200.3	0.7
Pesquera	947	240	157.1	0.6
Pecuaria	3957	2225	174.4	0.6

En términos de carga de DQO, los giros más contaminantes son:

- Curtiduría
- Alimentaria
- Ingenios azucareros
- Sector cervecero

- Plantas petroquímicas
- Industria pecuaria

3.4.3 Impacto ambiental y afectación a ecosistemas

Los usos industriales del agua son un problema también grave de contaminación. La calidad de las aguas que reciben vertidos procedentes de industrias es un problema que se debe estudiar con especial detenimiento, puesto que se trata de aguas con altas dosis de contaminación que necesitan un tratamiento adecuado y específico. Los usuarios industriales descargan en los ríos enormes cantidades de agua contaminada que producen la extinción paulatina de los recursos hídricos naturales (Balairón-Pérez, 2000).

Las fuentes puntuales y no puntuales de descargas de aguas residuales que provienen de centros de oblación, de la industria y la agricultura ejercen una severa presión sobre la mayor parte de los cuerpos de agua superficiales en México. Ninguna de las 29 regiones hidrológicas monitoreadas (de un total de 37) alcanza una categoría aceptable de calidad del agua. En la mayor parte de las regiones la categoría preponderante se encuentra en los niveles de fuerte o excesivamente contaminada (CESPEDES, 1998).

El lago de Chapala, el más grande del país, refleja las consecuencias de la excesiva acumulación de nutrientes y de la contaminación por compuestos químicos persistentes. Hay una alteración notable en la dinámica poblacional y una reducción en el número de individuos de ciertas especies de peces y otros organismos. Ello, a pesar de que el Consejo de la Cuenca Lerma-Chapala, creado para controlar y reducir la magnitud de los problemas existentes en la zona, ha realizado un enorme esfuerzo cristalizado hoy en la disminución de por lo menos el 65% de la carga contaminante monitoreada a los últimos años (CESPEDES, 1998).

3.4.4 Las descargas de agua y la salud pública

Las descargas municipales e industriales tienen consecuencias severas sobre la salud pública y la reducción de la productividad laboral en el país. Dada las condiciones de deterioro de la calidad del agua un gran volumen requiere tratamientos extensivos para habilitarse como agua potable. La contaminación por materia fecal es la principal causa de la incidencia de enfermedades del aparato gastrointestinal en una tercera parte de los estados.

La elevada concentración de coliformes fecales en algunos embalses los inutiliza para usos recreativos (CESPEDES, 1998).

La contaminación de alimentos por el uso de agua superficial y subterránea, ya sea para el riego o para diversas actividades después de la cosecha como el enfriamiento, enjuagado o lavado ha sido motivo de numerosas epidemias, como brotes de salmonelosis, detectando como fuente de contaminación el agua utilizada en el proceso de lavado. Esto ha llevado a establecer buenas prácticas agrícolas para reducir al mínimo el riesgo de enfermedades de origen hídrico por el consumo de alimentos contaminados (FDA, 1998).

3.5 Tratamiento de las aguas residuales

La concentración de los constituyentes en el agua varía de acuerdo con la fuente de contaminación, es decir, que es habitual encontrar valores altos de DBO_5 o microorganismos patógenos, como coliformes fecales en descargas de aguas municipales, mientras que en el caso de contaminación debida a procesos industriales, las concentraciones de constituyentes varían también de acuerdo con el tipo de industrias, se encuentran valores elevados de nutrientes (nitrógeno y fósforo) en industrias de alimentos, y menos elevados para el caso de las que fabrican textiles o baterías, en donde los metales pesados son los significativos.

3.5.1 Nivel de tratamiento de las aguas residuales

El nivel de tratamiento de las aguas residuales debe ser asignado tomando en cuenta las características especiales de las aguas receptoras donde será descargado el efluente después del tratamiento, o de acuerdo con las prácticas de reutilización. En el proceso de tratamiento de las aguas residuales se consideran cuatro niveles de tratamiento de aguas de desecho: preliminar, primario, secundario y terciario (Mendonça, 2000).

- ***Tratamiento preliminar***

Las aguas residuales contienen por lo general sólidos en suspensión de diversos tamaños, capaces de ocasionar severos daños a los equipos y a las etapas aguas abajo del proceso de tratamiento, por lo que el principal objetivo de este tipo de tratamientos es la remoción de

estos materiales sólidos. Las operaciones y procesos usados en el tratamiento preliminar de las aguas residuales son principalmente:

- **Rejillas de barras.** Se destina a la remoción de sólidos gruesos en suspensión, así como de cuerpos flotantes, como estopa, papel, paño, madera y plástico.
- **Trituradores.** Los trituradores se utilizan junto con rejillas mecánicas, y por lo general tienen la capacidad de moler de 20 a 40 kg.
- **Desarenadores.** Son unidades destinadas a retener la arena y otros residuos minerales inertes y pesados que se encuentran en las aguas residuales

- ***Tratamiento primario***

El tratamiento primario persigue retener una buena parte de los sólidos en suspensión que lleva las aguas residuales, para lo cual se emplea la gravedad terrestre para que sedimenten los sólidos sedimentables en los decantadores. En algunos casos por las especiales características de los sólidos es mejor separarlos en flotadores por aire disuelto.

Para mejorar el tratamiento primario es necesario que se lleve a cabo un tratamiento químico que consiste en la coagulación-floculación. La coagulación se refiere a la formación de flóculos precipitados. Los flóculos se forman por la adición de un coagulante como el sulfato de aluminio, el cloruro férrico, el sulfato ferroso, la cal o los polielectrolitos. La elección del coagulante depende de las características químicas de las partículas a eliminar. La floculación hace que se formen conglomerados de partículas coloidales adicionando un polímero con el propósito de aumentar el tamaño de estas para que puedan removerse mediante sedimentación y filtración (González *et al*., 2008; Perry, 2001).

Algunos de los procesos de este tipo de tratamiento son los siguientes:

- **Cámara de arena.** Son las cámaras aireadas de flujo en espiral con fondo en tolva, o clarificadores.
- **Sedimentación primaria.** Se lleva a cabo en los decantadores primarios donde se separa por gravedad las partículas o sólidos en suspensión de mayor densidad. La sedimentación se usa para disminuir la carga en los filtros. Por lo general, un tanque para este propósito es una estructura a través del cual fluye el agua a tan baja

velocidad que parte del material suspendido caerá depositándose en el fondo del tanque, saliendo de éste el agua relativamente clara (Hilleboe, 2007).

- **Flotación con aire.** Introducción de burbujas de aire finas en las aguas residuales que se fijan a las partículas y las hacen flotar para retirarlas de la superficie.
- **Coagulación y floculación.** Proceso que consiste en añadir productos químicos, como el sulfato de aluminio o el cloruro férrico, a las aguas residuales para alterar las características superficiales de los sólidos en suspensión de modo que se adhieren los unos a los otros y se precipitan. Son métodos que se emplean para remover de las aguas residuales la materia coloidal y la suspendida, durante la coagulación se desestabilizan los coloides debido a que disminuye el potencial zeta de las partículas mediante la adición de coagulantes. Esta desestabilización se produce por el contacto que se establece entre las partículas suspendidas (coloidales) y los microflóculos de carga positiva de hierro o de aluminio. La floculación hace que se formen conglomerados de partículas coloidales de mayor tamaño cuando se establecen puentes químicos entre ellas; de esta manera forman estructuras fácilmente sedimentables que pueden removerse mediante sedimentación, flotación o filtración. Las sustancias coagulantes de mayor uso son las sales de aluminio (sulfatos) y de hierro (cloruros y sulfatos).
- **Neutralización.** Empleo de compuestos químicos para ajustar el pH a un valor idóneo.
- **La filtración.** Es la operación más utilizada en el tratamiento de aguas residuales y una de las etapas finales. Tiene como objetivo retener la mayor cantidad posible de materia en suspensión que no se haya eliminado en operaciones anteriores, como por ejemplo en la sedimentación (Hilleboe, 2007).

- ***Tratamiento secundario***

El tratamiento secundario es un tratamiento biológico que persigue transformar la materia orgánica de las aguas residuales en materia celular, gases, energía y agua mediante la actividad de los microorganismos. A su vez se retienen también sólidos en suspensión y sólidos coloidales. Algunas veces se generan problemas por el crecimiento de microorganismos indeseables. Dentro de los más representativos se encuentran:

- **Lodos activados.** Que consiste en dejar crecer millones de bacterias en un depósito agitado y aireado, al que se alimenta con el agua para depurar. La mezcla de organismos con las aguas residuales se agita continuamente para facilitar el contacto y para evitar la sedimentación de los flóculos que se forman. Después de un tiempo, esta mezcla se envía a un clarificador o decantador secundario, en el cual se separan del agua, por sedimentación, los fangos o lodos.
- **Lechos bacterianos.** El agua pasa a través de un filtro de varios metros de altura formado por una masa de piedras de unos 10 cm de diámetro, en cuya superficie los microorganismos forman una película. Los filtros están provistos de drenajes en la parte inferior para recoger el agua depurada y se mantienen en condiciones aerobias.
- **Estanque de estabilización o laguna.** Requiere una extensión de terreno considerable y, por tanto, suelen construirse en zonas rurales. Las lagunas opcionales, que funcionan en condiciones mixtas, son las más comunes, con una profundidad de 0.6 a 1.5 m y una extensión superior a una hectárea. En la zona del fondo, donde se descomponen los sólidos, las condiciones son anaerobias; la zona próxima a la superficie es aérobica, permitiendo la oxidación de la materia orgánica disuelta y coloidal.

- ***Tratamiento terciario***

El tratamiento terciario o tratamiento avanzado, tiene como objetivo la remoción de nutrientes (nitrógeno y fósforo), pero también la desinfección y remoción de compuestos tóxicos y contaminantes específicos. Algunos de los procesos de este tipo son los siguientes:

- **Filtración.** Es un proceso de tratamiento consistente en hacer pasar el agua a través de un medio poroso para eliminar la materia en suspensión. Además, constituye una de las principales barreras para los agentes infecciosos ya que contribuye a reducir la carga microbiana en el proceso de desinfección. La filtración de aguas residuales adopta diseños especiales debido a las características físicas y químicas del agua. En general, los filtros utilizados en los tratamientos terciarios, reciben partículas de mayor tamaño y más variable, de mayor peso y con cargas de sólidos más variables.

- **Desinfección.** El propósito de la desinfección en el tratamiento de las aguas residuales, es reducir sustancialmente el número de microorganismos vivos en el agua que se descargará nuevamente dentro del ambiente. La efectividad de la desinfección depende de la calidad del agua que es tratada (por ejemplo: turbiedad, pH, entre otros.), del tipo de desinfección que es utilizada, de la dosis de desinfectante (concentración y tiempo), y de otras variables ambientales. Entre otros, los sistemas de desinfección más comunes en los procesos de tratamiento de aguas residuales son:

  - **Luz UV**. Consiste en la destrucción selectiva de los microorganismos que causan enfermedades mediante la irradiación con rayos UV. Los microorganismos patógenos deben absorber la luz UV para que tenga lugar su inactivación. Cualquier elemento que dificulte la reacción de la luz UV con los microorganismos disminuirá la eficacia de la desinfección.
  - **Cloración**. Se utiliza como sistema de desinfección, pero también como método para eliminar el contenido de cianuros en determinadas aguas residuales y para disminuir los valores de la DBO_5 a causa del elevado poder oxidante del cloro.
  - **Ozono.** Debido a su gran poder oxidante, el uso del ozono puede ser recomendable en el pretratamiento de aguas para la reducción de metales disueltos y la remoción de materia orgánica, lo que permite un ahorro en coagulantes y tiempos de retención.

- **Remoción del nitrógeno.** Se efectúa con la oxidación biológica del nitrógeno del amoníaco a nitrato (nitrificación que implica nitrificar bacterias tales como *Nitrobacter* y *Nitrosomonus*), y entonces mediante la reducción, el nitrato se convierte en nitrógeno gaseoso (desnitrificación), que se envía a la atmósfera. Estas conversiones requieren condiciones cuidadosamente controladas para permitir la formación adecuada de comunidades biológicas. Los filtros de arena, las lagunas y las camas de lámina se pueden utilizar para reducir el nitrógeno. Algunas veces, la conversión del amoníaco tóxico en nitrato solamente se hace como tratamiento terciario.

- **Remoción del fósforo.** Se puede efectuar biológicamente en un proceso llamado retiro biológico realzado del fósforo. En este proceso, bacterias específicas llamadas

organismos acumuladores de polifosfato, se enriquecen y acumulan selectivamente grandes cantidades de fósforo dentro de sus células. Cuando la biomasa enriquecida en estas bacterias se separa del agua tratada, los biosólidos bacterianos tienen un alto valor del fertilizante. La retirada del fósforo se puede alcanzar también, generalmente por la precipitación química con las sales del hierro (por ejemplo: cloruro férrico) o del aluminio (por ejemplo: alumbre).

- **Arrastre con vapor de agua o aire**. Se utiliza para la eliminación de compuestos orgánicos volátiles, como disolventes clorados (tricloroetileno, clorobenceno, entre otros.) o contaminantes gaseosos (amoníaco).

3.5.2 Remoción según el nivel de tratamiento

La eficiencia en la remoción de los contaminantes depende en gran medida del tipo de proceso de tratamiento que se aplica a dicha agua, así como también es importante conocer el uso que se le dará a las aguas residuales después de su tratamiento. (Fair-Maskew, 1997).

Los métodos y procesos de tratamiento dependen de los constituyentes a remover y del grado de remoción de los mismos, tomando en cuenta los niveles de tratamiento, como se muestra en la tabla 3.5 (Tchobanoglous, 2000).

Tabla 3.5 Remoción según el nivel de tratamiento (Tchobanoglous, 2000).

Nivel de tratamiento	Descripción
Preliminar	Remoción de constituyentes del agua residual que pueden causar problemas operacionales o de mantenimiento con los procesos y operaciones de tratamiento, y servicios auxiliares
Primario	Remoción de parte de los sólidos y materia orgánica suspendidos presentes en el agua residual
Secundario	Remoción de compuestos orgánicos biodegradables y sólidos suspendidos. La desinfección también se incluye dentro del concepto de tratamiento secundario convencional
Terciario	Remoción de sólidos suspendidos residuales, en general por filtración en medio granular. La desinfección hace siempre parte del tratamiento terciario, incluyéndose a menudo en esta definición la remoción de nutrientes

3.6 Legislación en México en materia de agua

La preocupación por el agua ha llevado a la creación de nuevas leyes y normas para el recurso, como la ley general del equilibrio ecológico y la protección del ambiente y la ley de aguas nacionales. Las cuales tiene como objetivo proteger los recursos y bienes así como también controlar y prevenir su contaminación (CONAGUA, 2012). A continuación en la tabla 3.6 se nombran algunas de las normas.

Tabla 3.6 Normas oficiales mexicanas sobre la calidad de agua (CONAGUA, 2012; Carabia y Landa, 2005).

Norma Oficial	Institución	Características
NOM-001-SEMARNAT-1996	Instituto Nacional de Ecología-Comisión Nacional del Agua	Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas en aguas nacionales.
NOM-002-SEMARNAT-1996		Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal.
NOM-003-SEMARNAT-1997		Límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reutilizan en servicios al público.
NOM-014-CONAGUA-2007		Requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada.
NOM-015-CONAGUA-2007		Infiltración artificial de agua a los acuíferos. Características y especificaciones de las obras y del agua.

En México los contaminantes en aguas residuales de posterior contacto humano se encuentran regulados por la norma NOM-003-SEMARNAT-1997, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público. Según dicta la norma, el reúso de agua residual de forma directa no debe rebasar valores mayores de 20 mg/L para la DBO_5 y los SST. Para el reúso de servicios al público con contacto indirecto los límites de contaminantes para la DBO_5 y los SST no deben superar valores de 30 mg/L.

La norma NOM-002-SEMARNAT-1996 establece que los límites máximos de contaminantes a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal no deben ser superiores a 50 mg/L para las grasas y aceites, ni mayores a 5 mL/L para los sólidos sedimentables en un promedio mensual; cabe mencionar que para las grasas y aceites es el promedio ponderado en función del caudal.

Los límites permisibles para los parámetros de demanda bioquímica de oxígeno y sólidos suspendidos totales, que debe cumplir el responsable de la descarga a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, son los establecidos en la norma NOM-001-SEMARNAT-1996. Para uso en riego agrícola los límites máximos de contaminantes para la DBO_5 y sólidos suspendidos totales son 150 mg/L, mientras que para los sólidos sedimentables no debe superior de 1 mg/L.

La norma oficial mexicana NOM-015-CONAGUA-2007 que trata acerca de la infiltración artificial de agua a los acuíferos, menciona que los límites establecidos para grasas y aceites no deben ser superiores a 15 mg/L y para los sólidos suspendidos totales su límite es 150 mg/L.

3.7 Procesos de oxidación química

Muchos procesos industriales generan efluentes líquidos, conteniendo compuestos orgánicos. Estos compuestos se detectan analíticamente y, de modo genérico, como DQO (Demanda Química de Oxígeno). La legislación vigente no considera el contenido en DQO de los vertidos (tanto a redes de alcantarillado como al medio natural), de modo que, a menudo, es necesario el tratamiento de los efluentes, para su adaptación a las exigencias legales, antes de su vertido final. Los tratamientos convencionales no siempre son efectivos; algunos compuestos pueden ser muy estables y no ser eliminados. La depuración, entonces, no es satisfactoria (Oliver, 1999).

