

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

**Evaluación de distintos métodos de reducción de sólidos totales en
la planta de tratamiento de aguas residuales de la industria Textil
San Pedro**

Juan José Castro Villagómez

Ingeniería Química

Trabajo de fin de carrera presentado como requisito
para la obtención del título de
Ingeniero Químico

Quito, 7 de mayo de 2020

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

**HOJA DE CALIFICACIÓN
DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA**

**Evaluación de distintos métodos de reducción de sólidos totales en
la planta de tratamiento de aguas residuales de la industria Textil
San Pedro**

Juan José Castro Villagómez

Nombre del profesor, Título académico

Daniela Almeida, PhD

Quito, 7 de mayo de 2020

DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Nombres y apellidos: Juan José Castro Villagómez

Código: 00131843

Cédula de identidad: 1722540117

Lugar y fecha: Quito, mayo de 2020

ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN

Nota: El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETHeses>.

UNPUBLISHED DOCUMENT

Note: The following capstone project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing available on <http://bit.ly/COPETHeses>.

RESUMEN

La descarga de aguas residuales procedentes de procesos industriales textiles significa un gran impacto medioambiental debido a su alta coloración, contenido en sólidos totales (TS) y altos valores de demanda química de oxígeno (DQO). La industria Textil San Pedro, ubicada en Sangolquí – Ecuador, cuenta actualmente con una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de carácter biológico que no logra cumplir con la normativa establecida por el Ministerio de Ambiente Ecuatoriano (MAE). Se realizó la evaluación de cuatro métodos de tratamiento de aguas residuales con la finalidad de disminuir el impacto ambiental generado y cumplir con la normativa establecida. Los métodos de tratamiento evaluados fueron: tratamiento fisicoquímico por coagulación-floculación (CF), tratamiento de adsorción por carbón activado (CA) y nanopartículas paramagnéticas (NPs), y tratamiento por oxidación avanzada tipo fenton. Se obtuvo que los métodos de tratamiento por CF y de adsorción por CA lograron remover el color real en un 100% y los TS en un 16 y 20% respectivamente. Los tratamientos de adsorción por CA y por nanopartículas NPs removieron el DQO en un 33 y 30.7% respectivamente. Sin embargo, ningún método logró cumplir con la normativa establecida por el MAE con respecto a los TS y DQO por lo que se sugiere continuar con la investigación sobre métodos de reducción de TS.

Palabras clave: Industria textil, planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR), coagulación-floculación (CF), carbón activado (CA), nanopartículas paramagnéticas (NPs), reacción Fenton.

ABSTRACT

The discharge of wastewater from textile industrial processes means a great environmental impact due to its high coloration, total solids content (TS) and high values of chemical oxygen demand (COD). The Textile Industry San Pedro, based in Sangolquí – Ecuador, currently has a biological wastewater treatment plant (WWTP) that fails to comply with the regulations established by the Ecuadorian Ministry of Environment (MAE). The evaluation of four methods of wastewater treatment was carried out in order to reduce the environmental impact generated and comply with the established regulations. The treatment methods evaluated were physicochemical treatment by coagulation-flocculation (CF), adsorption treatment by activated carbon (AC) and paramagnetic nanoparticles (NPs), and advanced fenton type oxidation treatment. The results show that the CF treatment and AC adsorption methods were able to remove 100% of true color, and the TS in 16 and 20% respectively. The adsorption treatments by CA and by NPs nanoparticles removed the COD in 33 and 31% respectively. However, no method was able to comply with the regulations established by the MAE in means of TS and COD. Therefore, a further investigation on methods of reducing the TS is suggested.

Key words: Textile industry, wastewater treatment plant (WWTP), coagulation-flocculation (CF) activated carbon (AC), paramagnetic nanoparticles (NPs), Fenton reaction.

TABLA DE CONTENIDO

1. Introducción	10
1.1. Antecedentes	10
1.2. Justificación del proyecto	12
1.3. Objetivos	14
2. Marco Teórico.....	14
2.1. Caracterización y normativa de las aguas residuales	14
2.2. Tratamiento fisicoquímico por coagulación-floculación	16
2.3. Adsorción por carbón activado	17
2.4. Adsorción por nanopartículas super-paramagnéticas	18
2.5. Método de tratamiento por oxidación avanzada: reacción fenton	19
3. Método Experimental.....	20
3.1. Caracterización del agua residual textil	20
3.2. Método de tratamiento fisicoquímico por coagulación-floculación	22
3.3. Método de adsorción por carbón activado	23
3.4. Método de adsorción por nanopartículas super-paramagnéticas	24
3.5. Método de tratamiento por oxidación avanzada: reacción fenton	24
4. Resultados y Discusión	25
4.1. Resultados de la caracterización del agua residual textil	25
4.2. Evaluación del método de tratamiento fisicoquímico por coagulación-floculación.....	27
4.3. Evaluación del método de adsorción por carbón activado.....	30
4.4. Evaluación del método de adsorción por nanopartículas super-paramagnéticas.....	33
4.5. Evaluación del método de tratamiento por oxidación avanzada: reacción fenton.....	35
4.6. Resultados de métodos combinados y comparación entre métodos de tratamiento	36
5. Conclusiones	38
6. Referencias bibliográficas.....	40

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores referenciales de parámetros de control establecidos por la normativa	15
Tabla 2. Resultados de caracterización del agua de descarga, datos de estudios similares presentados por Nawaz (2014) y comparación con la normativa	26
Tabla 3. Puntuación de resultados cualitativos para cada dosificación de Aquaflex FC y CM	28
Tabla 4. Resultados del método de tratamiento por CF y comparación con la normativa	29
Tabla 5. Resultados del método de tratamiento por adsorción por CA y comparación con la normativa	30
Tabla 6. Resultados del método de adsorción por CA americano en una columna empacada y comparación con la normativa	32
Tabla 7. Resultados del método de adsorción por NPs y comparación con la normativa	34
Tabla 8. Resultados del método de Oxidación Avanzada tipo Fenton y comparación con la normativa	35
Tabla 9. Resumen de resultados de remoción de métodos combinados y comparación con la normativa	37
Tabla 10. Resumen de resultados de remoción de los distintos métodos de tratamiento evaluados y comparación con la normativa	38

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de bloque de la actual PTAR de la industria Textil San Pedro.....	11
Figura 2. Imagen TEM de las NPs en forma de nano flores (Gallo-Cordova, 2019).....	18
Figura 3. Diagrama de bloque para evaluación del proceso coagulación-floculación	23
Figura 4. a) Caracterización de DQO [mg/l], b) Caracterización de Color Real [Pt/Co], c) Caracterización de sólidos (TS, TSS y TDS) [mg/l], d) Porcentaje de contenido de TDS y TSS de los Sólidos Totales	25
Figura 5. Resultados cualitativos de los experimentos con la dosificación de Aquaflex CMI y FC.....	27
Figura 6. Porcentaje de carbón activado [g/g] vs. a) DQO [mg/l], b) TS [mg/l].....	30
Figura 7. Resultados del método de adsorción por CA en una columna empacada	31
Figura 8. Masa de carbón activado americano empacado en la columna [g] vs a) DQO [mg/l], b) TS [mg/l].....	32
Figura 9. Dosificación de NPs [mg] vs. a) DQO [mg/l], b) TS [mg/l].....	33
Figura 10. Tiempo de adsorción de NPs [min] vs. a) DQO [mg/l], b) TS [mg/l] a una dosificación constante de 1 mg NPs /ml	34
Figura 11. Dosificación de H ₂ O ₂ [μl] vs. a) DQO [mg/l], b) TS [mg/l].....	35
Figura 12. Porcentaje de remoción de parámetros principales por métodos combinados	37

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

La industria textil en el Ecuador ha tenido un importante crecimiento en los últimos años. De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC, 2018) esta industria representa 174 000 puestos de trabajo, es decir el 21% de los puestos de trabajo de la industria manufacturera del país. De acuerdo con la Asociación de Industriales Textiles del Ecuador (AITE, 2017), la industria Textil aportó con más de \$1.313 millones en ventas en el año 2016, indicando así su relevancia en el comercio y la industria ecuatoriana.

Entre las principales industrias textiles en el Ecuador se encuentra Textil San Pedro (TSP). Ubicada en Sangolquí-Ecuador, cuenta con una planta de producción de toallas 100% algodón, telas de algodón y poliéster-algodón destinadas a hogares, hotelería y hospitales de todo el país, brindando también otros servicios dentro de la industria textil. Con una producción mensual de aproximadamente 50.000 kg en productos textiles, la empresa descarga sus aguas residuales después de pasar por una planta de tratamiento de aguas, en el río San Pedro, ubicado en Sangolquí-Ecuador, descargando un aproximado de 5573 m³/mes. A continuación, se muestra en la Figura 1 un diagrama de bloque de la actual planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de la industria:

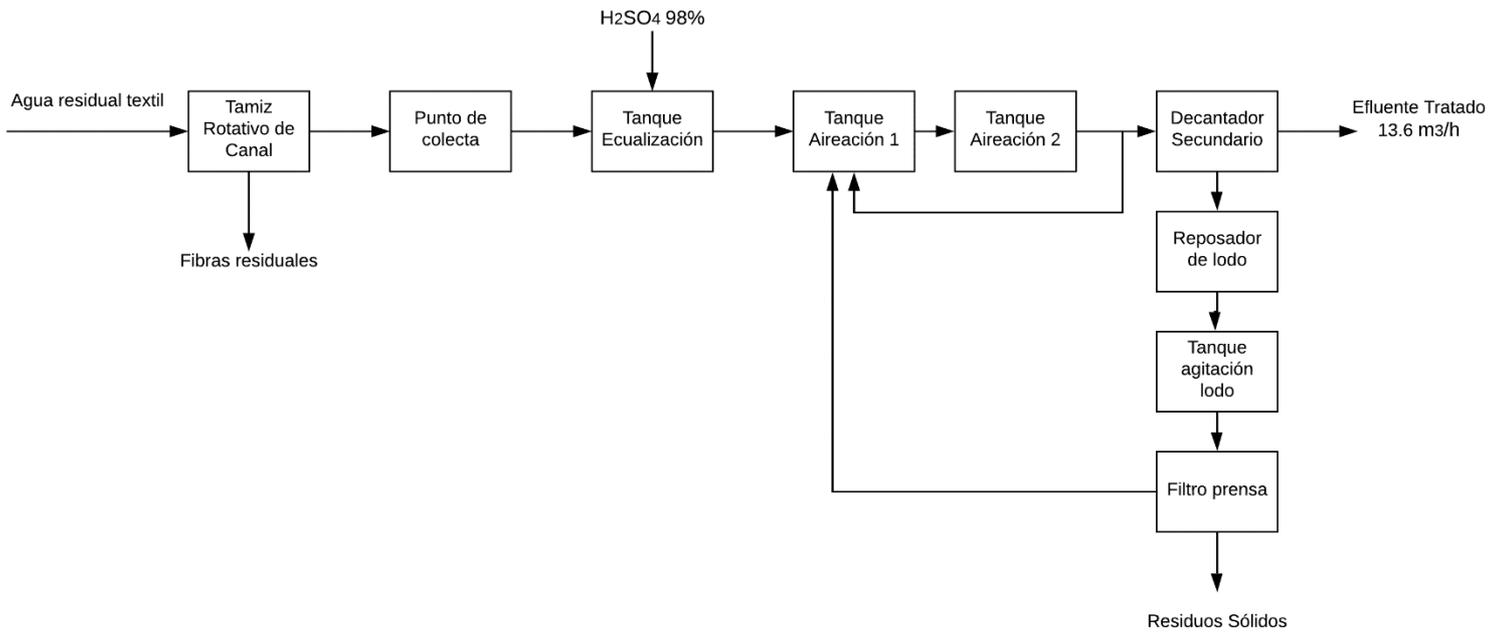


Figura 1. Diagrama de bloque de la actual PTAR de la industria Textil San Pedro.

La PTAR actual en la industria TSP, mostrada en la Figura 1, es de carácter biológico y aerobio. De acuerdo con Sarayu (2012) este tipo de plantas son efectivas gracias a la capacidad de degradación de los microorganismos para el tratamiento de aguas residuales textiles. Este tipo de PTAR generalmente cuentan con tanques de aireación con inyección de aire en donde se reproducen los varios microorganismos encargados de la degradación de los contaminantes provenientes de los distintos procesos textiles. Este es el caso de la PTAR en TSP, cuyo proceso de tratamiento comienza con la remoción de las fibras residuales provenientes de los procesos de producción. Luego, se regula el pH hasta un valor sobre los 7 puntos de esta escala. Una vez regulado el pH, el agua residual entra a dos tanques de aireación conectados en serie, donde se da la degradación de los contaminantes. Una parte de este caudal de agua se recircula hacia el primer tanque de aireación. El resto del caudal pasa a un decantador de sólidos, mismos que se depositan al fondo del tanque por precipitación y se bombean para ser deshidratados, filtrados y separados para su disposición final. El agua tratada

es finalmente descargada por rebose desde el decantador secundario hasta el cuerpo de agua más cercano, el río San Pedro.

Para poder descargar el agua residual textil hacia un cuerpo de agua, con la finalidad de preservar la vida acuática y controlando que las emisiones de contaminantes se reduzcan al mínimo, la descarga debe cumplir con parámetros de control que son regulados por el Ministerio de Ambiente Ecuatoriano (MAE), de acuerdo con lo estipulado en el Anexo 1 del Libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA). La problemática de la PTAR en la industria Textil San Pedro se centra en el incumplimiento de parámetros como el Color Real, Sólidos Totales (TS) y Demanda Química de Oxígeno (DQO)

1.2. Justificación del proyecto

Los procesos de producción de textiles dentro de la industria son altamente variables, debido al cambio en la demanda de insumos que existe, haciendo que sus aguas residuales tengan un alto índice de variabilidad. Dentro de los procesos textiles no solo se utiliza una gran cantidad de agua, sino también varios compuestos químicos y orgánicos. Entre los principales contaminantes de esta industria se encuentran: residuos de fibras procesadas de algodón o poliéster, colorantes orgánicos y organometálicos, cloruro de sodio (NaCl), hidróxido de sodio (NaOH), compuestos tensoactivos (detergentes), ácido fórmico (CH_2O_2), etc., produciendo que su agua residual tenga un alto contenido de material contaminante (Paździor et al., 2018). Por esta razón, las principales características del agua residual textil son una alta concentración de salinidad, alcalinidad y de color, reflejados en sus altos valores de pH, TS, Color Real y DQO. (Yadav et al., 2013). El impacto de un valor de pH mayor a 9.5 en aguas residuales afecta la vida acuática debido a la generación de un ambiente tóxico (Nidheesh & Gandhimathi, 2014). Niveles altos de TS, Color Real y DQO en aguas de descarga generan el agotamiento del oxígeno disuelto, que resulta devastador para la vida acuática, y producen también poca

penetración de luz causada por la sobrecarga de colorantes en las aguas de descarga (0.6-0.8 g colorante/litro) (Hayat, 2015). De esta manera, las aguas residuales procedentes de procesos textiles sin un tratamiento efectivo afectan de manera directa a la vida acuática de los cuerpos de agua sobre los que es descargada, y que a su vez afectará a aguas de riego y así a las comunidades aledañas a la zona.