Los procesos de oxidación química pueden dar respuesta a las especiales características del problema planteado. Se trata entonces de encontrar el oxidante adecuado y el proceso eficaz. Las características de un proceso de oxidación química se resumen en:

- Simplicidad de concepción

- Versatilidad:
  - En cuanto a caudales
  - En cuanto a compuestos
- Posibilidad de trabajar en discontinuo
- Costo de explotación proporcional a la carga contaminante

Los oxidantes industriales utilizables son un número limitado. La tabla 3.7 los relaciona, con sus ventajas e inconvenientes relativos.

Tabla 3.7 Comparación de diferentes oxidantes químicos (Oliver, 1999).

Oxidantes	Ventajas	Inconvenientes
Cloro y dióxido de cloro	Barato	Produce derivados clorados Aumento de sales
Permanganato potásico	No produce derivados clorados	Caro, genera fangos
Ozono	No produce residuos	Caro, no oxida todos los componentes
Peróxido de hidrógeno	Bajo nivel de residuos	Reacción lenta a temperatura y presión ambientes

Desde hace años, el cloro se ha utilizado satisfactoriamente como oxidante en el tratamiento de agua y agua residual. El comportamiento del cloro y sus productos derivados es distinto según se utilice como oxidante o como desinfectante. Por ejemplo, la eficacia del cloro como bactericida aumenta al disminuir el pH, mientras que su eficacia como oxidante para sustancias tales como SH_2, NO_2, Fe^{2+} y CN^- aumenta generalmente al aumentar el pH (Walter y Weber, 2003).

El cloro es un oxidante fuerte, remueve eficientemente el cianuro; se usa en estado gaseoso, sólido o líquido y en forma pura o combinada. El cloro gaseoso es, generalmente, considerado como la forma más rentable para las plantas de tratamiento de gran tamaño. En la desinfección con cloro también se produce una oxidación química que ayuda a la destrucción de los microorganismos, y a la reducción de la DBO_5 (Jiménez, 2001).

Los procesos avanzados de oxidación química con peróxido de hidrógeno poseen alta efectividad para la oxidación de materia orgánica; éstos se basan en procesos fisicoquímicos

capaces de producir cambios profundos en la estructura química de los contaminantes, que involucran la generación y uso de especies poderosas transitorias, principalmente el radical hidroxilo (HO*) (Arroyave *et al*., 2009).

La característica selectiva del peróxido de hidrógeno favorece su uso en diferentes aplicaciones. Simplemente ajustando factores como el pH, temperatura, dosis, tiempo de reacción, adición de catalizadores, el H_2O_2 puede oxidar compuestos orgánicos complejos en compuestos menores, menos tóxicos y más biodegradables, razones para convertir esta aplicación en una solución atractiva para el tratamiento de los efluentes industriales (Rodríguez *et al*., 2008).

Cuando el peróxido de hidrógeno se encuentra en exceso, actúa capturando los radicales hidroxilos. Las ecuaciones 1 a 4 presentan la posibilidad de recombinación de los radicales (Rodríguez *et al*., 2008).

En las ecuaciones 1 a 4 se verifica que hay consumo del radical hidroxilo, lo que conduce a una disminución del poder oxidativo del proceso. El H_2O_2 captura los radicales reactivos hidroxilo formando un radical menos reactivo, el HO_2*. Así, debe tenerse en cuenta la necesidad de determinar correctamente las dosis óptimas aplicadas de H_2O_2 para que no se presenten efectos negativos en la eficiencia de degradación de los contaminantes (Rodríguez *et al*., 2008).

4 Metodología

La experimentación del proyecto consistió en las siguientes etapas:

1.- Obtención de muestras de agua residual industrial provenientes de la Planta Reciclagua

2.- Realización de las pruebas de exploración y selección de oxidante

3.- Caracterización del efluente de la planta de acuerdo a la normatividad, antes y después de la oxidación

4.- Acondicionamiento a 3 calidades de agua: efluente sin acondicionamiento, efluente acondicionado con filtración previa y efluente acondicionado con el proceso de coagulación-floculación

5.- Realización de las pruebas de oxidación mediante la aplicación de oxidante a las tres calidades de agua

6.- Determinación de la eficiencia de oxidación con los tres tipos de calidades de agua: efluente sin acondicionamiento, efluente acondicionado con filtración previa y efluente acondicionado con el proceso de coagulación-floculación

7.- Evaluación de los resultados de oxidación para comparar qué tratamiento logra una mayor reducción de color y DQO

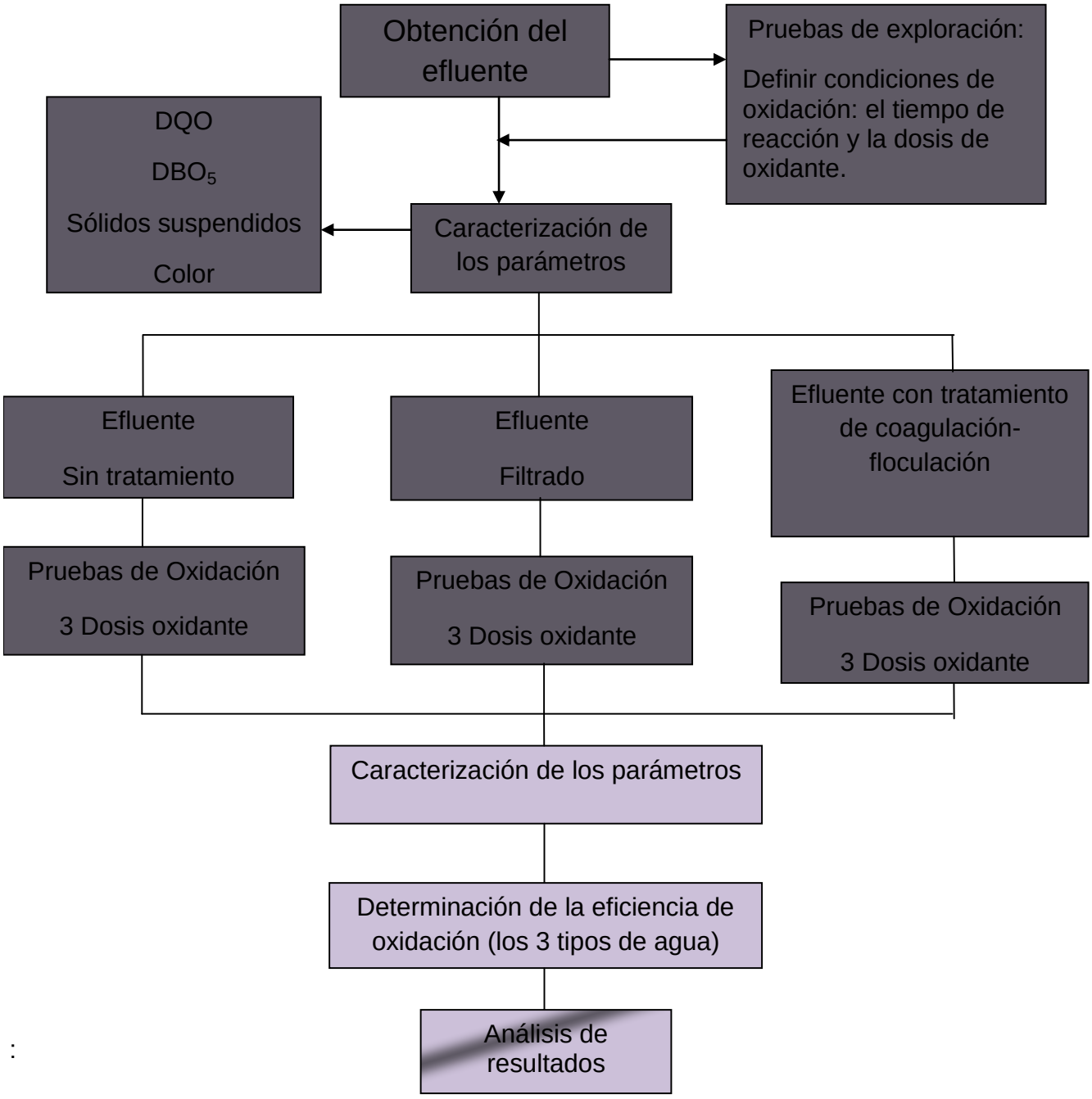
8.- Determinación de las características finales del agua entre las que se incluyen DBO_5 y SST para verificar si se cumple la normatividad.

Los acondicionamientos que se llevaron a cabo, se aplicaron al efluente que proviene de la descarga de agua tratada en el proceso de la Planta Reciclagua. Las pruebas de exploración y la de jarras se realizaron en la UAM Unidad Azcapotzalco, en la Planta Piloto de aguas Residuales (PPTAR).

La planta cuenta con un laboratorio (figura 4.1) para realizar los análisis relacionados con la calidad del agua, en este laboratorio se realizaron las pruebas de exploración y la de jarras.

Figura 4.1 Laboratorio de la PPTAR

En la figura 4.2 se muestra el diagrama de flujo de las actividades que se realizaron en el procedimiento experimental.



:

Figura 4.2 Diagrama de flujo de las actividades realizadas en el procedimiento experimental.

4.1 Obtención del efluente

El agua residual industrial que se usó en este proyecto se obtuvo de la planta de tratamiento Reciclagua, que proviene de la descarga de agua tratada que cumple con la NOM-001. (Figura 4.3).

La NMX-AA-003-1980 establece los lineamientos generales y recomendaciones para muestrear las descargas de aguas residuales, con el fin de determinar sus características físicas y químicas, debiéndose observar las modalidades indicadas en las normas de métodos de prueba correspondiente.

Los muestreos para obtener el agua para realizar la parte experimental de este proyecto, debían ser representativas y tener el volumen suficiente para efectuar las determinaciones; los recipientes que se utilizaron para el transporte y la conservación de las muestras fueron de materiales inertes al contacto de las aguas residuales, la norma recomienda los recipientes de polietileno o vidrio.

La muestra se obtuvo empleando el siguiente procedimiento: 1) el recipiente muestreador se enjuagó repetidas veces antes de efectuar el muestreo, 2) se introdujo el recipiente muestreador en la descarga de agua para después transferir la muestra a otro recipiente para su transporte, cuidando que ésta siguiera siendo representativa, cabe mencionar que de ser posible la muestra se pudo haber tomado directamente en un solo recipiente.

En la realización del procedimiento anterior, se contó con la ayuda de un encargado de monitoreo para la obtención de la muestra.

Figura 4.3 Descarga de agua tratada que cumple con la calidad para riego agrícola conforme a la norma NOM-001-SEMARNAT-1996.

4.2 Realización de las pruebas de exploración y selección de oxidante

El agua que se muestreó como “efluente” en la descarga de la planta de tratamiento Reciclagua presenta niveles altos de color y probablemente altos valores de DQO, sin embargo, en algunas ocasiones estos parámetros pueden variar significativamente, esto debido a que el flujo y la carga de entrada promedio del agua, que recibe la Planta, no es la misma todos los días. Algunas veces el incremento de material refractario en las descargas de aguas provenientes de empresas usuarias de Reciclagua es mayor y otras veces menor. Para definir las condiciones de oxidación, con el fin de mejorar las condiciones de color y DQO, se realizaron pruebas de exploración.

Primero se determinó la concentración de los posibles oxidantes químicos a utilizar, se realizó la valoración del cloro y peróxido de hidrógeno por triplicado para tener la certeza de

la concentración inicial de ellos. Posteriormente definiendo un volumen de muestra de agua de 50 mL, se aplicaron diferentes concentraciones de oxidante y se mantuvieron en agitación por un tiempo de contacto de 20 minutos. Este procedimiento se realizó para el cloro y el peróxido de hidrógeno, en donde se obtuvo la eficiencia de la DQO oxidada y la reducción de color; a partir de los resultados de estas pruebas exploratorias se decidió el oxidante adecuado, así como también las condiciones de oxidación.

4.3 Caracterización del agua

En la tabla 4.1 se enlistan los parámetros que midieron la calidad del agua antes y después del proceso de oxidación y las técnicas que se utilizaron.

Tabla 4.1 Parámetros y técnicas

Parámetro	Técnica
Demanda Química de Oxígeno	NMX-AA-030-SCFI-2001
Demanda Bioquímica de Oxígeno al quinto día	NMX-AA-028-SCFI-2001
Sólidos Suspendidos Totales	NMX-AA-034-SCFI-2001
Color	NMX-AA-045-SCFI-2001

En las figuras 4.4 a 4.9 se muestran fotografías de los equipos utilizados para la caracterización del agua antes y después del proceso de oxidación.

En las figuras 4.4 se presenta el equipo HACH modelo DRB 200 para el respectivo tratamiento térmico en la determinación de la DQO. En la figura 4.5 se visualiza el equipo UV/VIS Spectrometer Perkin Elmer modelo Lambda 25 para la determinación de las concentraciones de la DQO. En la figura 4.6 se observa el equipo YSI modelo 59 para la medición de la concentración de oxígeno disuelto en la determinación de la DBO_5. En la figura 4.7 se presenta la Incubadora Precision modelo 815 para la incubación de la muestra en un período de cinco días a una temperatura de 20°C en la determinación de la DBO_5. En la figura 4.8 se visualiza la estufa Lindberg/blue modelo Gravity 204 que se utiliza para secar la muestra del crisol en la determinación de los SST. Y finalmente se observa la figura 4.9

donde se presenta el colorímetro Aquaquant para la determinación de los valores de Pt-Co, al comparar visiblemente un volumen de agua residual diluida con estándares preestablecidos, de manera que el color de la muestra concuerde con el color de un estándar.

Figura 4.4 Equipo HACH modelo DRB 200

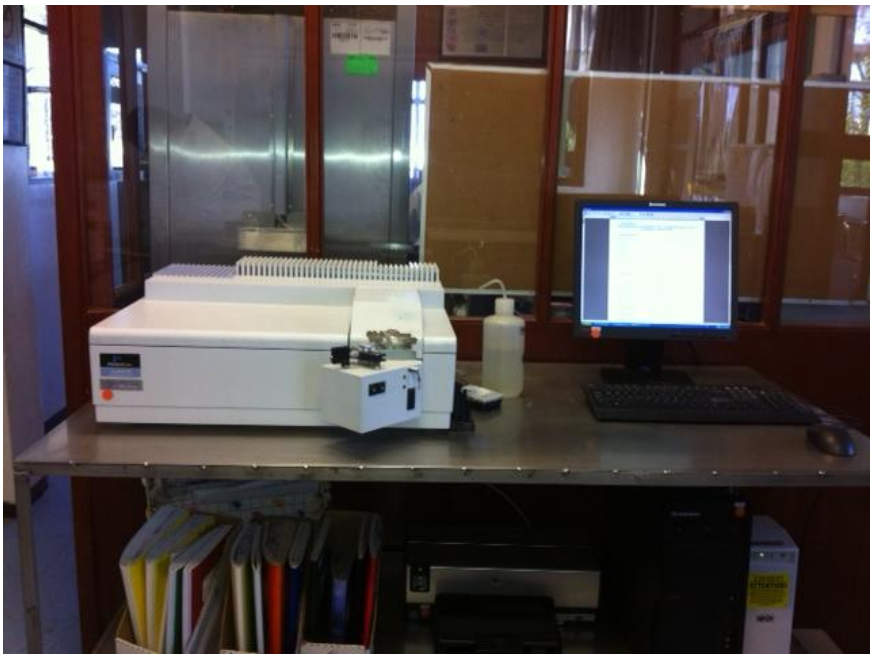


Figura 4.5 Equipo UV/VIS Spectrometer Perkin Elmer modelo Lambda 25

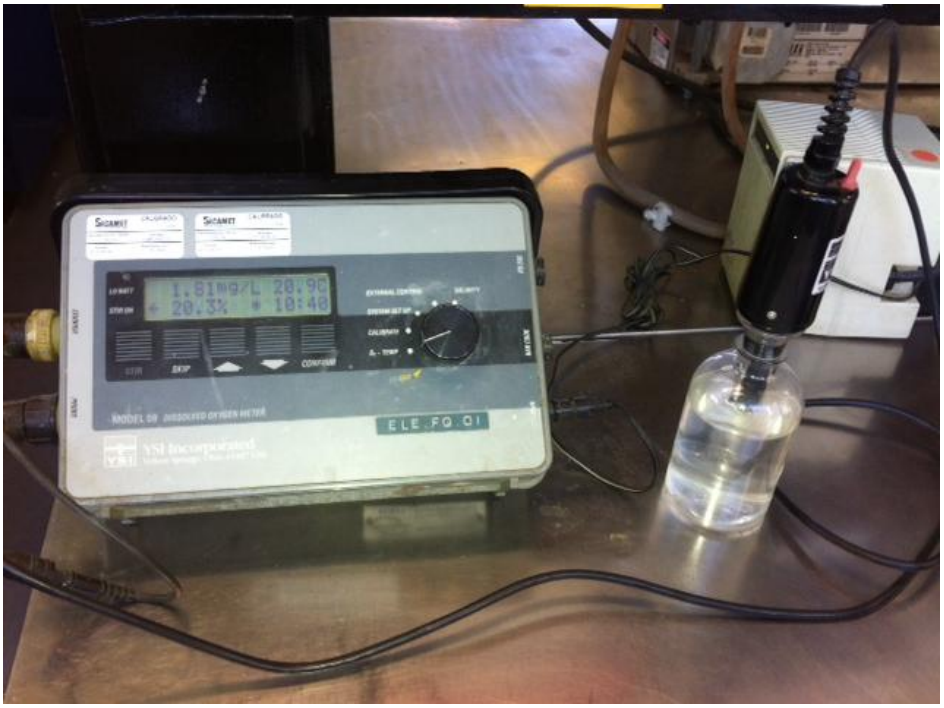


Figura 4.6 Equipo YSI modelo 59

Figura 4.7 Incubadora Precision modelo 815

Figura 4.8 Estufa Lindberg/blue modelo Gravity 204

Figura 4.9 Colorímetro Aquaquant

4.4 Las 3 calidades de agua utilizadas en la experimentación

- **Efluente directo de la descarga de la planta Reciclagua**. Se oxidaron directamente las muestras del efluente proveniente de la descarga de la planta sin tratamiento previo.
- **Efluente filtrado.** El efluente con filtración previa (figura 4.10) consistió en filtrar un volumen adecuado de la muestra, previamente homogeneizada, a través de un embudo buchner y matraz kitasato aplicando vacío, posteriormente se lavó tres veces con 10 mL de agua destilada y una vez que la muestra drenó totalmente se suspendio el vacío.