Actualmente, la PTAR de la industria Textil San Pedro logra remover aproximadamente el 90% del DQO y el 73% de los TS, sin embargo, el porcentaje restante tiene una alta complejidad de remoción de contaminantes y es la razón por la cual se incumple con la normativa establecida. Por estas razones, es de suma importancia para la industria TSP tratar el agua residual de manera efectiva para así generar el menor impacto ambiental posible, cumpliendo con los parámetros establecidos por el MAE. Como un primer paso para lograr esto se propone evaluar cuatro métodos de tratamiento de aguas, con el fin de observar el comportamiento del agua descargada tras aplicar cada uno de los métodos adicionales de tratamiento. Se propone evaluar un método de tratamiento fisicoquímico por coagulación-floculación (CF) utilizando productos de carácter orgánico de la marca Aquaflex, dos métodos de tratamiento de adsorción: carbón activado (CA) y nanopartículas paramagnéticas (NPs), un método de oxidación avanzada tipo fenton utilizando nanopartículas paramagnéticas como fuente de hierro y finalmente una combinación entre los métodos CF + CA, CF + NPs, CA + NPs y CF-NPs-CA, para maximizar de esta manera los resultados obtenidos.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Diseñar un sistema complementario, económicamente viable, de tratamiento a la PTAR en la industria Textil San Pedro con el fin de cumplir con la normativa TULSMA 2018, establecida por el Ministerio de Ambiente Ecuatoriano.

1.3.2. Objetivos específicos

Evaluar el estado actual de la planta de tratamiento de aguas residuales en la industria Textil San Pedro, observando el comportamiento de los distintos flujos que conforman la PTAR.

Evaluar los valores de DQO, TS, TSS y TDS antes y después de los 3 distintos tipos de tratamiento de aguas como son: tratamiento físico-químico, adsorción y oxidación avanzada, incluyendo la combinación de métodos.

Proponer una solución para reducir los valores de Sólidos Totales (TS), Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Color Real que presenta el efluente de la PTAR.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Caracterización y normativa de las aguas residuales

Con el objetivo de determinar la calidad del agua resultante de la PTAR en Textil San Pedro, se realizó una caracterización de los principales parámetros en los que la planta incumple con la normativa establecida por el Ministerio de Ambiente Ecuatoriano. A continuación, se presentan en la Tabla 1 los parámetros junto a los valores establecidos de acuerdo con el Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA, 2015):

Tabla 1. Valores referenciales de parámetros de control establecidos por la normativa TULSMA.

Prámetro	Valor	Unidades
DQO	200	mg/l
TS	1600	mg/l
TSS	130	mg/l
Color Real	Imperceptible en dilución 1/20	Pt/Co
Cloruros	1000	mg/l
Nitrógeno Total Kjeldahl	50	mg/l
Plomo	0.2	mg/l
Hierro Total	10	mg/l
Sulfatos	1000	mg/l
Tempreatura	Condición Natural \pm 3	$^{\circ}$ C
Tensoactivos	0.5	mg/l
pH	6-9.	-

Donde los parámetros más críticos y difíciles de cumplir de cumplir en la normativa de las aguas residuales son DQO, TS, TSS y color real. Su metodología de análisis será descrita a continuación.

De acuerdo con Dey (2015), la *Demanda Química de Oxígeno* (DQO) se define como la cantidad de material orgánico susceptible a ser oxidado por reacción química. A medida que el DQO aumenta, existe una menor cantidad de oxígeno disponible para oxidar el material orgánico. El análisis de DQO se lo realiza agregando una solución de dicromato de potasio a una muestra ácida de agua residual textil.

Los *Sólidos Totales* (TS) se definen como la cantidad total de material sólido resultante de la evaporación y secado de una muestra de agua. Dentro de los TS se incluyen los *Sólidos Suspendidos Totales* (TSS) y los *Sólidos Disueltos Totales* (TDS). Los sólidos son parámetros sumamente importantes, debido a que afectan la calidad del agua de manera directa. Para considerar una muestra de agua como potable, esta no debe exceder los 500 mg TDS/l. Los TDS son directamente proporcionales a la cantidad de sales que se encuentran disueltas en una

muestra de agua y los TSS se definen como la fracción de los TS que se pueden separar fácilmente por filtración (Rice, 2017).

Finalmente, el *Color Real* es un parámetro de alta relevancia en las aguas residuales textiles, ya que para realizar descargas hacia cuerpos de agua se debe remover el color de esta, ya que el color inhibe la penetración de luz en el agua, causando un efecto negativo en las propiedades fotosintéticas de las plantas (Bisschops et al., 2008). De acuerdo con el método de Platino-Cobalto para medir el *Color Real* de APHA Standard Methods (Rice, 2017) definido como el color del agua tras haber eliminado su turbidez, este parámetro es medido en unidades de Pt/Co y cuantifica la unidad de color producida por 1 mg platino/l en la forma del ion cloroplatinato. Es importante recalcar que esta medición es altamente dependiente del pH y aumenta a medida que el pH aumenta. Por esta razón, es de suma importancia presentar el valor de pH al cual se determina el color.

2.2. Tratamiento fisicoquímico por coagulación-floculación

El tratamiento fisicoquímico por coagulación-floculación en aguas residuales textiles ha sido uno de los métodos más estudiados y efectivos en este tema, pues su principal objetivo es la decoloración del agua residual textil, la misma que contiene una coloración elevada debido a sus procesos industriales de teñido de fibras. Se ha establecido dentro de los procesos de tratamiento de aguas residuales que la coagulación es el pretratamiento más exitoso con respecto a la remoción de color. El proceso de coagulación-floculación consiste en la adición de sustancias químicas capaces de alterar el estado fisicoquímico de los contaminantes con el fin de poder separarlas de forma física, ya sea por sedimentación o por suspensión (Verma et al., 2012). El proceso consiste en dos pasos: la coagulación, que se trata de desestabilizar por carga iónica a los contaminantes que se pueden encontrar de manera coloidal o en suspensión y finalmente, la floculación; que se trata de atrapar todas las partículas desestabilizadas por

carga iónica con el fin de separarlas formando una masa de característica lodosa que contenga a los contaminantes (Leiknes, 2009).

Existen varios tipos de coagulantes y floculantes, que se pueden diferenciar por orgánicos e inorgánicos. Entre los más utilizados del tipo inorgánicos se encuentran las sales metálicas de hidrólisis como el cloruro de hierro, sales metálicas de pre- hidrólisis como el cloruro de poli aluminio Entre los coagulantes orgánicos se encuentran los polímeros catiónicos sintéticos como las poliacrilamidas (Verma et al., 2012). Resultados presentados por Dionysiou (2015) tras utilizar un polímero catiónico sintético como coagulante, demuestran una remoción de color del 98% y una disminución en el DQO del 50% tras la utilización de coagulantes y floculantes de carácter orgánicos.

2.3. Adsorción por carbón activado

El Carbón Activado (CA) es un material estructuralmente homogéneo, con un área superficial grande de 500 – 2000 m²/g, debido a su estructura mesoporosa, presentando así propiedades adsorptivas que dependen de su fuente de origen, del método de activación, de su porosidad, del tamaño de partícula, etc. Debido a esto, el CA es utilizado en un sinnúmero de aplicaciones industriales como un adsorbente muy eficiente (Iqbal & Ashiq, 2007). Dentro del tratamiento de aguas residuales, el CA es altamente utilizado por su eficaz reducción y eliminación de contaminantes disueltos orgánicos e inorgánicos.

El mecanismo de adsorción funciona ya que cuando un fluido entra en contacto con un sólido, parte del fluido se queda atrapado en las paredes del sólido, reteniendo así los agentes contaminantes. Al sólido se lo conoce como adsorbente y al contaminante presente en el fluido como adsorbato. Usualmente, se aplica este método de adsorción en columnas fijas empacadas con el material adsorbente (Ansari, 2009).

2.4. Adsorción por nanopartículas super-paramagnéticas

Como una nueva alternativa a los métodos de tratamiento de agua residual tradicionales, se propone la aplicación de un novedoso material super- paramagnético que presenta propiedades adsorptivas. La ventaja de utilizar este método se centra básicamente en la recuperación de las nanopartículas (NPs), pues al ser un material paramagnético, únicamente presenta propiedades magnéticas en presencia de un campo, a diferencia de un material ferromagnético que presenta propiedades magnéticas sin necesidad de un campo externo (Adamaki et al., 2016). Por esta razón, la ventaja de estas NPs es su fácil recuperación utilizando un imán. La composición de estas NPs se trata de partículas de óxido de hierro de 10 nm de diámetro aglomeradas y recubiertas por una capa de etilenglicol, formando una forma de flor de aproximadamente 40 nm. Estas nano flores tienen una gran área superficial de 570 m²/g debido a su reducido tamaño de partículas y su matriz externa porosa, presentan una alta estabilidad en un amplio rango de pH (2-9), y tienen buenas características de reusabilidad, mostrando una eficiencia del 100% tras haber cumplido 4 ciclos de uso; además de las pequeñas dosificaciones (aproximadamente 1 mg NPs/ml muestra) utilizadas para el tratamiento de aguas residuales (Gallo-Cordova, 2019)

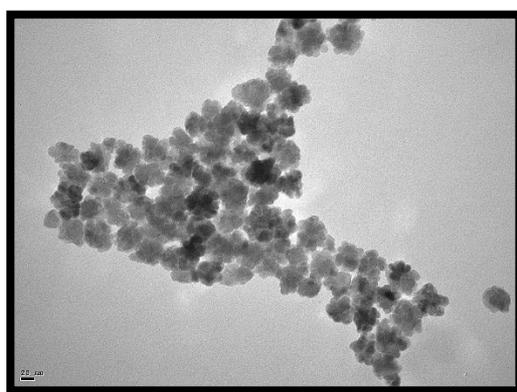


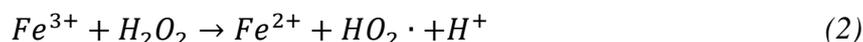
Figura 2. Imagen TEM de las NPs en forma de nano flores (Gallo-Cordova, 2019)

Estudios presentados por (Gallo-Cordova et al., 2019), muestran una remoción de color del 100% de una muestra de agua residual sintetizada con contenido de naranja de metilo.

Adicionalmente, se demuestra una alta reusabilidad, presentando una eficiencia del 100% hasta el cuarto ciclo. Por estas razones, este material promete una alta aplicación industrial en lo relacionado al tratamiento de aguas residuales textiles.

2.5. Método de tratamiento por oxidación avanzada: reacción fenton

Los métodos de tratamiento de aguas residuales por procesos de oxidación avanzada (AOPs) han sido evaluados y estudiados con el fin de proponer un sistema de tratamiento eficiente, siguiendo las actuales tendencias y requerimientos medioambientales. Este método consiste en una reacción química que produce la formación de radicales hidroxilos ($\text{OH}\cdot$), que son altamente reactivos obteniendo una alta capacidad de oxidación. Durante el tratamiento por AOPs, los compuestos orgánicos complejos pueden ser oxidados por los radicales $\text{OH}\cdot$ en compuestos menos complejos, o ser simplemente mineralizados en CO_2 y H_2O . Uno de los métodos de AOPs más utilizados es el de la reacción Fenton, que consiste en la utilización de algún metal de transición, como el Fe^{2+} , como catalizador junto con un agente oxidante como el H_2O_2 . Dentro de las ventajas de la aplicación industrial de este método se incluye su simplicidad de operación a condiciones de temperatura y presión estándar, su desempeño y su baja toxicidad. La reacción Fenton se lleva a cabo mediante el siguiente mecanismo (Wang et al., 2016):



Dentro de los procesos tipo Fenton, se encuentran dos grandes grupos: homogéneos y heterogéneos. Los procesos tipo Fenton homogéneos consisten en la utilización de otros complejos de iones metálicos, y orgánicos durante la reacción, mientras que los procesos tipo

Fenton heterogéneos consisten en reemplazar el ion Fe^{2+} en la reacción, utilizando un catalizador como el dióxido de titanio. Dentro de los parámetros que afectan esta reacción se encuentra la temperatura, el pH y la dosificación del H_2O_2 . Estudios presentados referentes a la evaluación de este método muestran una disminución del 70% del DQO en aguas residuales textiles y una disminución de color del 100% en aguas sintéticas con colorantes de carácter orgánico (Wang et al., 2016).

3. MÉTODO EXPERIMENTAL

3.1. Caracterización del agua residual textil

Para conocer el estado actual del agua residual textil con respecto a la normativa establecida por el MAE, se realizó una caracterización de los siguientes parámetros: DQO, TS, TSS, TDS y Color Real. Los análisis se realizaron con respecto a lo estipulado en el manual de procedimientos y seguridad IDEMA, en el cual se basan en (Cheremisinoff, 1997). Estos análisis se realizaron a un pH entre 7.9 – 8.2 y a una temperatura de 17°C. La muestra tomada fue compuesta por 8 tomas en un intervalo de 8 h, envasada en un recipiente de polietileno.

3.1.1. Demanda química de oxígeno (DQO)

Para la caracterización de este parámetro, se utilizó un método de colorimetría HACH. Primero, se preparó una solución de digestión, tras secar por 2 h, 10.5 g de dicromato de potasio ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) a 150°C. Luego, se pesaron 10.216 g de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ con la balanza analítica Boeco BBL 31, se transfirió esta cantidad a un balón de aforo de 1 litro, añadiendo 500 mL de agua destilada y posteriormente 167 ml de ácido sulfúrico (H_2SO_4) al 96% (m/m). Finalmente, se aforó la solución y se almacenó en un frasco ámbar a 4°C.

Para cada muestra, se preparó un vial con 3.5 ml de H_2SO_4 96%, posteriormente se agregaron 1.5 ml de solución de digestión de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ y finalmente se agregó 1 ml de muestra de agua residual sin diluir. Finalmente, se digirieron las muestras de acuerdo con el método de

digestión de Manganeseo III (Hach, 2007) utilizando un digestor DRB 200 calentado a 150 °C por 2 h. Luego, se esperó 30 min a que la temperatura del digestor disminuya hasta 105 °C, las muestras se sacaron del digestor y se enfriaron en ausencia de luz hasta temperatura ambiente para ser medidas en un colorímetro HACH DR 890.

3.1.2. Sólidos totales (TS)

Para la caracterización de TS, se pesaron crisoles anteriormente esterilizados en una mufla calentada a 550 °C durante 15 min y se agregaron 40 ml de muestra de agua residual textil. Se ingresaron los crisoles en una estufa a 105 °C durante 24 h y posteriormente se enfriaron en un desecador hasta temperatura ambiente. Finalmente, se pesaron los crisoles y se determinó la cantidad de TS mediante la siguiente fórmula:

$$TS = \frac{m_1 - m_0}{v_m} \left[\frac{mg}{l} \right] \quad (6)$$

Donde:

m_0 = masa crisol [mg]

m_1 = masa residuo seco + crisol [mg]

v_m = volumen de la muestra original[l]

3.1.3. Sólidos suspendidos totales (TSS)

Para la caracterización de este parámetro, se pesaron papeles filtro tipo analíticos anteriormente secados en una estufa a 105 °C durante 20 min, al igual que crisoles previamente esterilizados en un horno mufla a 550 °C por 15 min. Se filtraron 40 ml de muestra de agua residual textil por el papel filtro y este se secó dentro del crisol a 105 °C durante 24 h en una estufa. La cantidad de TSS se determinó mediante:

$$TSS = \frac{m_2 - (m_0 + m_1)}{v_m} \left[\frac{mg}{l} \right] \quad (7)$$

Donde:

m_0 = masa crisol [mg]

m_1 = masa papel filtro [mg]

m_2 = masa papel filtro + residuo seco + crisol [mg]

v_m = volumen de la muestra original filtrada [l]

3.1.4. Sólidos disueltos totales (TDS)

Este parámetro se caracterizó a partir de los valores obtenidos de TS y TSS mediante la relación:

$$TDS = TS - TSS \left[\frac{mg}{l} \right] \quad (8)$$

3.1.5. Color real

Para la caracterización del Color Real se realizó un método de colorimetría HATCH. Se utilizó papel filtro tipo analítico, donde se filtraron 20 ml de muestra de agua residual textil y se realizó una dilución 1/20. Se agregaron 20 ml de la muestra diluida a un vial y se realizó la medición en un colorímetro HACH DR 890, obteniendo los resultados en unidades [Pt/Co] mediante el método estándar APHA Platino-Cobalto (Hach Colorimeter Manual, 2007).