Figura 4.10 Efluente acondicionado con filtración previa

- **Efluente con tratamiento de coagulación-floculación.** Utilizar un tratamiento previo de coagulación-floculación (figura 4.11) ayudó a remover de las aguas residuales la materia coloidal y suspendida presente, ésto se simuló mediante la “prueba de jarras” que consistió en determinar la dosis de coagulante necesaria a fin de que el producto químico a utilizar tuviera un excelente rendimiento y mejorara la calidad del agua.

El procedimiento para determinar tanto el pH como la dosis óptima del coagulante para remover contaminantes y partículas suspendías en aguas residuales mediante la prueba de jarras se describe a continuación:

Procedimiento para determinar el pH óptimo

1. Caracterización de la muestra: medir sólidos suspendidos, turbidez, DQO, color y pH.
2. Colocar en un vaso de precipitado con agitación 200 mL de muestra. Adicionar la solución 50 g/L de coagulante (Al o Fe) de 1 en 1 mL hasta observar buena formación de flóculos. Tomar esta concentración de coagulante.
3. En cada una de las cubas del equipo para prueba de jarras, colocar 2 L de agua residual. Adicionar ácido sulfúrico 1M o hidróxido de sodio 1M para ajustar el pH de las muestras en un intervalo de 4 a 9, incrementando una unidad, es decir, las muestras tendrán un pH de 4, 5, 6, 7, 8 y 9.
4. Adicionar a las muestras el coagulante para alcanzar la concentración que se obtuvo en el punto dos (concentración constante).
5. Mezclar rápido durante dos minutos a rpm máxima, después, durante 15 minutos, mezclar lento a 10-20 rpm. Tomar el tiempo en el que forman los flóculos.
6. Esperar 20 minutos para que se sedimente y luego determinar en el sobrenadante el pH, los sólidos suspendidos, la DQO, el color y la turbidez de cada muestra.
7. Analizar los resultados del paso 6 y determinar cuál es el pH en que se logra una mayor calidad en el agua.

Procedimiento para determinar la dosis de coagulante

1. Preparar seis muestras de 2 L de agua residual y ajustar todas al pH óptimo que se obtuvo en la prueba anterior.
2. Para esta prueba usar de 25% a 100% de la dosis de coagulante utilizada para la determinación del pH óptimo; pruebe seis dosis diferentes.
3. Mezclar rápido durante dos minutos a rpm máxima, después mezclar lento durante 15 minutos a 10-20 rpm. Tomar el tiempo en que se formar los flóculos.
4. Dejar sedimentar durante 20 minutos y determinar en el sobrenadante el pH, los sólidos suspendidos, la DQO, el color y la turbidez de cada muestra.
5. Analizar los parámetros y determinar cuál dosis logra una mayor calidad en el agua.

Figura 4.11 Efluente acondicionado con el proceso de coagulación-floculación

4.5 Diseño de experimentos

Se realizaron pruebas de oxidación a las 3 diferentes calidades de agua: efluente sin acondicionamiento, efluente acondicionado con filtración previa y efluente acondicionado con el proceso de coagulación-floculación.

Los experimentos de oxidación se llevaron a cabo a diferentes condiciones, se utilizaron 3 dosis de oxidante en cada tratamiento con un tiempo de contacto de 20 min, en la tabla 4.2 se muestra el diseño de experimentos.

Tabla 4.2 Diseño de experimentos

Tratamiento	**Efluente sin acondicionamiento**		**Efluente acondicionado con filtración previa**		**Efluente con el proceso de coagulación-floculación**	
Agente oxidante	Prueba	Cloro	Prueba	Cloro	Prueba	Cloro
Dosis (mg/L)	1	Baja	4	Baja	7	Baja
	2	Media	5	Media	8	Media
	3	Alta	6	Alta	9	Alta

La experimentación da un total de 9 pruebas las cuales se realizaron cada una por triplicado, dando un total 27 experimentos. Las dosis de cloro utilizadas en las 27 pruebas se muestran en la tabla 4.3.

Tabla 4.3 Condiciones para las pruebas de oxidación

Condiciones	**Concentración del cloro (mg/L)**
Baja	20
Media	40
Alta	60

4.6 Determinación de la eficiencia de oxidación

Mediante el cociente de la $DQO_{oxidada}$ y la $DQO_{inicial}$, se determinó la eficiencia de oxidación. La DQO fue el parámetro que se usó para medir la oxidación de la materia orgánica, al comparar los valores del agua residual antes y después de la aplicación del oxidante.

Tener una alta eficiencia de oxidación en la DQO, no siempre indica que se tiene una buena reducción de materia orgánica. El cálculo de los mg de DQO oxidada/mg de cloro, se determinó mediante el cociente de la $DQO_{oxidada}$ y los mg de oxidante aplicado, que indica que por cada mg de oxidante aplicado se reduce una cantidad de materia orgánica presente en una muestra residual.

4.7 Análisis de resultados

Finalmente se hizo un análisis de resultados comparando las 3 calidades de agua: efluente sin acondicionamiento, efluente acondicionado con filtración previa y efluente acondicionado con el proceso de coagulación-floculación más filtración y concluir cuál logró una mayor reducción de color, STT, DQO y DBO_5.

5 Resultados y discusión

Los resultados obtenidos en este proyecto se presentan en este capítulo, se realizó un análisis para comparar cuál es el tratamiento viable de acuerdo a las características finales del efluente y concluir cual logra una mayor reducción en la DQO, DBO_5, SST y color.

Durante la experimentación se usó la siguiente nomenclatura para los diferentes calidades de agua, con el propósito de hacer más clara la información de los resultados

- CF-B Efluente acondicionado con el proceso de coagulación-floculación, dosis baja
- CF-M Efluente acondicionado con el proceso de coagulación-floculación, dosis media
- CF-A Efluente acondicionado con el proceso de coagulación-floculación, dosis alta
- FP-B Efluente acondicionado con filtración previa, dosis baja
- FP-M Efluente acondicionado con filtración previa, dosis media
- FP-A Efluente acondicionado con filtración previa, dosis alta
- ST-B Efluente sin tratamiento, dosis baja
- ST-M Efluente sin tratamiento, dosis media
- ST-A Efluente sin tratamiento, dosis alta

5.1 Pruebas de exploración y selección de oxidante

Para la selección de oxidante se analizaron los datos obtenidos de las pruebas realizadas con los oxidantes químicos: cloro y peróxido de hidrógeno, de acuerdo con las características finales del efluente, el cloro fue el oxidante que mostró una mayor reducción en la DQO así como también en el color. En las figuras 5.1 y 5.2 se muestra el comportamiento de las eficiencias de reducción de DQO del cloro y del peróxido de hidrógeno aplicando diferentes concentraciones de oxidante.

En la figura 5.1 se visualiza que las eficiencias de reducción de DQO aumentan al aumentar la dosis de cloro, que empleando dosis altas se alcanzan eficiencias del 16% mientras que al utilizar dosis de 20 mg/L se tienen eficiencias muy pequeñas. Caso contrario sucede con el peróxido de hidrógeno como se observa en la figura 5.2, el cual muestra un comportamiento ascendente en sus eficiencias utilizando dosis bajas y descendentes al aumentar la dosis; esto indica que el cloro tiene un comportamiento más estable en este caso.

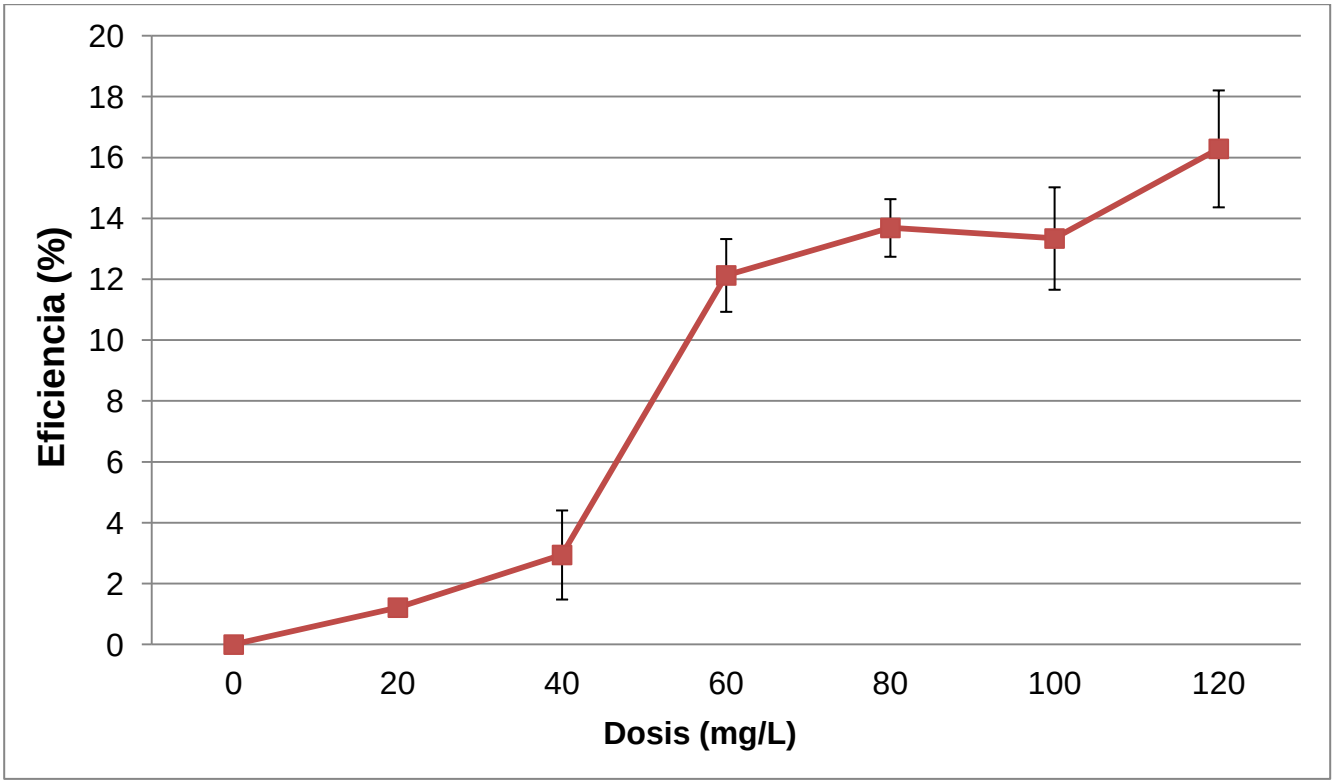


Figura 5.1 Eficiencia de reducción de DQO del cloro en las pruebas exploratorias

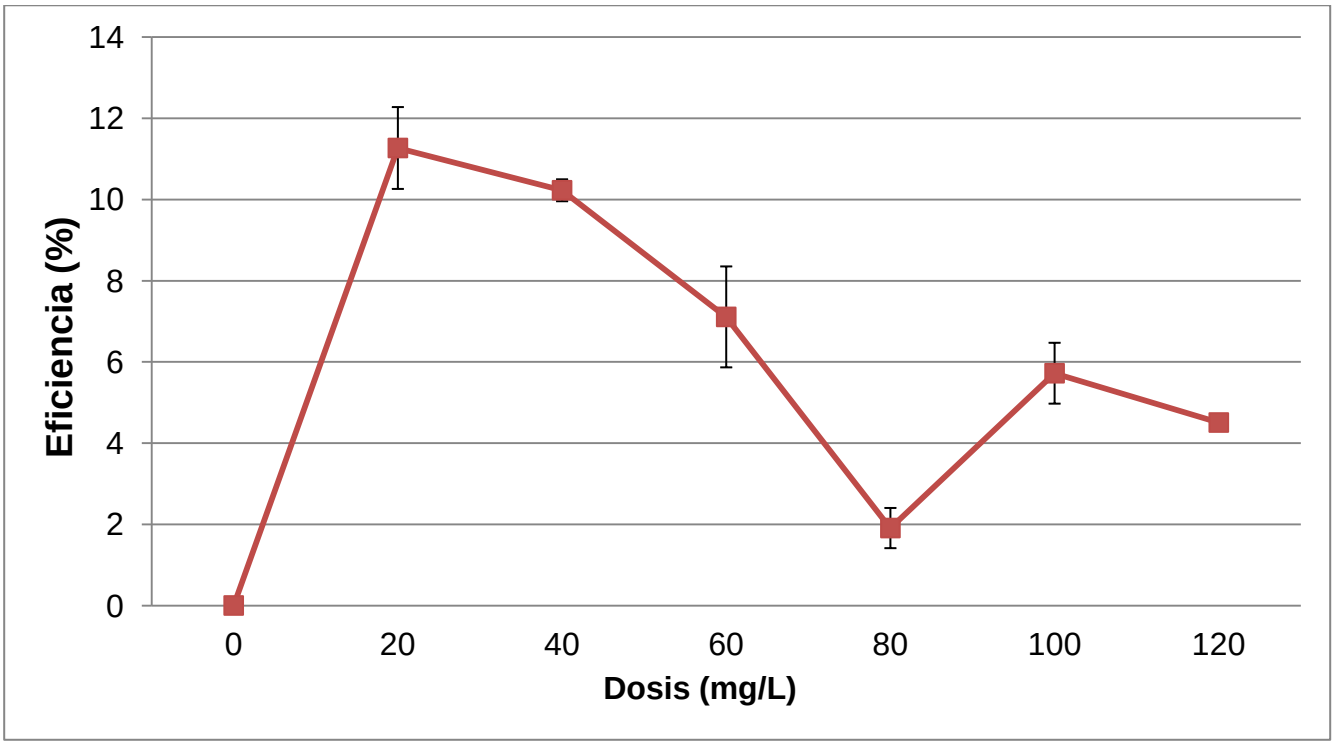


Figura 5.2 Eficiencia de reducción de DQO del peróxido de hidrógeno en las pruebas exploratorias

Al analizar la relación de los mg DQO oxidada/mg oxidante aplicado se observa que ésta disminuye al aumentar la dosis, lo cual indica que no siempre aumentar la dosis permite una mayor oxidación de la materia orgánica.

Los mayores valores de los mg de DQO oxidada/mg de oxidante que se presentan en la figura 5.3, se lograron al aplicar dosis de cloro que van desde los 60 a 80 mg/L, mientras que al aumentar la dosis a valores de entre 80 a 120 mg/L; los mg DQO reducida/mg de oxidante van disminuyendo de 0.98 ±0.03 a 0.78 ±0.05.

En la figura 5.4 se visualiza que empleando dosis de peróxido de hidrógeno de 40 a 120 mg/L la cantidad de DQO reducida por cada mg de oxidante se encuentra entre valores que van desde 1.475 ±0.04 a 0.2166 ±0.008; en el mismo intervalo, el cloro reduce más DQO/mg de oxidante.

Aunque a 20 mg/L de H_2O_2 se logran reducciones más altas de DQO que el cloro en esa misma concentración, el hecho de presentar un comportamiento inestable a mayores dosis de peróxido de hidrógeno que presentan menor eficiencia, es cuestionable.