3.2. Método de tratamiento fisicoquímico por coagulación-floculación

Para evaluar este método fisicoquímico, se utilizaron dos productos: *Aquaflex CMI* (coagulante catiónico orgánico) y *Aquaflex FC* (floculante aniónico de alto peso molecular). Se realizaron los experimentos utilizando 100 ml de muestra de agua residual textil en un matraz Erlenmeyer de 250 ml con agitación magnética constante de 180 rpm a temperatura ambiente de 20 °C. Se agregó una cantidad de *Aquaflex CMI* y tras 3 min de agitación se agregaron 0.5 ml de una solución de *Aquaflex FC*, con agitación durante 2 min. Se varió la dosificación de *Aquaflex CMI* entre 30 – 120 µl, mientras que para el *Aquaflex FC* se varió la concentración entre 0.1 – 0.6%. Finalmente se filtró la muestra y se caracterizó el agua filtrada,

analizando el DQO y los TS. Este procedimiento se puede observar a continuación en la Figura 3:

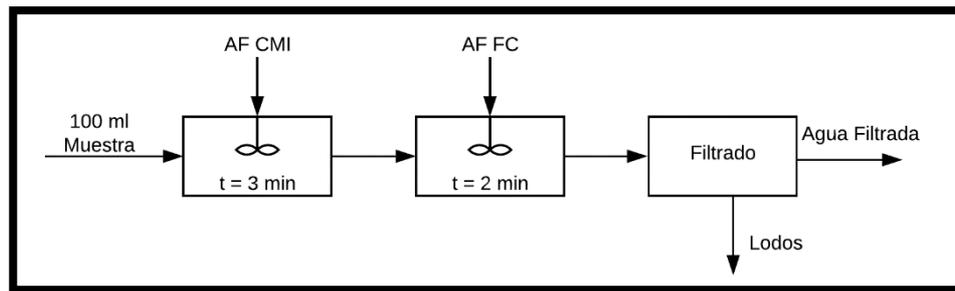


Figura 3. Diagrama de bloque para evaluación del proceso coagulación-floculación.

3.3. Método de adsorción por carbón activado

3.3.1 Pruebas de jarras con agitación magnética

Para la evaluación de este método se utilizaron 3 distintos tipos de carbón activado: *Malla #4* (4.76 mm), *Malla #12* (1.68 mm) y *americano* (0.841 mm). Se realizaron los experimentos en base al procedimiento mencionado por (Iqbal & Ashiq, 2007). Se utilizaron 100 ml de muestra de agua residual textil y se varió la concentración en masa de cada tipo de carbón activado entre el 1-10 %, con agitación magnética constante de 120 rpm y a temperatura ambiente de 20 °C. Luego, se filtró la muestra de agua residual con el carbón activado en un filtro estándar de café y se caracterizó el agua filtrada, analizando DQO, TS y Color Real.

3.3.2 Columna de adsorción

Se evaluó el método utilizando una columna empacada con carbón activado, con una altura de 50 cm, un diámetro de 1.27 cm y un volumen total de 63.3 cm³, en base al estudio establecido por Syafalni (2012). Se analizaron 50 ml de muestra de agua residual textil, primero variando cada tipo de carbón activado dentro de la columna para determinar el CA más efectivo

con una masa constante de carbón de 25 g y un recorrido total de 1 m, con un tiempo total de adsorción de 5 min. Finalmente se varió la cantidad de masa de este carbón (1-35 g) con un tiempo de adsorción constante de 5 min y una distancia total de recorrido de 1 m. Finalmente, se caracterizó el agua filtrada, analizando DQO y los TS del agua tratada.

3.4. Método de adsorción por nanopartículas super-paramagnéticas

Para evaluar este método de adsorción se utilizó el procedimiento mencionado por Gallo-cordova et al., (2019). Se utilizaron 100 ml de muestra de agua residual textil y se varió la cantidad de nanopartículas, con una dosificación entre 0-250 mg NPs; y el tiempo de adsorción entre 0-120 min a una agitación constante de 250 rpm. Tras la finalización de los experimentos se removieron las NPs utilizando un imán y se analizó el DQO y los TS del agua tratada.

3.5. Método de tratamiento por oxidación avanzada: reacción fenton

Para la evaluación de este método, se utilizó el procedimiento mencionado por Ferroudj (2013). Se utilizaron 100 ml de muestra de agua residual textil y una concentración óptima de 1 mg NPs/ml agua residual como fuente de Fe, con un tiempo de agitación de 2 h a 250 rpm. Se varió la concentración de H₂O₂, utilizando dosificaciones entre 0-160 µl. Finalmente, se dejó reaccionar durante 24 h, se removieron las NPs utilizando un imán, y se filtró la muestra en un pequeño lecho de carbón activado con el fin de adsorber el remanente de agua oxigenada sin reaccionar. Posteriormente, se analizó el DQO y los TS del agua tratada.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados sobre la caracterización del agua residual textil

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de la caracterización del agua residual de descarga en la industria textil TSP y una comparación con resultados de estudios similares. A continuación, se presentan los resultados de la caracterización del agua residual de descarga. En la Figura 4 se presentan los resultados de los análisis de DQO:

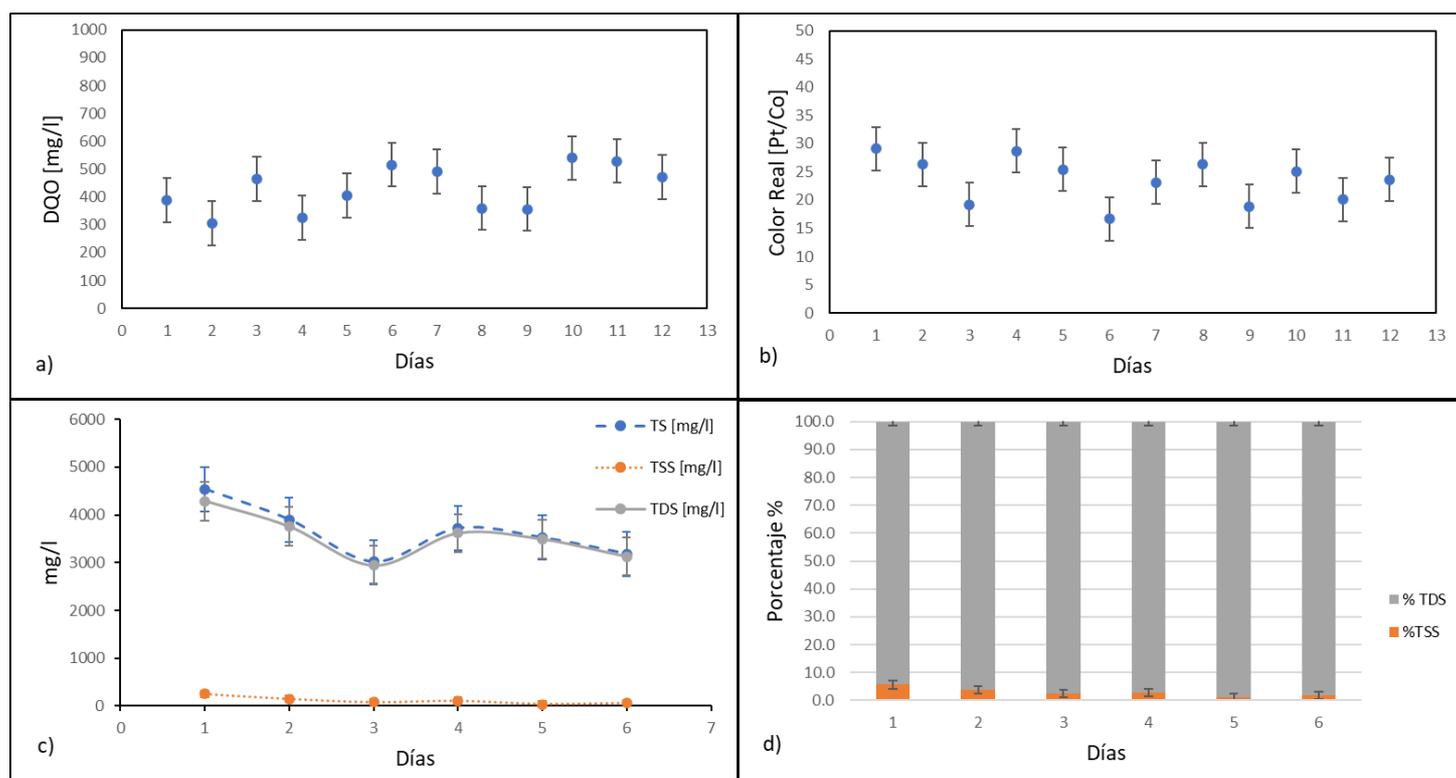


Figura 4. a) Caracterización de DQO [mg/l], b) Caracterización de Color Real [Pt/Co], c) Caracterización de sólidos (TS, TSS y TDS) [mg/l], d) Porcentaje de contenido de TDS y TSS de los Sólidos Totales.

A partir de los resultados que se observan en la Figura 4, se determinó el valor promedio de DQO = 430 ± 79 mg/l, valor promedio de Color Real = 24 ± 3.9 [Pt/Co], promedio de TS = 3648 ± 462 mg/l, promedio de TSS = 111 ± 68 mg/l y promedio de TDS = 3536 ± 403 mg/l.

El contenido promedio de los TS se conforma por 97.1 ± 1.37 % en TDS y 2.9 ± 1.37 % en TSS.

A continuación, en la Tabla 2 se presenta el resumen de resultados obtenidos durante la caracterización del agua de descarga:

Tabla 2. Resultados de caracterización del agua de descarga, comparación con la normativa y datos de estudios similares presentados por Nawaz (2014)

Parámetro	TS [mg/L]	TSS [mg/L]	TDS [mg/L]	DQO [mg/L]	Color Real [Pt/Co]
Valor Registrado	3648 ± 462	111 ± 68	3536 ± 403	430 ± 79	24 ± 3.9
Normativa	1600	130	1470	200	Imperceptible dilución 1/20
Valor en que excede normativa	2048 ± 462	-	2066 ± 403	230 ± 79	24 ± 3.9
Estudios Similares	2814 ± 536	244 ± 76	2570 ± 490	434 ± 35	22.8 ± 2.3

Se pudo observar que, en promedio, el contenido de sólidos en el agua de descarga corresponde a un 97.1% de TDS y un 2.9% de TSS. Esto indica que los contaminantes principales se encuentran disueltos en el agua residual textil. El punto del proceso de producción de la planta donde más se concentran las sales y el color es en el teñido de las fibras textiles, debido a que el NaCl rompe con la tensión superficial del agua para facilitar la penetración de los colorantes en los tejidos (Holkar, 2016). En la Tabla 2 se presentan los resultados de la caracterización del agua de descarga, conjuntamente con datos de estudios similares presentados por Nawaz (2014) y la comparación con la normativa establecida por el MAE.

Se puede observar en la Tabla 2, que el parámetro más crítico es el de los TS, siendo el contenido de TDS el que afecta drásticamente al valor total de los TS, excediendo la normativa por 2066 ± 403 mg/l. De igual manera, el DQO presenta un valor con 230 ± 79 mg/l por encima

de la normativa establecida y el parámetro de Color Real también presenta un valor que se encuentra fuera del rango permisible con 24 ± 3.9 Pt/Co.

Los datos de estudios similares indican valores semejantes a los obtenidos durante la caracterización, corroborando el hecho de que más del 90% de los sólidos se encuentran disueltos en el agua final de descarga en plantas de la industria textil. Esto se debe a los procesos de teñido de la industria textil. De acuerdo con Holkar et al. (2016)

4.2. Evaluación del método de tratamiento fisicoquímico por coagulación-floculación

Para la investigación de los efectos de coagulación y floculación en la remoción de los principales parámetros, se varió la dosificación de coagulante entre 30 – 120 ml, mientras que el floculante se varió entre 0.1 y 0.6%. A continuación, se presentan los resultados obtenidos por el método de tratamiento por coagulación-floculación utilizando los productos Aquaflex CMI y Aquaflex FC:

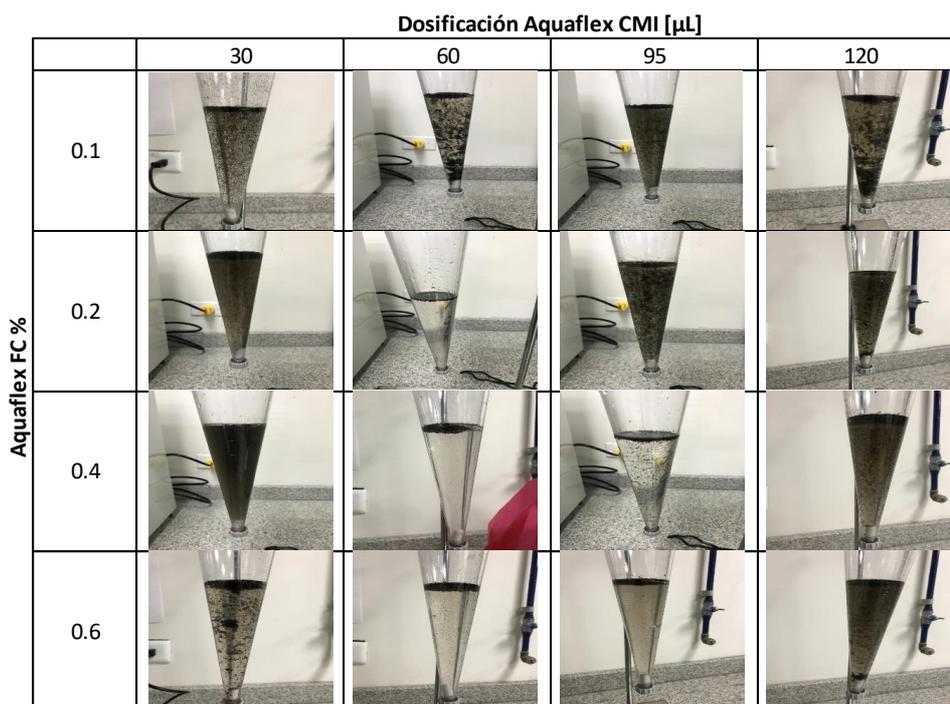


Figura 5. Resultados cualitativos de los experimentos con la dosificación de Aquaflex CMI y FC.