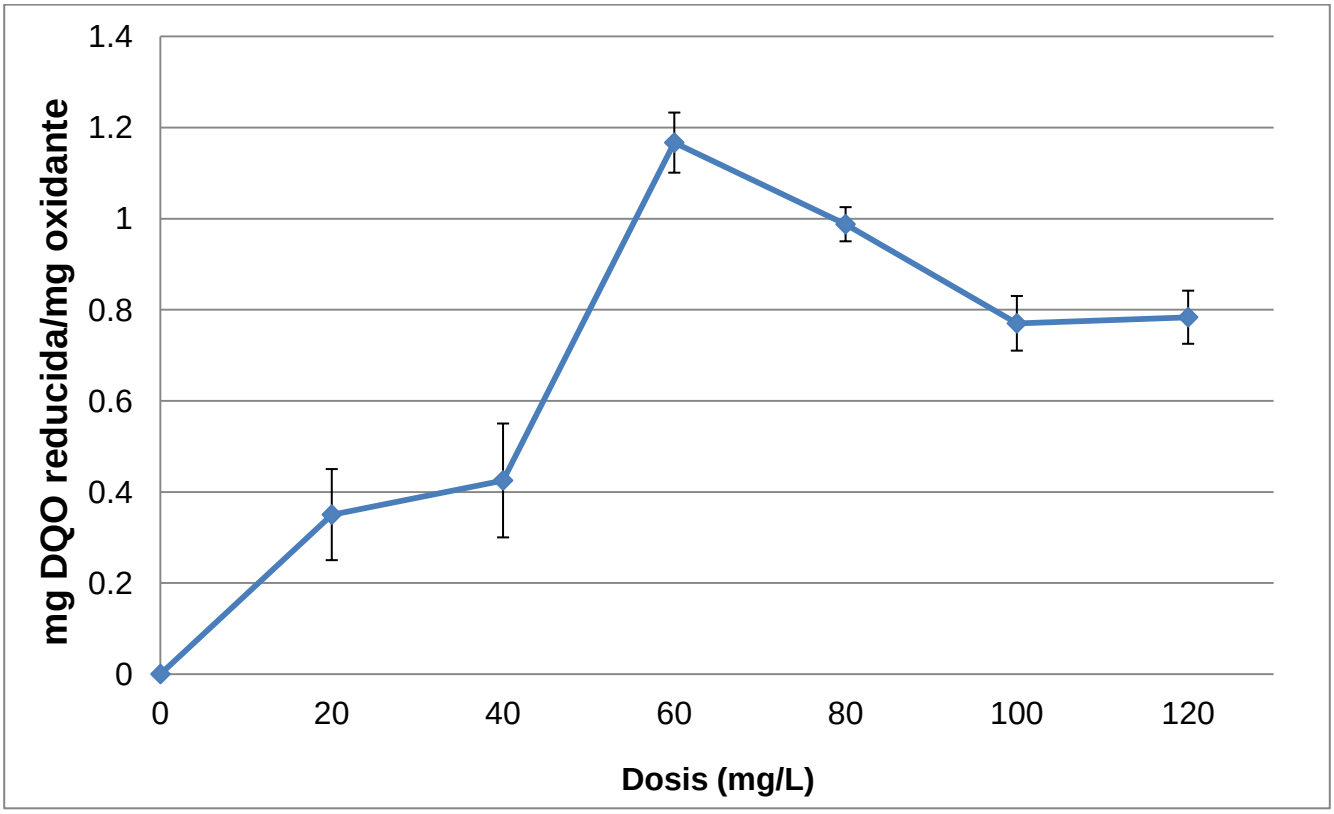


Figura 5.3 Comportamiento de mg DQO reducida/mg cloro aplicado en las pruebas exploratorias

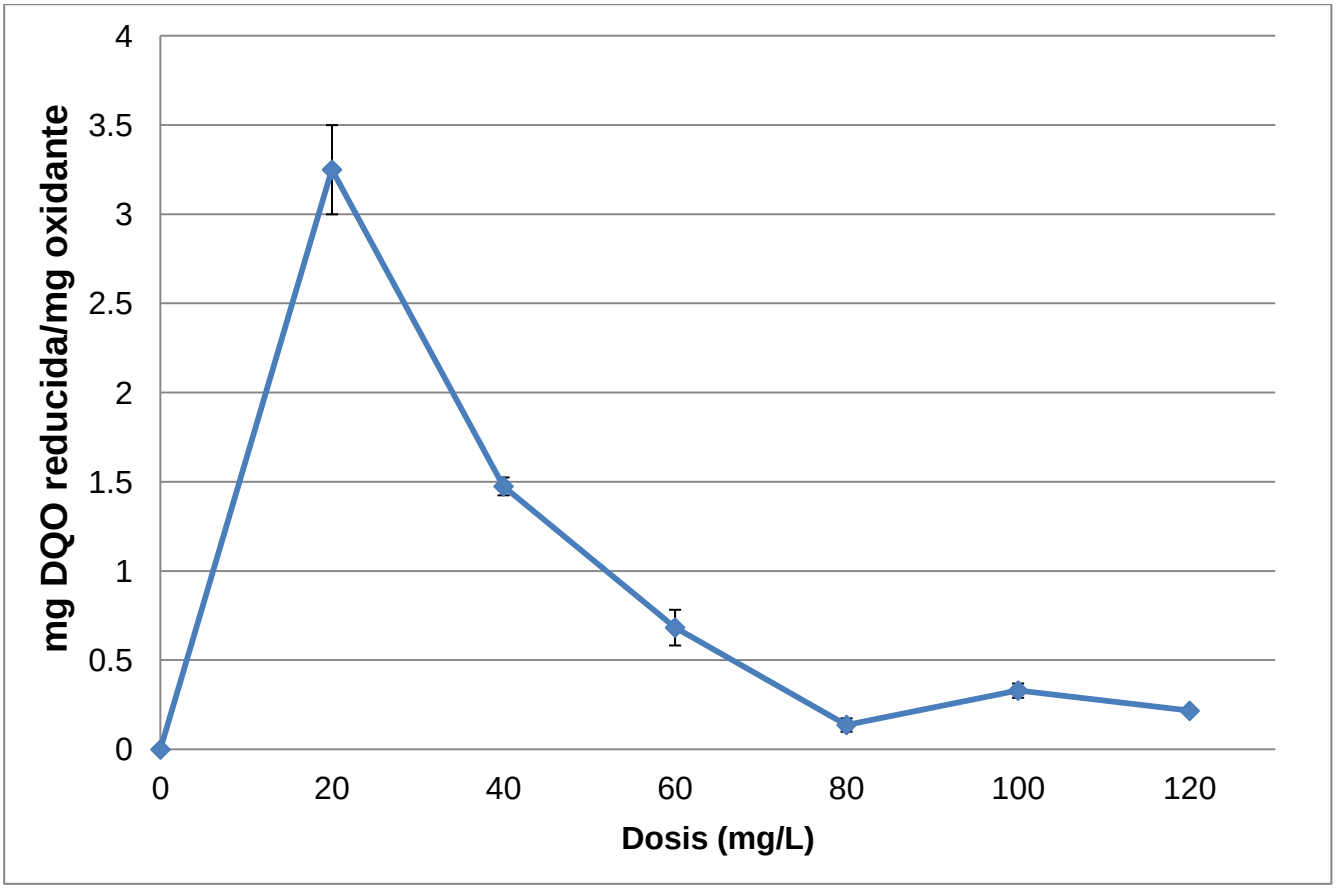


Figura 5.4 Comportamiento de mg DQO reducida/mg peróxido de hidrógeno aplicado en las pruebas exploratorias

A pesar de observar mejores eficiencias de reducción de DQO y mayores mg DQO reducida/mg oxidante en dosis de 60 a 120 mg/L de cloro, estas últimas no se eligieron debido a que son dosis muy altas y se tendría una repercusión en los costos.

Una vez establecido tanto el oxidante (cloro), así como el límite de concentración, para definir el tiempo de reacción en las pruebas de oxidación, se realizaron varios experimentos aplicando dosis de 20, 40 y 60 mg/L de cloro a diferentes tiempos: 20, 30 y 40 minutos.

Como se visualiza en las figuras 5.5, 5.6 y 5.7 se obtuvieron las eficiencias de DQO en los tiempos mencionados, los datos arrojados muestran que utilizando tiempos de reacción de 20, 30 y 40 minutos las eficiencias se mantuvieron entre valores aproximadamente que van de 3 a 14 % en los 3 casos, de lo cual se concluye que el tiempo no influye en la obtención de una mayor reducción en la DQO.

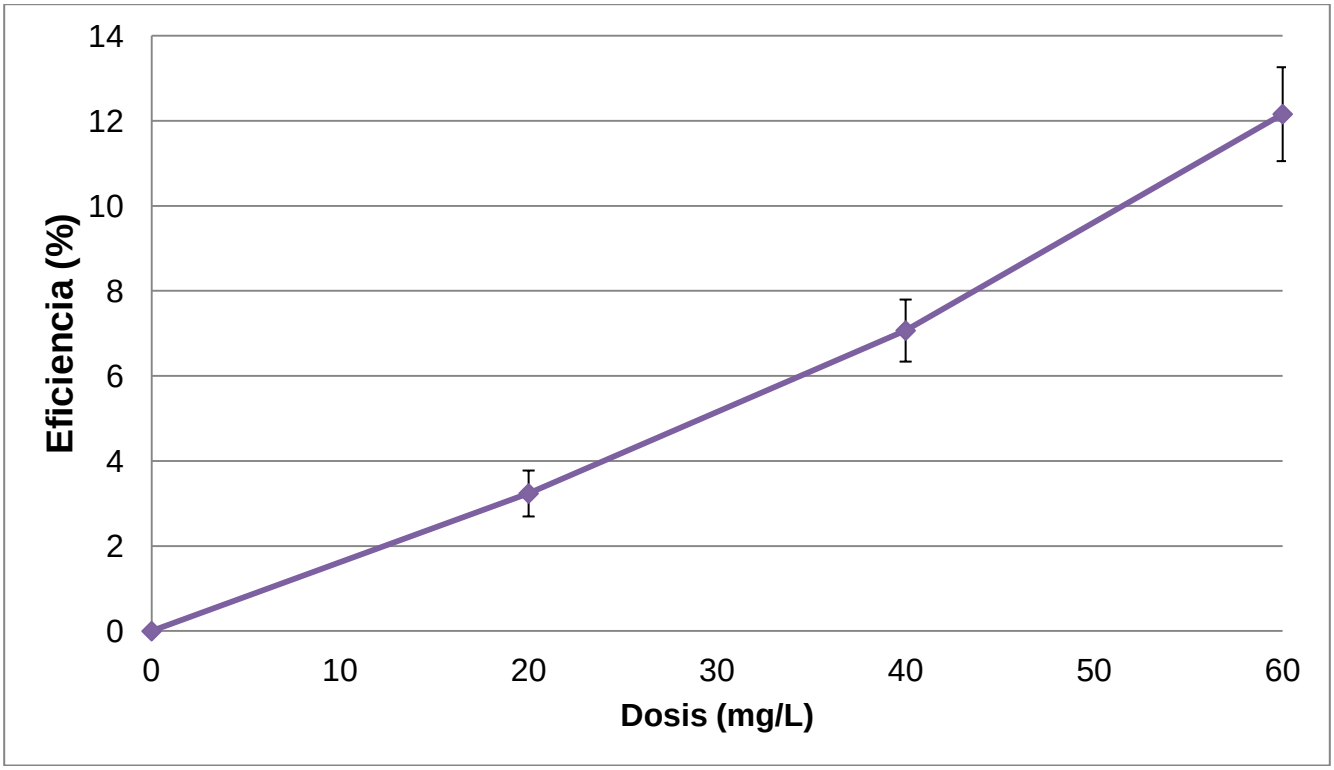


Figura 5.5 Eficiencias de DQO en un tiempo de reacción de 20 minutos

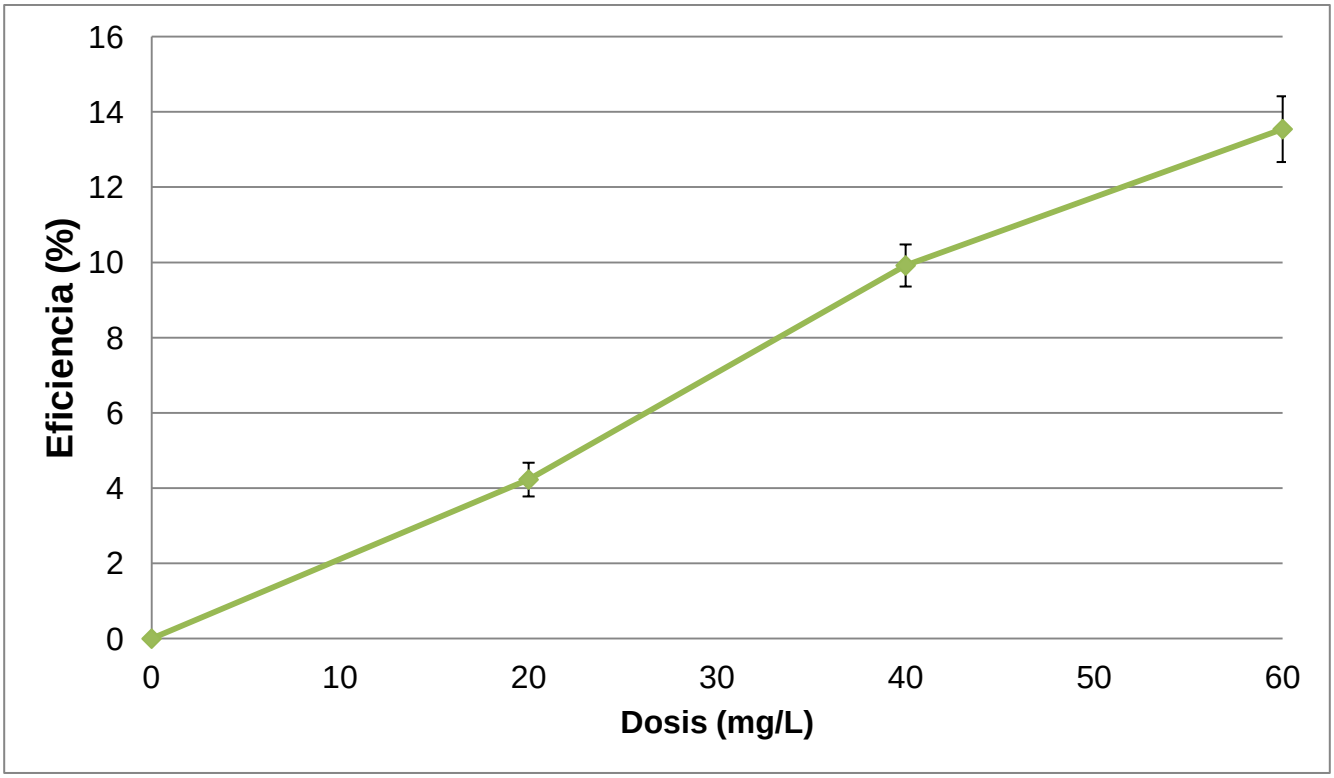


Figura 5.6 Eficiencias de DQO en un tiempo de reacción de 30 minutos

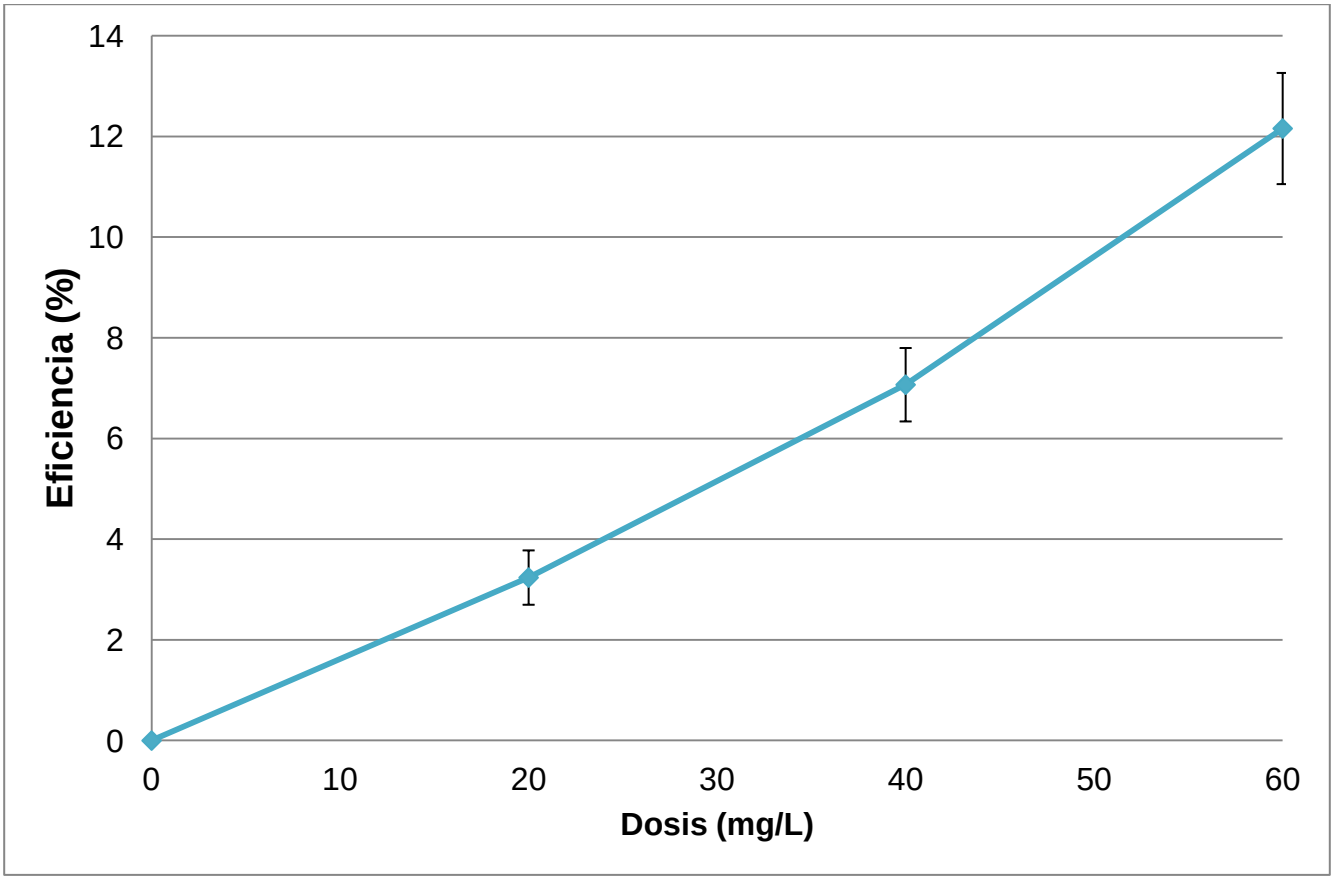


Figura 5.7 Eficiencias de DQO en un tiempo de reacción de 40 minutos

5.2 Calidad del agua

En la tabla 5.1 se muestran los parámetros fisicoquímicos que se midieron para determinar la calidad del agua antes del proceso de oxidación.