Se establecieron puntajes a cada dosificación con los parámetros de floculación, precipitación, suspensión y clarificación, con el fin de determinar de manera cuantitativa la dosificación óptima de cada producto como se muestra a continuación en la Tabla 3:

Tabla 3. Puntuación de resultados cualitativos para cada dosificación de Aquaflex FC y CMI

		Dosificación Aquaflex CMI [μ L]			
		30	60	95	120
Dosificación Aquaflex FC %	0.1	Floculación: ● Precipitación: - Suspensión: ●● Clarificación: ●	Floculación: ●● Precipitación: ● Suspensión: ● Clarificación: ●	Floculación: - Precipitación: - Suspensión: ● Clarificación: -	Floculación: ●● Precipitación: ●● Suspensión: ● Clarificación: -
	0.2	Floculación: - Precipitación: - Suspensión: ● Clarificación: -	Floculación: ●●● Precipitación: - Suspensión: ●●● Clarificación: ●●●	Floculación: ●● Precipitación: - Suspensión: ● Clarificación: -	Floculación: ● Precipitación: ● Suspensión: ● Clarificación: -
	0.4	Floculación: - Precipitación: - Suspensión: - Clarificación: -	Floculación: ●●● Precipitación: - Suspensión: ●●●● Clarificación: ●●●	Floculación: ●●● Precipitación: - Suspensión: ●●● Clarificación: ●●	Floculación: ● Precipitación: - Suspensión: ● Clarificación: -
	0.6	Floculación: ●● Precipitación: - Suspensión: ●● Clarificación: ●	Floculación: ●●● Precipitación: - Suspensión: ●●● Clarificación: ●●●	Floculación: ●●● Precipitación: - Suspensión: ●●● Clarificación: ●	Floculación: ● Precipitación: ● Suspensión: ● Clarificación: -
	1.0	Floculación: ●● Precipitación: - Suspensión: ●● Clarificación: ●	Floculación: ●●● Precipitación: - Suspensión: ●●● Clarificación: ●●●	Floculación: ●●● Precipitación: - Suspensión: ●●● Clarificación: ●	Floculación: ● Precipitación: ● Suspensión: ● Clarificación: -

De esta manera, se seleccionó la dosificación de Aquaflex CMI que presentó los mejores resultados, siendo esta una dosificación de 60 μ l. A partir de esta dosificación, se compararon los puntajes de cada concentración de floculante Aquaflex FC

Se puede observar en la Figura 5 que la dosificación óptima por sus características visuales de floculación, precipitación, suspensión y clarificación se encuentran a una dosis de 60 μ l de coagulante. Para poder cuantificar este resultado, se proporcionó puntajes para cada parámetro evaluado como se observa en la Tabla 3. Se encontró que concentración óptima de

Aquaflex FC, siendo una concentración de 0.4% la que obtuvo el mayor puntaje. De esta manera, se encontró que, para 100 ml de muestra de agua residual, el punto óptimo es de una dosificación de 60 µl de coagulante Aquaflex CMI y 2.5 ml de floculante Aquaflex FC al 0.4%.

A continuación, se presenta la Tabla 4 y la Figura 6, donde se muestran los resultados de remoción obtenidos por el método de coagulación-floculación con las condiciones óptimas.

Tabla 4. Resultados del método de tratamiento por CF y comparación con la normativa.

Caracterización	DQO [mg/l]	TS [mg/l]	Color Real [Pt/Co]
Sin Tratamiento	472	3524	25
Con Tratamiento	524	2961	Imperceptible
Normativa	200	1600	Imperceptible
Remoción %	-11	16	100

Resultados de estudios similares por Tzoupanos & Zouboulis (2008) indican valores de remoción completa de color, una disminución del 51% en el DQO y una disminución del 30% de TS.

En este estudio se alcanzó una remoción completa de color, sin embargo, no se obtuvieron resultados significativos con respecto a la remoción de TS, pues se logró una remoción del 16%, lo cual todavía se aleja en más de 1300 puntos de lo establecido por la normativa. Adicionalmente, los resultados que se observan en la Tabla 4 nos indican un aumento del DQO en un 11%. Esto puede deberse a la oxidación del coagulante, debido a su composición orgánica, aumentando así la cantidad de material susceptible a ser oxidado como indica Li (2010). De esta manera, se aumenta la carga orgánica y por consecuencia el DQO. Por esta razón, este no es un método adecuado para la industria, al aumentar el DQO y no disminuir significativamente los TS.

4.3. Evaluación del método de adsorción por carbón activado

4.3.1 Pruebas de jarras con agitación magnética

A continuación, se presentan los resultados del método de adsorción por carbón activado en pruebas de jarras con agitación. En la Figura 6 se presenta el porcentaje de carbón activado [g/g] vs el DQO [mg/l] y TS [mg/l] alcanzado tras el estudio:

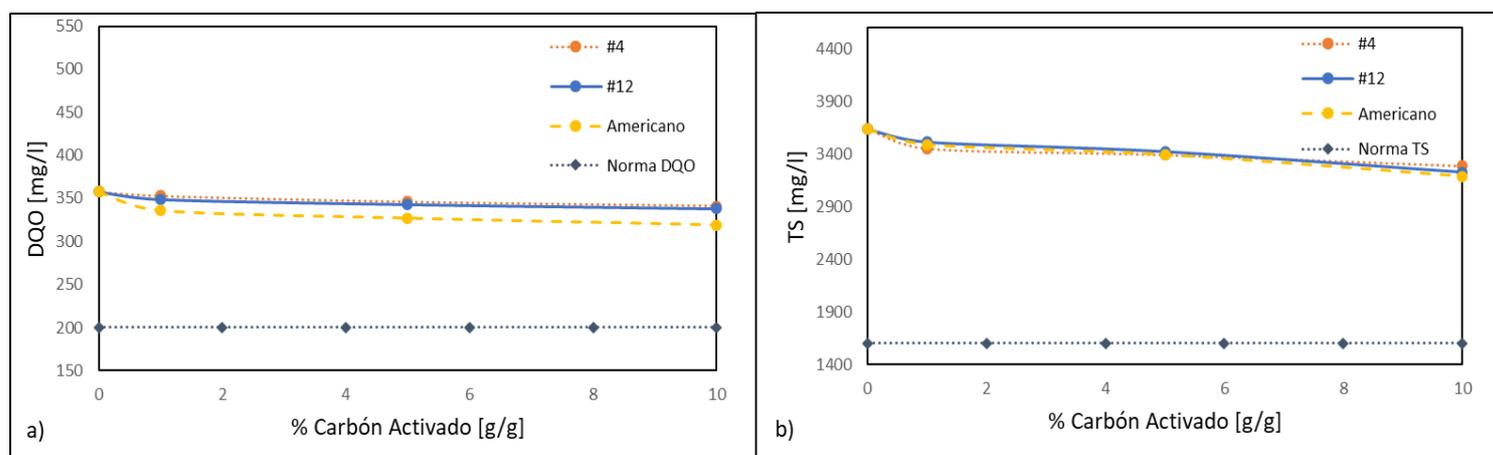


Figura 6. Porcentaje de carbón activado [g/g] vs. a) DQO [mg/l], b) TS [mg/l]

Tabla 5. Resultados del método de tratamiento por adsorción por CA y comparación con la normativa

Caracterización	DQO [mg/l]	TS [mg/l]	Color Real [Pt/Co]
Sin Tratamiento	358	3633	23
CA #4	341	3285	23
CA #12	338	3226	23
CA Americano	319	3184	21
Normativa	200	1600	Imperceptible

En la Tabla 5 podemos observar que la disminución de los 3 parámetros es escasa, notando una ligera mejora al disminuir el tamaño de partícula de carbón activado. Por esta

razón se decidió observar el comportamiento adsorptivo de este material en una columna empacada.