Se observa, que los parámetros más variantes son el color y la DQO, obteniéndose en el primero valores que van desde 4650 a 11,111 en la escala Pt-Co; mientras que la DQO arroja valores desde 404 a 1366 mg/L. El parámetro más estable es el pH ya que se mantuvo en un valor de 7.6 ±0.55.

Las pruebas se realizaron por triplicado a las tres calidades de agua, es importante señalar que a la semana se realizaban 12 pruebas de una sola calidad de agua y estas se realizaban los días miércoles, jueves y viernes; ya que para determinar la DBO_5 la muestra tenía que incubarse en un periodo de 5 días y si se analizaban los días lunes y martes, las muestras saldrían los fines de semana y por tal motivo no podrían leerse. El flujo y la carga de entrada

promedio del agua, que recibe la Planta, no es la misma todos los días, esto debido al incremento de material refractario en las descargas de aguas provenientes de empresas usuarias de Reciclagua.

Tabla 5.1 Calidad del agua antes del proceso de oxidación

	pH (unidades)	**SST (mg/L)**	**Color (Pt-Co)**	**DQO (mg/L)**	**DBO_5 (mg/L)**
Media aritmética	7.62	167.92	7609.94	743.14	159.55
Moda	7.88	127	4840	404	-
Mediana	7.88	150	7593	592	162
Valor máximo	8.21	237	11111	1366	183
Valor mínimo	6.73	120	4650	404	133
Desviación estándar	0.55	40.76	2218.30	308.42	20.02
Varianza	0.30	1661.57	4920855.93	95128.82	401.02

5.3 Eficiencia de oxidación para el efluente sin acondicionamiento

Como se observa en la figura 5.8, este acondicionamiento sin tratamiento previo logró una mínima eficiencia de reducción en la DQO al aplicar las diferentes dosis de agente oxidante (20, 40 y 60 mg/L); teniendo como valor mayor a la eficiencia de 17.24% ±0.97 y la menor de 7.38% ±1.09.

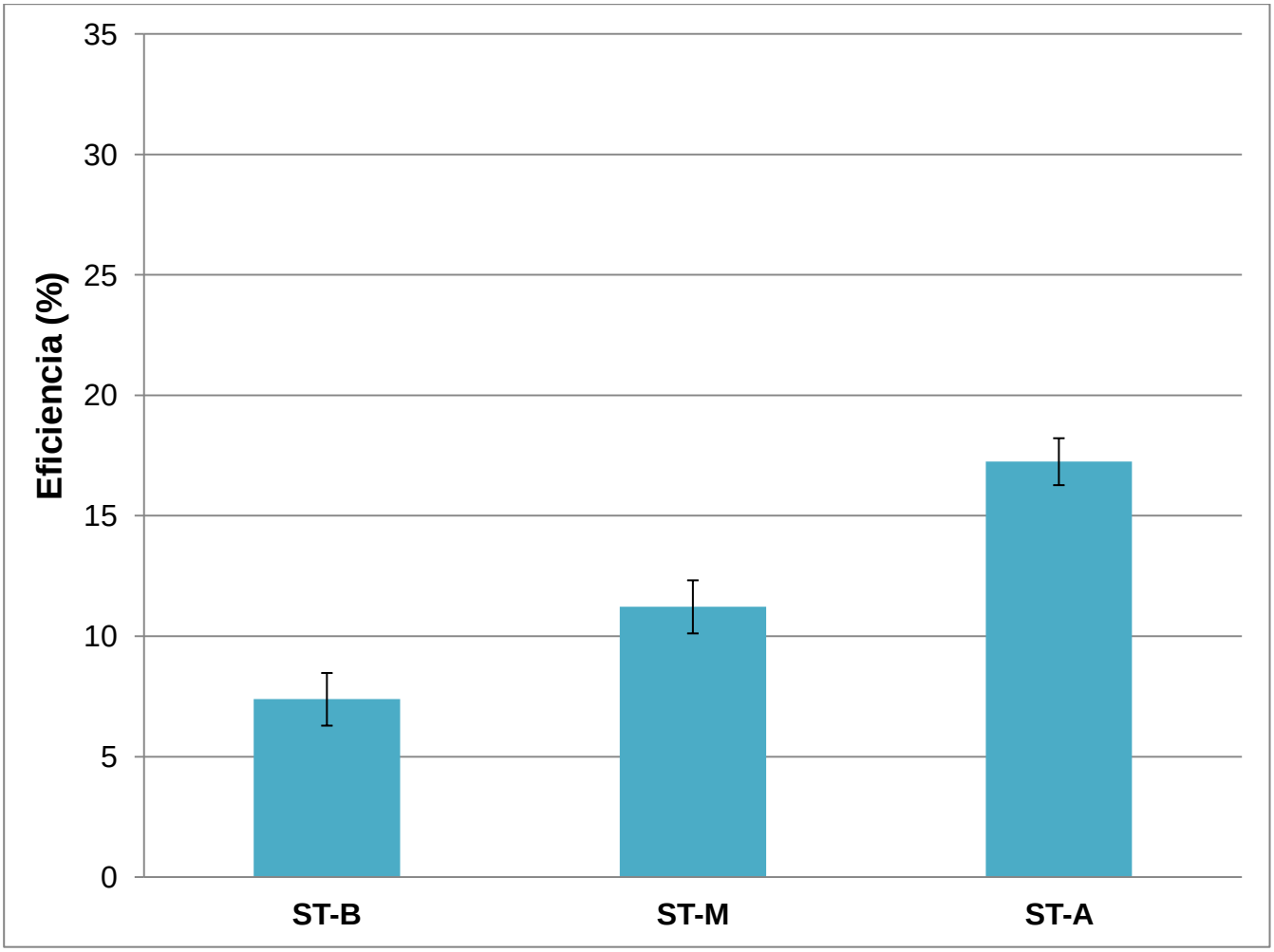


Figura 5.8 Eficiencia de DQO para el efluente sin tratamiento

5.4 Eficiencia de oxidación para el efluente acondicionado con filtración previa

El efluente acondicionado con filtración previa alcanzó una eficiencia de reducción en la DQO de 27.14% ±2.66 al aplicar la dosis alta de agente oxidante y un valor de 14.15% ±2.59 al aplicar la dosis baja. En la figura 5.9 se observa que las eficiencias aumentan al incrementar la concentración de oxidante.

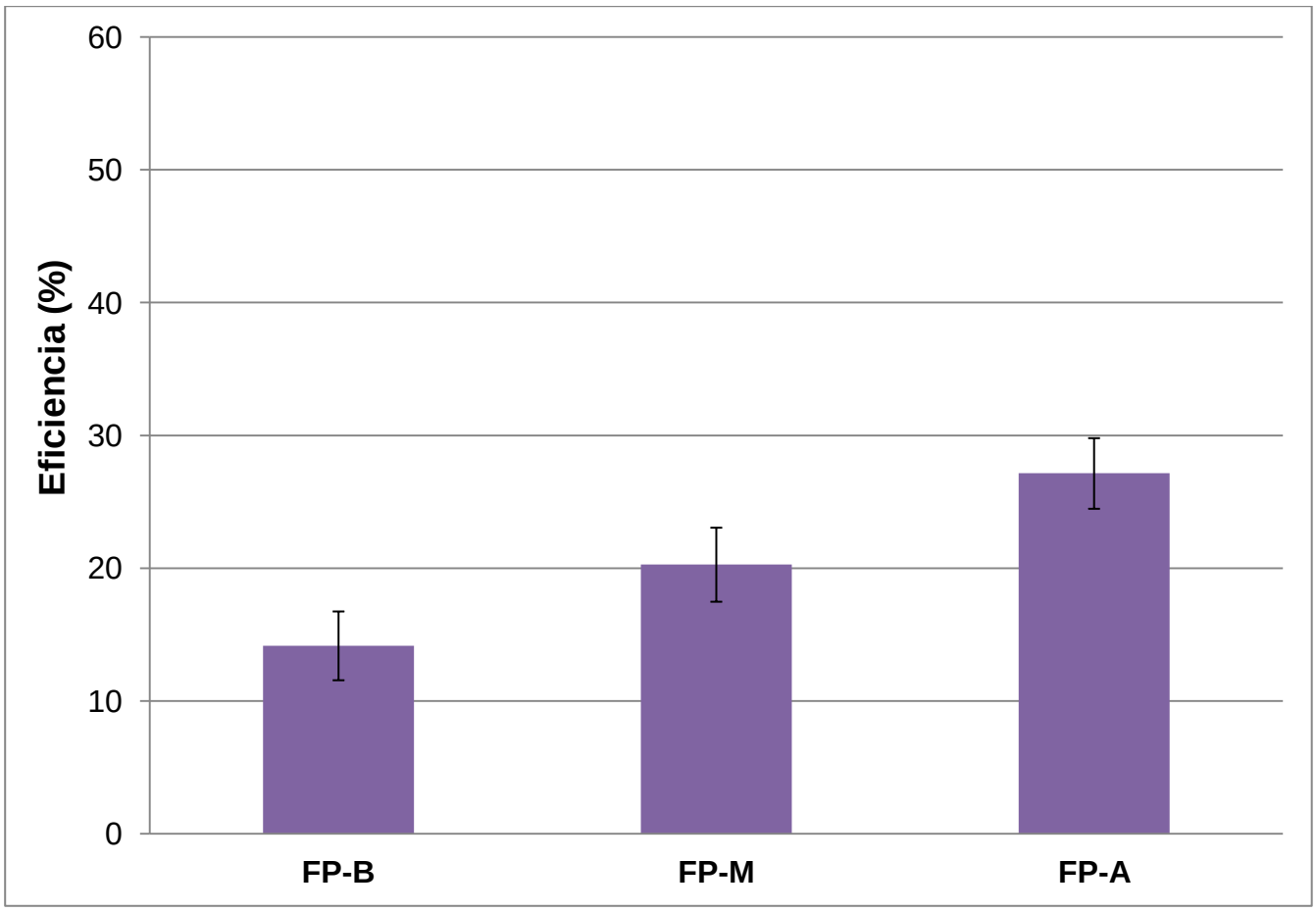


Figura 5.9 Eficiencia de DQO para el efluente acondicionado con filtración previa

5.5 Eficiencia de oxidación para el efluente acondicionado con el proceso de coagulación-floculación

Al realizar la prueba de jarras preliminar en la Planta Piloto de Tratamiento de Aguas Residuales, se determinó la cantidad de dosis de coagulante, para obtener un efluente de mejor calidad, el sulfato de aluminio fue el coagulante empleado, con una concentración de 200 mg/L y con un valor de 6 en el pH óptimo, la prueba se realizó por duplicado.

Sin embargo esta dosis y este pH óptimo no se pudieron utilizar para acondicionar el efluente de la experimentación con el proceso de coagulación-floculación, debido a que los parámetros que midieron la calidad del agua resultaron con valores muy altos con respecto al muestreo anterior, por lo que se tuvo que repetir la prueba de jarras, empleando 300 mg/L de sulfato de aluminio como coagulante y obteniéndose un pH óptimo de 5.

De acuerdo con los datos obtenidos, en la figura 5.10 se observa que éste es el tratamiento más eficiente en la reducción de la DQO en las tres condiciones que se analizaron; alcanzando eficiencias de 57.93% ±1.47 en condiciones bajas de cloro y 71.04% ±2.62 en condiciones altas, además que es el acondicionamiento más confiable debido a que su desviación estándar es pequeña (2.53-3.68%).

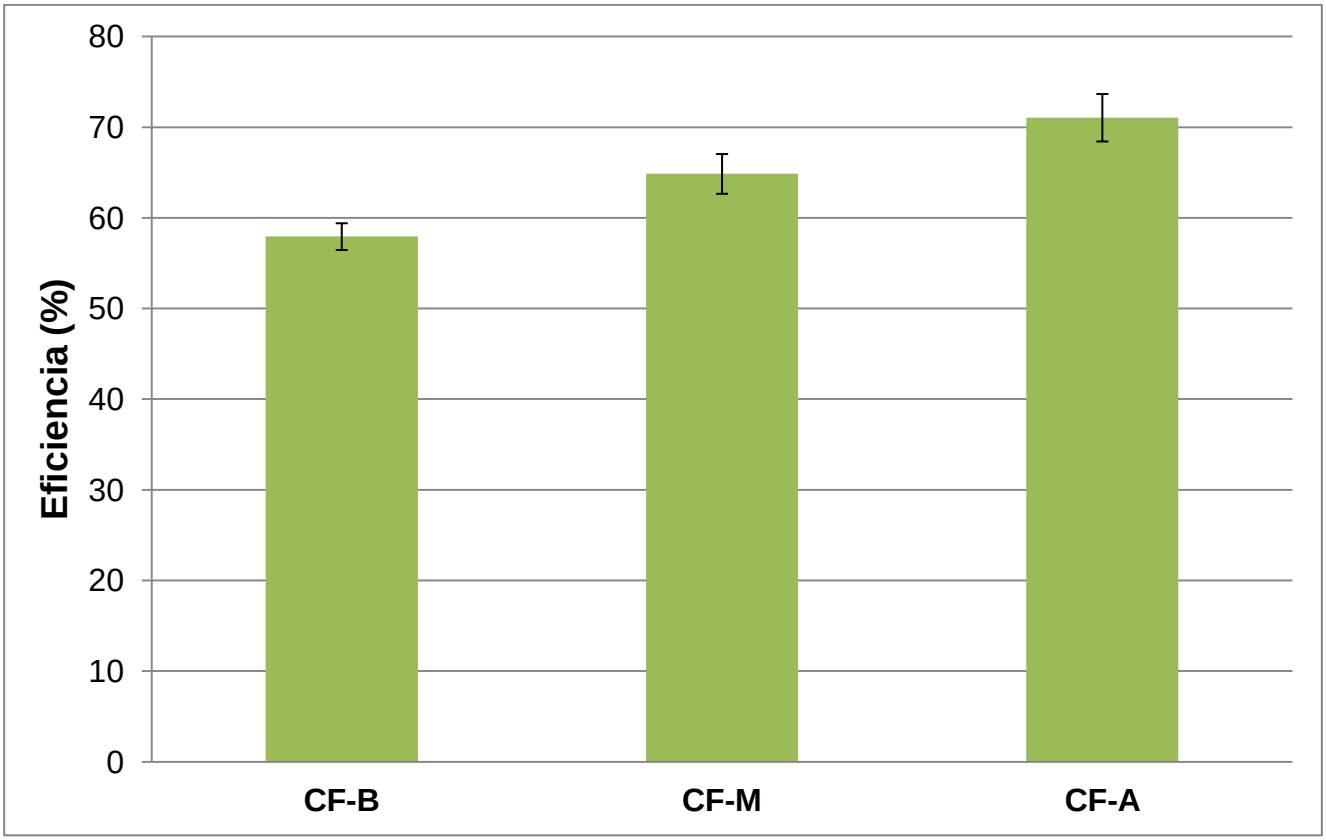


Figura 5.10 Eficiencia de DQO para el efluente acondicionado con el proceso de coagulación-floculación

5.6 Eficiencia de oxidación en los 3 tratamientos del agua

En las tres condiciones que se analizaron, se obtuvieron las mejores eficiencias de reducción de DQO en el efluente acondicionado con el proceso de coagulación-floculación, seguido del efluente acondicionado con filtración previa y por último el efluente sin acondicionamiento.

En la figura 5.11 se presentan los valores promedio para los diferentes tratamientos empleados en este proyecto, se visualiza que la condición más favorable para oxidar DQO para obtener las mejores eficiencias, es la aplicación de dosis de cloro de 60 mg/L.

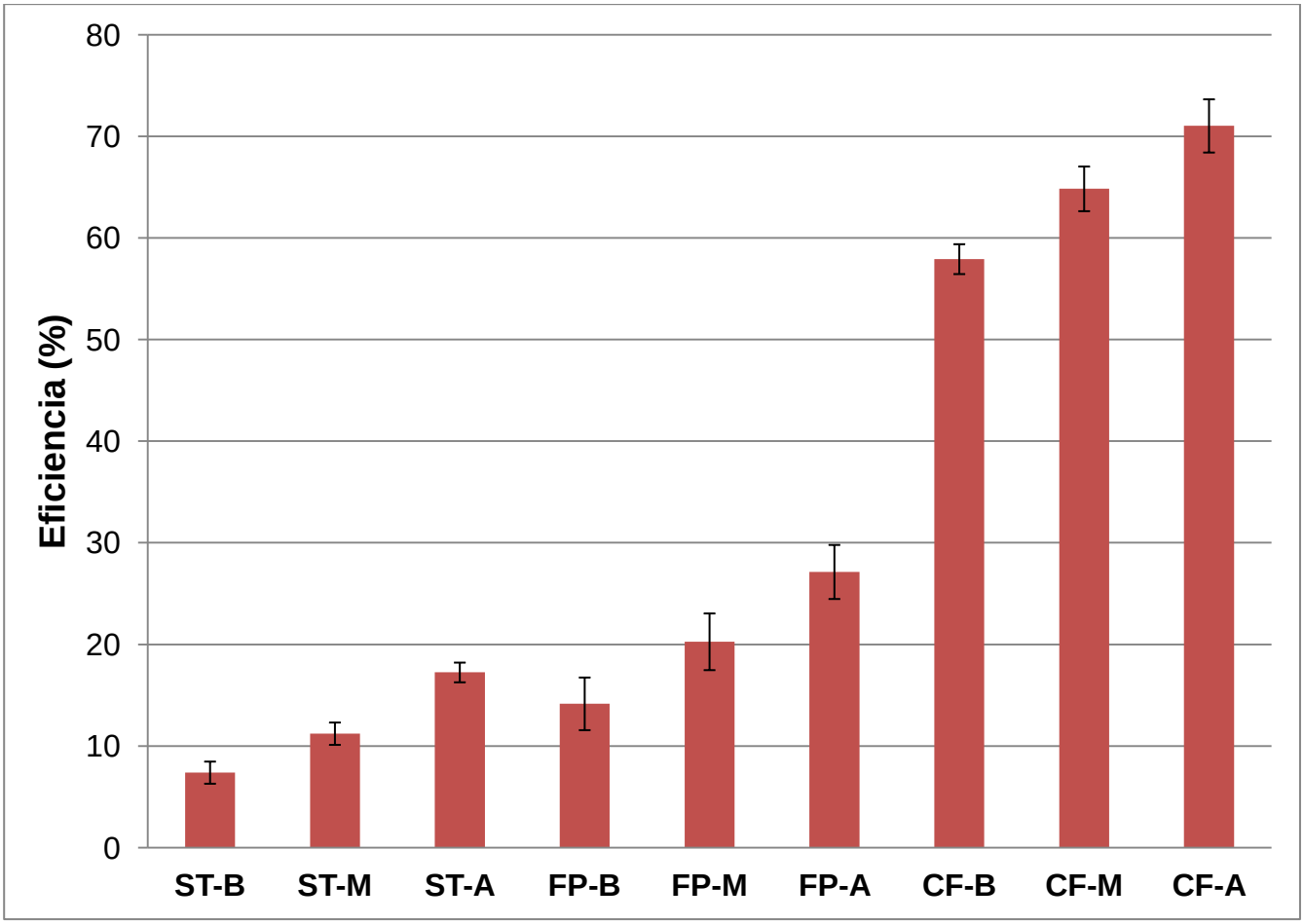


Figura 5.11 Eficiencia promedio de DQO en los tres tratamiento de oxidación

5.7 Parámetros de calidad del agua en el proceso de oxidación en el efluente sin tratamiento

La tabla 5.2 muestra los resultados obtenidos en 3 corridas para el efluente sin acondicionamiento en las condiciones que se analizaron, cada parámetro se realizó con tres réplicas (DQO, DBO_5, SST, Color y pH), realizándose un total de 9 pruebas. En la tabla 5.3 se muestra un promedio de cada parámetro y su desviación estándar.

*Nota: en una corrida se realizaban 3 pruebas (dosis baja: 20 mg/L, dosis media: 40 mg/L y dosis alta: 60 mg/L) dando un total de 3 corridas en cada acondicionamiento. Cabe mencionar que los valores iniciales que se muestran en la tabla, corresponden a la salida de la planta antes de la oxidación.

Tabla 5.2 Resultados obtenidos de los parámetros de calidad del agua en el efluente sin acondicionamiento, después de la oxidación con cloro.

Dosis de agente oxidante (mg/L)	pH (unidades)	SST (mg/L)	Color (Pt-Co)	DQO (mg/L)	DBO_5 (mg/L)
20	8.03	223	9722	1280	164
40	8.14	209	8750	1229	156
60	8.19	194	8046	1145	149
Inicial	**7.91**	**237**	**11111**	**1366**	**179**
20	8.03	206	9589	1255	166
40	8.13	197	8537	1200	159
60	8.17	177	7865	1118	151
Inicial	**7.89**	**223**	**10752**	**1355**	**181**
20	8.01	191	9459	1230	165
40	8.12	180	8333	1180	159
60	8.16	163	7777	1101	154
Inicial	**7.88**	**211**	**10526**	**1344**	**183**

Tabla 5.3 Promedio de resultados para cada parámetro con su desviación estándar

Parámetro / **Concentración**	20 mg/L	40 mg/L	60 mg/L
pH (unidades)	8.02	8.13	8.17
Desviación estándar	0.01	0.01	0.02
SST (mg/L)	207	195	178
Desviación estándar	15.74	14.38	15.74
Color (Pt-Co)	9590	8540	7896
Desviación estándar	131.50	208.52	137.15
DQO (mg/L)	1255	1203	1121
Desviación estándar	25	24.64	22.19
DBO_5 (mg/L)	165	158	151
Desviación estándar	1.00	1.73	2.52

En la tabla 5.2 y 5.3 se visualiza que la oxidación del efluente sin realizar ningún tratamiento previo no logró una reducción considerable en los parámetros como la DQO, DBO_5, color y SST. En las tablas 5.2 y 5.3, se puede observar que los valores de los parámetros no varían significativamente, sin embargo es un proceso confiable analizando parámetros como la DBO_5 debido a que su desviación estándar es muy baja, menor a 2.52% empleando las tres condiciones de agente oxidante (20 mg/L, 40 mg/L y 60 mg/L).

Este acondicionamiento reduce un 12.94% de los sólidos suspendidos totales y 12.70% de la DBO_5 utilizando una dosis media (40 mg/L) de cloro; en cambio con una dosis de 60 mg/L de cloro se reduce el 20.53% de sólidos suspendidos totales y 17% de la DBO_5.

5.8 Parámetros de calidad del agua en el proceso de oxidación en el efluente acondicionado con filtración previa

La tabla 5.4 muestra los resultados obtenidos en 3 corridas para el efluente acondicionado con filtración previa en las condiciones que se analizaron, cada parámetro se llevó a cabo por triplicado (DQO, DBO_5, SST, Color y pH), realizándose un total de 9 pruebas. En la tabla 5.5 se muestra un promedio de cada parámetro y su desviación estándar.

*Nota: en una corrida se realizaban 3 pruebas (dosis baja: 20 mg/L, dosis media: 40 mg/L y dosis alta: 60 mg/L) dando un total de 3 corridas en cada acondicionamiento. Cabe mencionar que los valores iniciales que se muestran en la tabla, corresponden a la salida de la planta antes realizar la filtración previa y la oxidación.

Tabla 5.4 Resultados obtenidos de los parámetros de calidad del agua en el efluente acondicionado con filtración previa

Dosis de agente oxidante (mg/L)	pH (unidades)	SST (mg/L)	Color (Pt-Co)	DQO (mg/L)	DBO_5 (mg/L)
20	8.31	120	7291	690	131
40	8.40	105	6566	649	121
60	8.45	93	5833	600	116
Inicial	**8.19**	**188**	**8536**	**795**	**166**
20	8.34	120	7368	685	129
40	8.41	110	6603	632	119
60	8.44	97	5932	569	111
Inicial	**8.21**	**195**	**8642**	**780**	**162**
20	8.32	117	7526	650	129
40	8.39	108	6572	600	116
60	8.42	93	6034	550	109
Inicial	**8.17**	**190**	**8750**	**784**	**159**

Tabla 5.5 Promedio de resultados para cada parámetro con su desviación estándar

Parámetro / **Concentración**	20 mg/L	40 mg/L	60 mg/L
pH (unidades)	8.32	8.40	8.44
Desviación estándar	0.02	0.01	0.02
SST (mg/L)	119	108	94
Desviación estándar	1.44	2.50	2.89
Color (Pt-Co)	7395	6580	5933
Desviación estándar	119.80	19.86	100.50
DQO (mg/L)	675	627	573
Desviación estándar	21.79	24.88	25.24
DBO_5 (mg/L)	130	119	112
Desviación estándar	1.15	2.52	3.61

Los valores mostrados en las tablas 5.4 y 5.5, indican que al realizar una filtración previa antes de la oxidación ayudó a reducir los sólidos suspendidos totales principalmente, ya que se observa que a dosis de 20 mg/L de cloro se tienen valores de 119 mg/L en SST y en dosis de 60 mg/L se llegan a valores de 94 mg/L, este acondicionamiento retiene gran parte de residuos de materia suspendida presente. Los datos en la tabla 5.5 indican que aumentar la dosis de cloro, ayuda a reducir parcialmente los contaminantes sólidos presentes en la muestra, pero de acuerdo con las características del efluente, este tratamiento no es muy eficiente debido a que la reducción en la DQO tiene valores de 786 a 573 mg/L lo que representa que no se logran grandes eficiencias de reducción en este parámetro.

En la figura 5.12 se presentan las eficiencias de reducción en los parámetros evaluados al acondicionar el efluente con una filtración previa, antes del proceso de oxidación. Como se visualiza en la gráfica, el mejor parámetro que logra una mayor reducción fueron los sólidos suspendidos totales, obteniéndose una eficiencia del 30.54% ±0.30, seguido por la DBO_5 que obtuvo un valor de 9.44% ± 0.56 en su eficiencia.

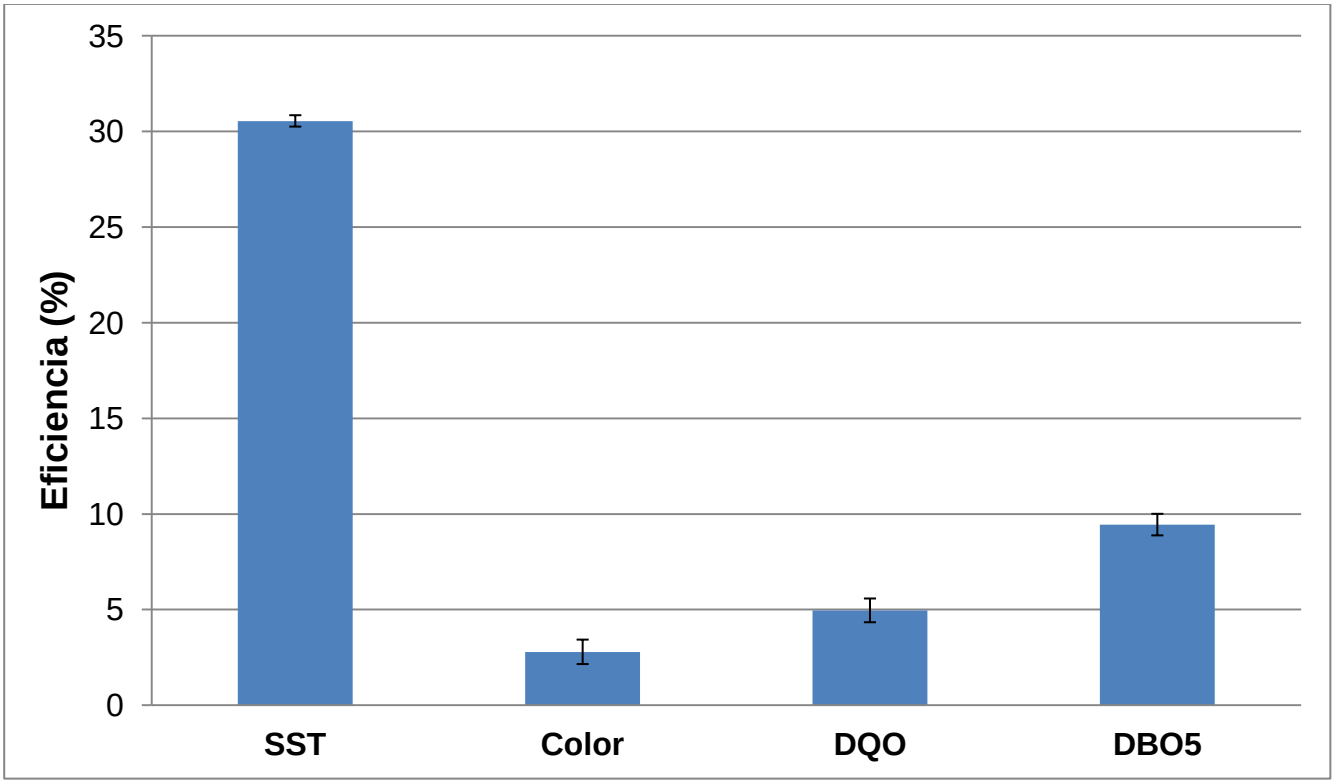


Figura 5.12 Eficiencias de reducción en los parámetros evaluados antes del proceso de oxidación al acondicionar el efluente con filtración previa

5.9 Parámetros de calidad del agua en el proceso de oxidación en el efluente acondicionado con el proceso de coagulación-floculación

La tabla 5.6 muestra los resultados obtenidos en 3 corridas para el efluente acondicionado con el proceso de coagulación en las condiciones que se analizaron, cada parámetro se llevó a cabo por triplicado (DQO, DBO_5, SST, Color y pH), realizándose un total de 9 pruebas. En la tabla 5.7 se muestra un promedio de cada parámetro y su desviación estándar.

*Nota: en una corrida se realizaban 3 pruebas (dosis baja: 20 mg/L, dosis media: 40 mg/L y dosis alta: 60 mg/L) dando un total de 3 corridas en cada acondicionamiento. Cabe mencionar que los valores iniciales que se muestran en la tabla, corresponden a la salida de la planta antes del acondicionamiento y la oxidación.

Tabla 5.6 Resultados obtenidos de los parámetros de calidad del agua en el efluente acondicionado con el proceso de coagulación.

Dosis de agente oxidante(mg/L)	pH (unidades)	SST (mg/L)	Color (Pt-Co)	DQO (mg/L)	DBO_5 (mg/L)
20	6.76	32	2941	430	37
40	6.85	28	2000	366	29
60	7.10	20	1316	312	20
Inicial	**6.75**	**150**	**9459**	**985**	**138**
20	6.80	30	2777	390	31
40	6.87	24	1923	331	25
60	7.14	16	1282	268	19
Inicial	**6.73**	**144**	**9333**	**933**	**135**
20	6.82	28	2631	385	29
40	6.86	22	1851	310	23
60	7.15	12	1190	250	17
Inicial	**6.74**	**138**	**9210**	**945**	**133**

Tabla 5.7 Promedio de resultados para cada parámetro con su desviación estándar

Parámetro / **Concentración**	20 mg/L	40 mg/L	60 mg/L
pH (unidades)	6.79	6.86	7.13
Desviación estándar	0.03	0.01	0.03
SST (mg/L)	30	25	16
Desviación estándar	2.00	3.06	4.00
Color (Pt-Co)	2783	1925	1263
Desviación estándar	155.09	74.51	65.19
DQO (mg/L)	402	336	277
Desviación estándar	24.66	28.29	31.90
DBO_5 (mg/L)	32	26	19
Desviación estándar	4.16	3.06	2.00

De acuerdo con los resultados mostrados en las tablas 5.6 y 5.7, el efluente acondicionado con este proceso tiene un bajo contenido en sólidos suspendidos totales y DBO_5, 30 ±2 y 32 ±4.16 mg/L respectivamente al aplicar dosis de 20 mg/L. Mientras que al aplicar dosis de cloro de 60 mg/L se tienen valores de 16±4 mg/L en sólidos suspendidos y totales y 19±2 mg/L en DBO_5.

Este acondicionamiento presenta un bajo contenido en los parámetros evaluados como la DQO y el color consiguiendo eficiencias de reducción de 86.46% y 70.96% al aplicar una dosis alta. Utilizar un tratamiento fisicoquímico de coagulación-floculación antes de la oxidación, ayudó a la eliminación de los coloides en suspensión y materia orgánica para obtener un efluente con mayor calidad.

En la figura 5.13 se presentan las eficiencias de reducción en los parámetros evaluados antes del proceso de oxidación. En la gráfica se visualiza que aplicando un tratamiento fisicoquímico se obtiene un efluente con mayor calidad, ya que los parámetros se reducen en más del 50 %. La DQO obtuvo una eficiencia de reducción del 51.89% ± 1.47, mientras que la del color fue de 62.13% ±1.52.

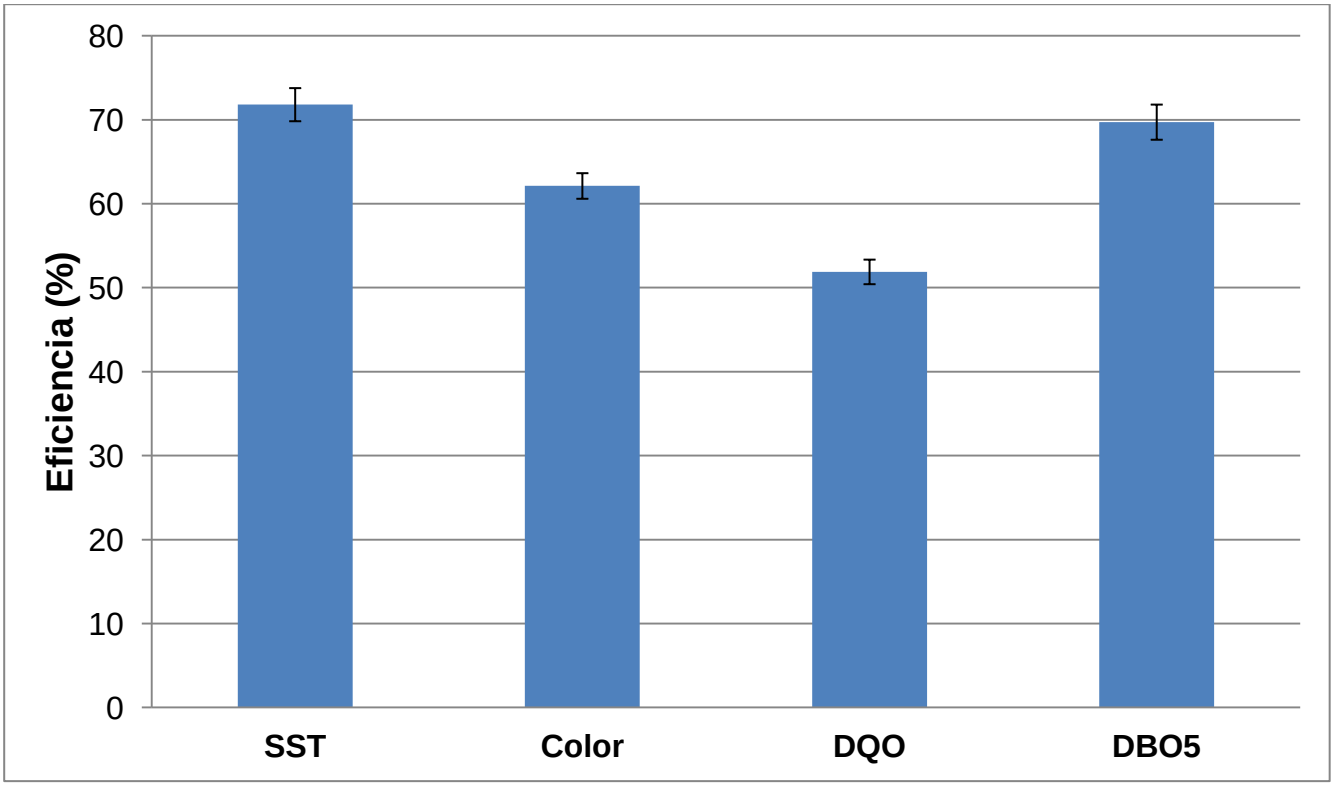


Figura 5.13 Eficiencias de reducción en los parámetros evaluados antes del proceso de oxidación al acondicionar el efluente con el proceso de coagulación

5.10 Comparativo de los parámetros evaluados en los 3 tratamientos

En las siguientes figuras (5.14, 5.15, 5.16, 5.17 y 5.18) se observa una comparación de cada uno de los parámetros evaluados (pH, SST, Color, DQO y DBO_5) en los tres tratamientos de oxidación propuestos en este proyecto.

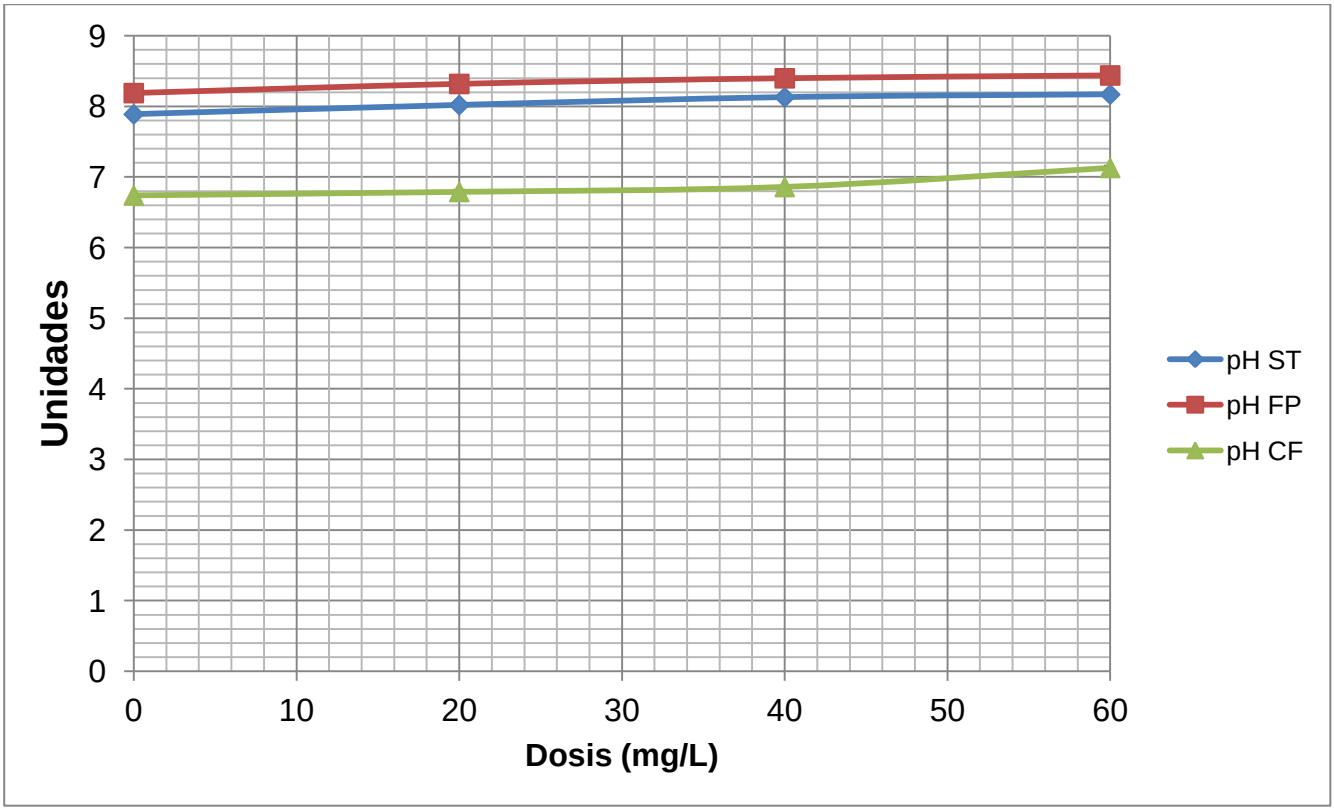


Fig.5.14 Comparativa de pH en los tres tratamientos

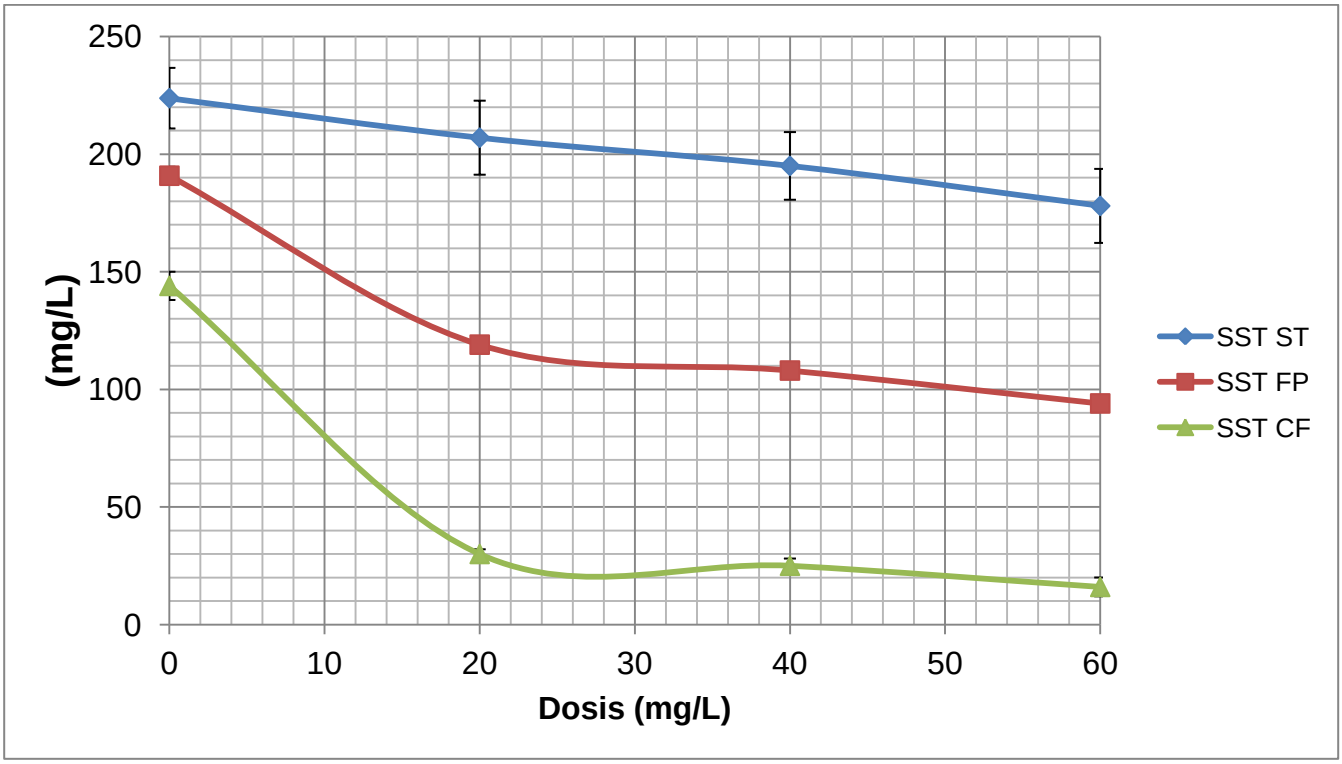


Fig.5.15 Comparativa de sólidos suspendidos totales en los tres tratamientos

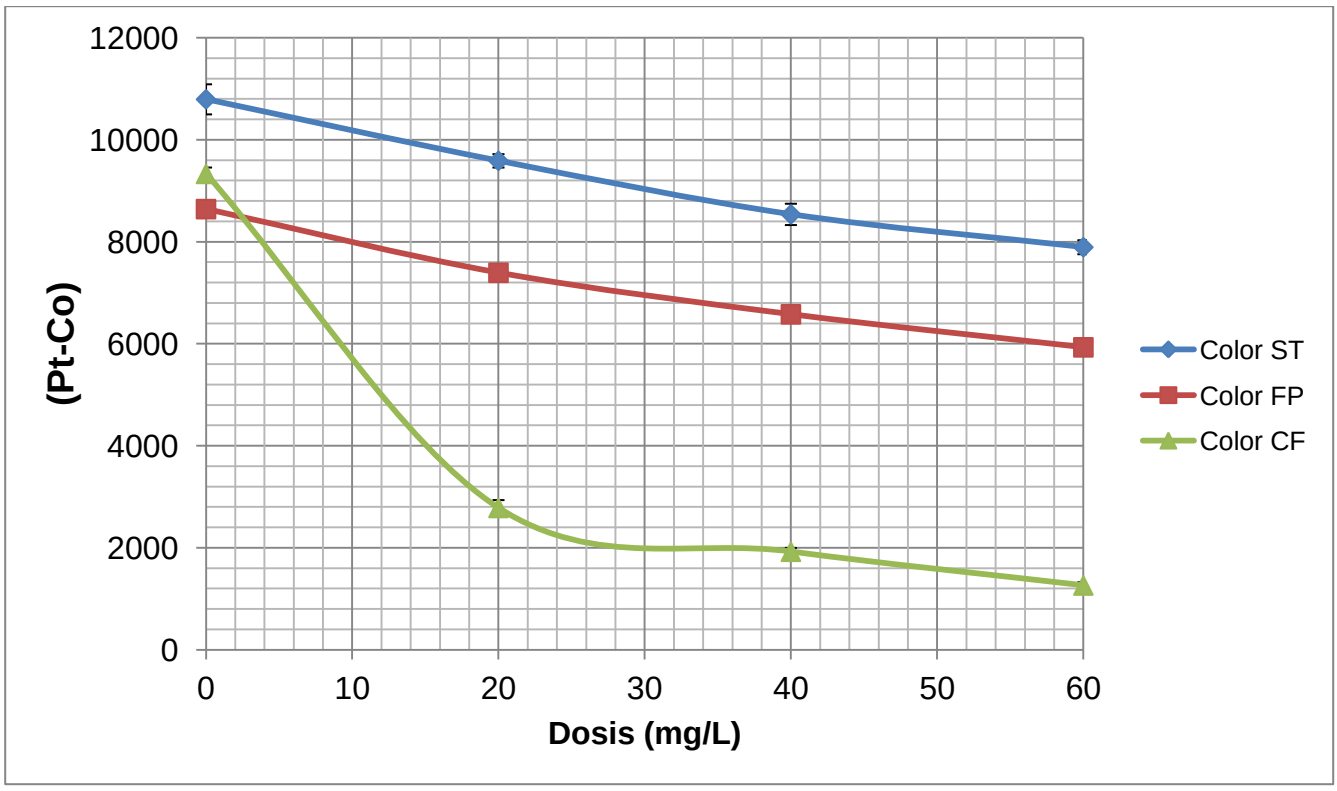


Fig.5.16 Comparativa de color en los tres tratamientos

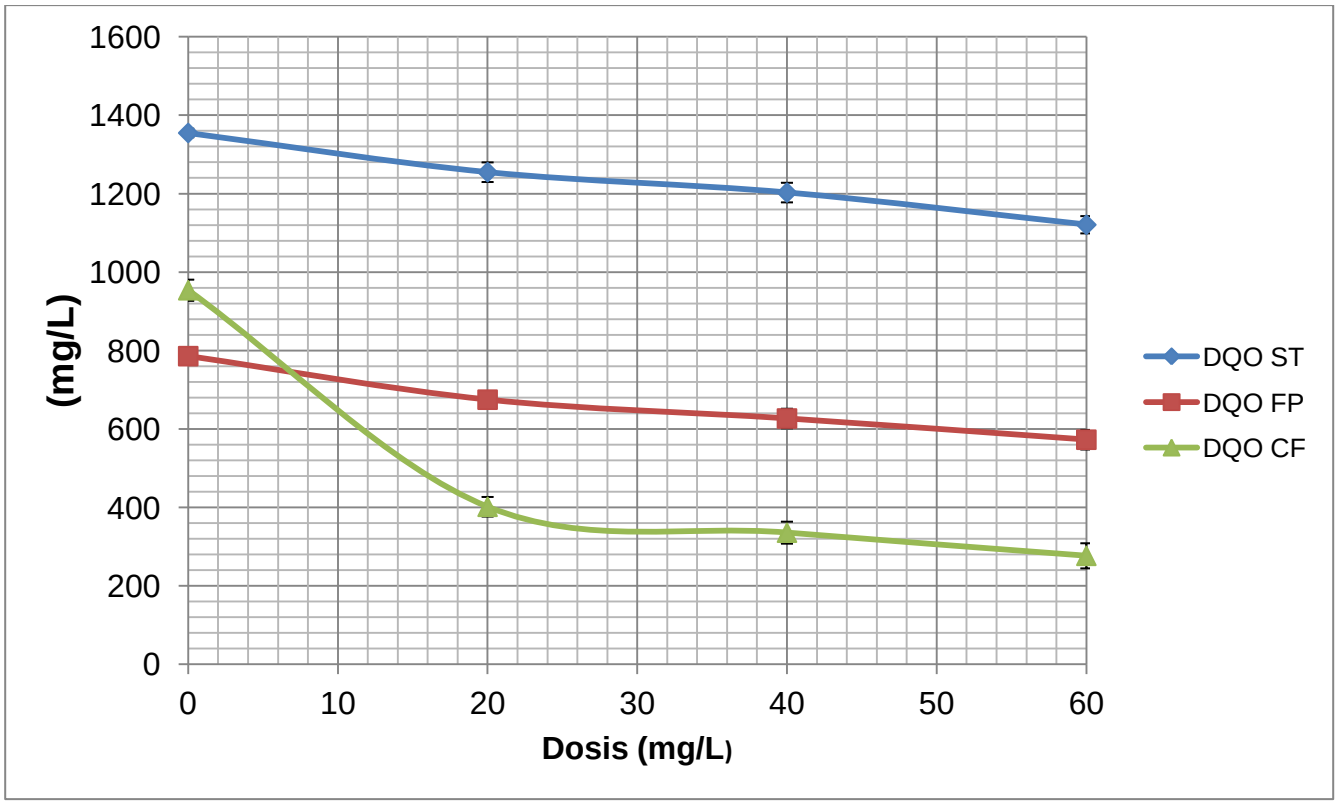


Fig.5.17 Comparativa de DQO en los tres tratamientos

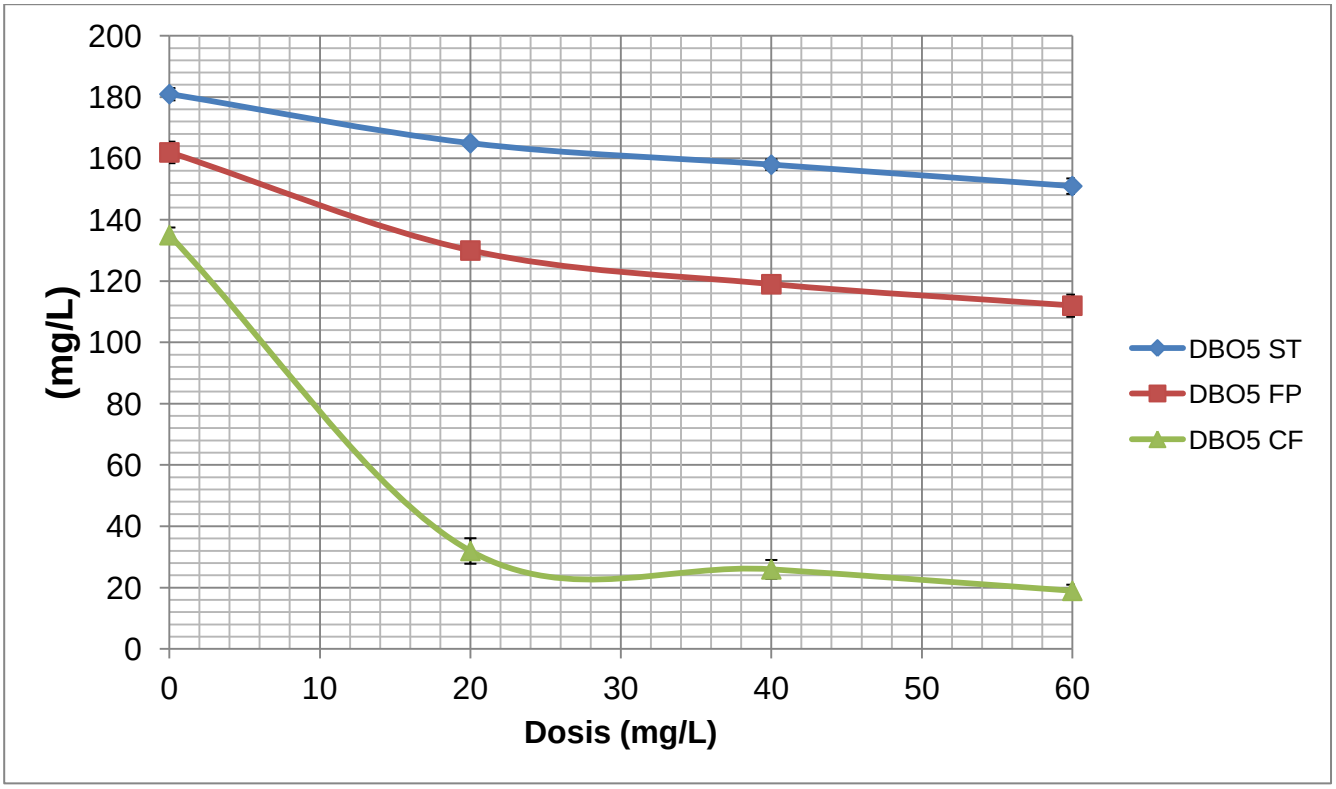


Fig.5.18 Comparativa de DBO_5 en los tres tratamientos

En las figuras 5.14, 5.15, 5.16, 5.17 y 5.18 se observa el comportamiento para cada uno de los parámetros evaluados (pH, SST, Color, DQO y DBO_5) en los tres acondicionamientos.

La gráfica del pH (figura 5.14) muestra un aumento en su valor durante cada acondicionamiento; principalmente al utilizar dosis altas de cloro se aprecia un incremento muy pequeño, mientras que con dosis de 20 y 40 mg/L de cloro los valores son similares a los iniciales. Para el caso de los sólidos suspendidos totales, en la figura 5.15 se observa un comportamiento descendente en los tres tratamientos, sin embargo, el acondicionamiento que logra una mayor reducción en los parámetros es el efluente con tratamiento de coagulación-floculación, con valores de 16 mg/L de SST aplicando una dosis alta de cloro. En la gráfica donde se muestra el comportamiento del parámetro “color” (figura 5.16), se visualiza una disminución en unidades desde su lectura inicial y en cada tratamiento, disminuyendo visualmente en forma notaria su color ámbar al usar un tratamiento fisicoquímico.

Para la gráfica de la DQO (figura 5.17) se observa un descenso en mg/L en cada tratamiento, esta disminución se debe a la mineralización de los compuestos oxidables presentes en el

agua residual, y finalmente la gráfica de la DBO_5 (figura 5.18) muestra que la cantidad de materia susceptible a ser oxidada por medios biológicos va disminuyendo al utilizar dosis medias y altas de cloro. En el tratamiento con filtración previa el valor de la DBO_5 se encuentra en 112 mg/L aplicando dosis de 60 mg/L.

5.11 Determinación de las características finales del agua para verificar el cumplimiento de la normatividad

De acuerdo con los resultados en los 3 tratamientos, se observa que el efluente que logra una mayor calidad es el efluente acondicionado con el proceso de coagulación-floculación.

En la tabla 5.8 se observan los límites máximos permisibles de contaminantes de la DBO_5 y SST de la norma NOM-003-SEMARNAT-1997, mientras que la tabla 5.9 muestra un comparativo de los parámetros de este tratamiento (SST y DBO_5) para verificar si se cumple con los valores de la NOM-003-SEMARNAT-1997.

Tabla 5.8 Límites máximos permisibles de contaminantes de DBO_5 y SST (NOM-003-SEMARNAT-1997).

Tipo de reuso	**DBO_5 mg/L**	**SST mg/L**
Servicios al público con contacto directo	**20**	**20**
Servicios al público con contacto indirecto u ocasional	**30**	**30**

Tabla 5.9 Parámetros obtenidos en las 9 pruebas del efluente acondicionado con coagulación-floculación

Prueba	Dosis de agente oxidante (mg/L)	SST	DBO_5	Normatividad	
				Contacto directo	Contacto indirecto
1	20	32	37	No cumple	No cumple
2	20	30	31	No cumple	No cumple
3	20	28	29	No cumple	Si cumple
4	40	28	29	No cumple	Si cumple
5	40	24	25	No cumple	Si cumple
6	40	22	23	No cumple	Si cumple
7	60	20	20	Si cumple	Si cumple
8	60	16	19	Si cumple	Si cumple
9	60	12	17	Si cumple	Si cumple

En la tabla 5.9 se visualiza que no todas las condiciones empleadas en este proyecto cumplen la norma NOM-003-SEMARNAT-1997. En las pruebas 1, 2 y 3 donde se emplearon dosis de cloro de 20 mg/L se observa que este efluente no puede reusarse para servicios al público con contacto directo e indirecto; mientras que las pruebas que se realizaron con dosis de cloro de 40 mg/L sí cumplen con los límites máximos permisibles de contaminantes para servicios con contacto indirecto pero no para los límites de contacto directo. Y por último se observa, que utilizar dosis de 60 mg/L de cloro cumple con los valores que establece la norma, la cual indica que para servicios con contacto directo se deben tener valores inferiores a 20 mg/L para SST y DBO_5, y para servicios con contacto indirecto los valores no deben ser mayores a 30 mg/L para los mismos parámetros.

Es decir con dosis de 60 mg/L, en todos los casos se cumpliría con la norma NOM-003-SEMARNAT-1997 para los parámetros de SST y DBO_5 ya que estos valores cumplen con los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios públicos con contacto directo e indirecto.

6 Conclusiones

En este proyecto se evaluó la factibilidad de aplicación de procesos de oxidación química al agua residual industrial tratada de la planta de tratamiento “Reciclagua” con el fin de cumplir con la NOM-003-SEMARNAT-1997.

En la evaluación de las características del efluente de la planta de acuerdo a la normatividad, se concluye lo siguiente:

- Los parámetros que determinaron la calidad del agua antes del proceso de oxidación, indicaron que el efluente que proviene de la descarga de la planta de tratamiento Reciclagua presentó altos niveles de color y DQO.
- Los parámetros más variables fueron el color y la DQO, obteniéndose en el primero valores que van desde 4650 a 11,111 en la escala Pt-Co; mientras que la DQO presentó valores desde 404 a 1366 mg/L.

Al reproducir en condiciones de laboratorio un tratamiento fisicoquímico de coagulación-floculación mediante la “prueba de jarras”, para determinar el cambio en las características del agua como acondicionamiento para el proceso de oxidación química, se determinó lo siguiente:

- Utilizar un tratamiento fisicoquímico antes del proceso de oxidación, ayudó a obtener agua con mayor calidad, los parámetros evaluados reportaron eficiencias de reducción muy altas, la más favorable fue la de los sólidos suspendidos totales con 71.81% ± 1.97, seguida por la DBO_5 con 69.73% ± 2.09, después el color con 62.13% ± 1.52 y finalmente la DQO con 51.89% ± 1.46; estos valores se obtuvieron empleando un pH óptimo de 5 y utilizando sulfato de aluminio como coagulante en una dosis de 300 mg/L.

En la evaluación exploratoria de los procesos de oxidación mediante la aplicación de peróxido de hidrógeno o cloro a tres calidades de agua: efluente sin tratamiento, efluente acondicionado con filtración previa y efluente acondicionado con el proceso de coagulación-floculación se puede concluir:

- De los dos agentes oxidantes aplicados, el cloro fue el oxidante que obtuvo una mayor eficiencia de reducción en la DQO al aplicar dosis de 60 a 120 mg/L, sin embargo son dosis muy altas y si se aplican a escala real causarían altos costos de operación; por esta razón se utilizaron dosis de 20, 40 y 60 mg/L. Con dosis altas se alcanzaronn eficiencias del 16% ± 1.92 en las pruebas exploratorias.
- El oxidante que mostró un comportamiento más estable fue el cloro en la relación de miligramos reducidos de DQO respecto a los miligramos de oxidante aplicado con valores que van de 0.35 mg de DQO oxidada/mg de oxidante ± 0.1 a 1.16 ± 0.06.
- Aunque a una concentración 20 mg/L el peróxido de hidrógeno logró reducir 3.25 ± 0.25 mg de DQO/mg de oxidante que comparativamente con el cloro (0.35 ± 0.1) fue mayor, su comportamiento fue inestable, ya que a dosis de 60 mg/L presenta menor eficiencia de 7.10% ± 1.24, mientras que a 20 mg/L alcanza una eficiencia de 11.26% ± 1.08.
- El efluente sin tratamiento se probó a diferentes condiciones, y aunque no representaron un valor significativo para la eficiencia y el cumplimiento de la norma, la mejor fue la de 17.24% ± 0.97 al aplicar una dosis alta de cloro (60 mg/L).
- Para el efluente acondicionado con filtración previa se obtuvieron mejores eficiencias de oxidación con la dosis de cloro media y alta obteniendo 20.26% ± 2.79 y 27.14%± 2.66 respectivamente.
- El efluente acondicionado con el proceso de coagulación-floculación fue el que presentó mejores eficiencias de oxidación en las tres condiciones que se analizaron, obteniéndose eficiencias de 57.93% ± 1.47 para la dosis baja, 64.85% ± 2.20 para la dosis media y 71.04% ± 2.62 para la dosis alta.

En la determinación del proceso de oxidación viable de acuerdo a las características finales del efluente de agua se concluye lo siguiente.

- Con base en el porcentaje de las eficiencias de oxidación de las tres calidades de agua que fueron probadas en este proyecto, el proceso más eficiente es el acondicionado con un tratamiento fisicoquímico, alcanzando 71.04% ± 2.62 en dosis altas.
- La condición experimental que cumple con los valores establecidos por la norma NOM-003-SEMARNAT-1997 aplicando dosis de cloro de 60 mg/L, es el acondicionado

con el proceso de coagulación-floculación, ya que para servicios con contacto directo se debe tener valores inferiores a 20 mg/L para SST y DBO_5, y para servicios con contacto indirecto los valores no deben ser mayores a 30 mg/L para los mismos parámetros. En los SST se obtuvo un valor promedio de 16 mg/L y para la DBO_5 de 18.66 mg/L, estos valores cumplen con los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios públicos con contacto directo e indirecto.

7 Referencias bibliográficas

Arroyave R. J. A., Garcés G. L. F., Arango R. Á. (2009), Mineralization of the tartrazine dye by an advanced oxidation process, Revista Lasallista de Investigación, vol. 6, No2, 46-53.

Balairón-Pérez, L. (2000), Gestión de Recursos Hídricos, Ed. UPC, pp 487, Barcelona, España.

Calvo P. Ma. M. (2006), Tratamiento avanzado de aguas residuales para riego, mediante oxidación con ozono: una alternativa ecológica, Congreso Nacional del Medio Ambiente, Cumbre del desarrollo sostenible, Palacio Municipal de Congresos del Campo de las Naciones, Madrid, España.

CESPEDES, Comisión de Estudios del Sector Privado para el desarrollo sustentable, (1998), Eficiencia y uso sustentable del agua en México: Participación del sector privado, primera edición, editorial CESPEDES pp. 39-45.

CONAGUA (2011), Comisión Nacional del Agua, Estadísticas del agua en México, ed.2011, Secretaría del medio ambiente y recursos naturales, pp. 44-54, 73-74, México.

CONAGUA (2012), Comisión Nacional del Agua, Situación de Subsector de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, ed. 2012, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, pp. 51-57, México.

DOF, Diario Oficial de la Federación (1997), NOM-001-SEMARNAT-1996, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.

DOF, Diario Oficial de la Federación (1998), NOM-003-SEMARNAT-1997, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público.

DOF, Diario Oficial de la Federación (1995), NOM-085-SEMARNAT-1994, Que establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de humos, partículas suspendidas totales, bióxido de azufre y óxidos de nitrógeno y los requisitos y condiciones para la operación de los equipos de calentamiento indirecto por combustión, así como los niveles

máximos permisibles de emisión de bióxido de azufre en los equipos de calentamiento directo por combustión.

González A.A, Beltrán V.M, Pérez A.A.O, Medina T.L. (2008), Operación de la Planta Piloto de Tratamiento de Agua de la UAM-A. Antecedentes y perspectivas. 9° Foro de Ingeniería Ambiental. Universidad Autónoma Metropolitana – Azcapotzalco, México, D.F.

Fair- Maskew (1997), Purificación de aguas y tratamiento y remoción de aguas residuales, editorial Limusa, México.

Fall C., Millán-Lagunas E., Gallego-Alarcón I., García Pulido D., Díaz Delgado C. (2012), COD fractionation and biological treatability of mixed industrial wastewaters, Journal of Environmental Management, vol.113, 71-77.

FDA, Food and Drug Admistration, (1998), Guía para reducir al mínimo el riesgo microbiano por los alimentos, en el caso de frutas y vegetales, (FDA), USA.

GACETA DEL GOBIERNO (2011), Periódico Oficial del Gobierno del Estado Libre y Soberano de México, Registro DGC NUM. 001 1021, Tomo CXCII, No 80.

Gordon, M. (1987), Ingeniería sanitaria y aguas residuales, editorial Limusa, pp. 150, México.

Hilleboe E. H. (2007), Manual de tratamiento de aguas, México, Limusa, p 86 – 94.

Jiménez, C. B. E., (2001), La contaminación ambiental en México causas efectos y tecnología apropiada, Limusa S.A. de C.V., grupo noriega editores, pp. 166, 169-17, 252-253, México.

Mendonça, S.R., (2000), Sistemas de lagunas de estabilización, editorial Mc Graw Hill Interamericana, pp. 369-371, Colombia.

Oliver J.M.,(1999) Oxidación química para depurar aguas residuales industriales, Revista de Desarrollos Ecológicos Industriales, vol.1., 373-373, España.

Metcalf and Eddy (1995), Ingeniería de aguas residuales, Tratamiento, vertido y reutilización, tercera edición. Vol 2. Editorial Mc Graw-Hill, pp. 1298, Madrid, España.

NMX-AA-030-SCFI-2001. Determinación de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.

NMX-AA-028-SCFI-2001. Determinación de la demanda bioquímica de oxígeno en aguas naturales, residuales (DBO_5) y residuales tratadas.

NMX-AA-034-SCFI-2001. Determinación de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.

NMX-AA-045-SCFI-2001. Determinación de color platino cobalto en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.

NMX-AA-003-SCFI-1980. Establece los lineamientos generales y recomendaciones para muestrear las descargas de aguas residuales, con el fin de determinar sus características físicas y químicas, debiéndose observar las modalidades indicadas en las normas de métodos de prueba correspondiente.

Pacheco S.V., (2010), Estudio indicativo sobre las empresas usuarias de Reciclagua, Rev. Concyteg, vol 1, 2-3.

Perry, H.R. (2001), Manual del ingeniero químico. Vol 4, España, McGraw Hill, 7th ed., p 25 – 85.

Rodríguez T., Botelho D., Cleto E. (2008), Treatment of industrial effluents of recalcitrant nature using ozone, hydrogen peroxide and ultraviolet radiation, Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquía, vol. 46, 24-38.

Rojas R. (2002), Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales, Curso Internacional “Gestión Integral de Tratamiento de Aguas Residuales”, Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente.

Tchobanoglous., G. (2000), Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones, editorial Mc Graw-Hill, pp. 739, Santa fe de Bogotá, Colombia.

Walter J.,Weber, Jr., (2003). Control de la Calidad del Agua: Procesos fisicoquímicos, John Wiley & Sons Inc., 1st ed., p 412, España.