4.3.2 Columna de adsorción

A continuación, se muestran los resultados tras haber tratado el agua de descarga utilizando una columna empacada con carbón activado. Primero, se evaluó el tipo de carbón más efectivo y después se varió la masa de este carbón dentro de la columna:

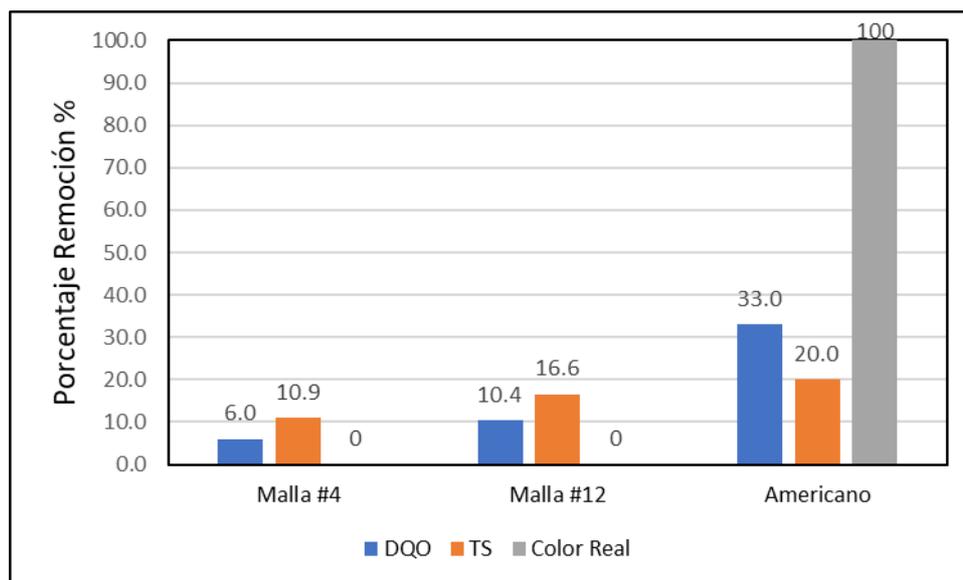


Figura 7. Resultados del método de adsorción por CA en columna empacada

En la Figura 7 se observan los resultados del método de adsorción por CA en una columna empacada con los 3 distintos tipos de carbón activado. Se puede observar que el CA más efectivo es el americano, logrando una remoción de DQO del 47.4%, una remoción de TS del 22.6% y una remoción completa de Color Real. De acuerdo con Muller (2010) esta efectividad frente a los demás tipos de CA se debe a la significativa diferencia en el tamaño de partícula: *Malla #4* (4.76 mm), *Malla #12* (1.68 mm) y *americano* (0.841 mm), pues a medida que esta disminuye, el área superficial aumenta contribuyendo con una mayor cantidad de

microporos, aumentado consecuentemente las propiedades adsortivas del material. Por esta razón, se realizaron los siguientes experimentos, variando la masa de CA empacado en la columna:

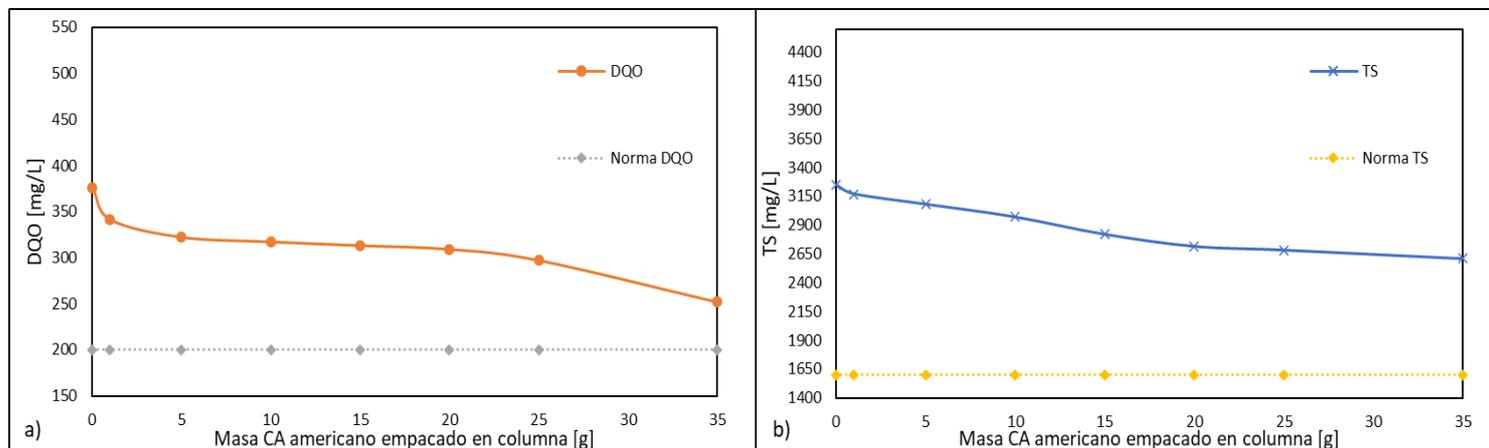


Figura 8. Masa de carbón activado americano empacado en la columna [g] vs. a) DQO [mg/l], b) TS [mg/l]

Tabla 6. Resultados del método de adsorción por CA americano en una columna empacada y comparación con la normativa.

Caracterización	DQO [mg/l]	TS [mg/l]	Color Real [Pt/Co]
Sin Tratamiento	376	3250	24
Con Tratamiento	252	2609	Imperceptible
Normativa	200	1600	Imperceptible
Remoción %	33	20	100

Resultados de estudios referentes a la adsorción por carbón activado de contaminantes presentes en agua residual textil presentan una disminución de DQO del 87.6% y una remoción de color del 90% (Vashi & Road, 2010). Sin embargo, este método logró resultados positivos con respecto a la remoción de DQO en un 33%, remoción de TS en un 20% y remoción de Color Real en un 100%, como se puede observar en la Tabla 6. Estos resultados no indican una

remoción parcial en los parámetros analizados, de manera que este método no logró llegar a cumplir con la normativa establecida por el MAE.

4.4. Evaluación del método de adsorción por nanopartículas super-paramagnéticas

A continuación, se presentan los resultados obtenidos a partir del método de tratamiento por adsorción con Nanopartículas Paramagnéticas. En la Figura 9 se observa la dosificación de NPs [mg] vs. el DQO [mg/l] y TS [mg/l] alcanzado tras el estudio:

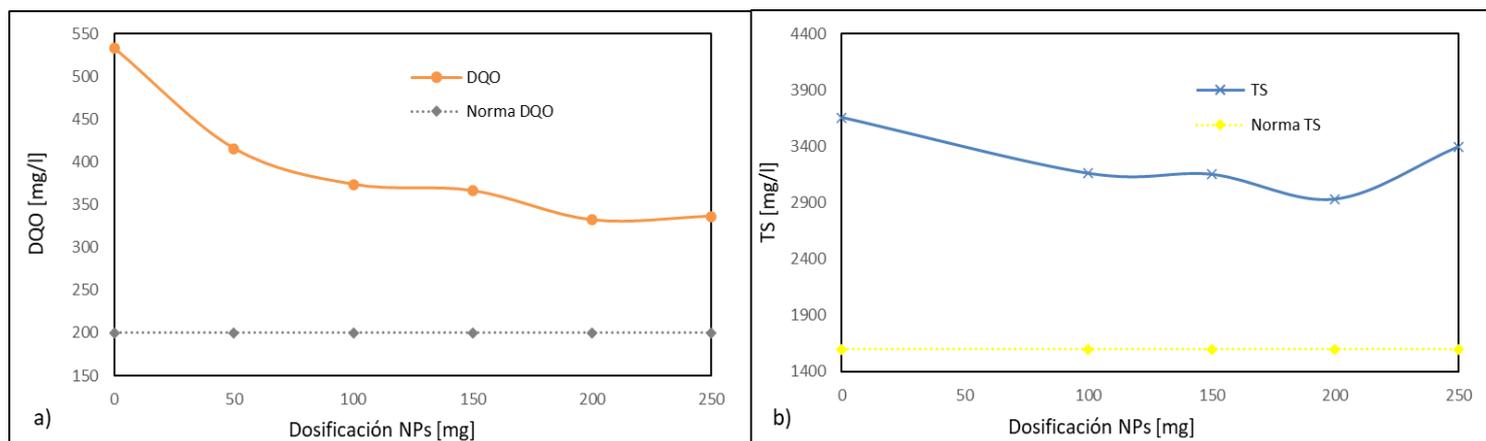


Figura 9. Dosificación de NPs [mg] vs. a) DQO [mg/l], b) TS [mg/l]

Una vez establecida la dosificación óptima de 1 mg NPs/ml muestra, se evaluó la adsorción de las NPs en función del tiempo como se observa en la Figura 10. Se puede concluir que el tiempo óptimo de adsorción es de 10 minutos.

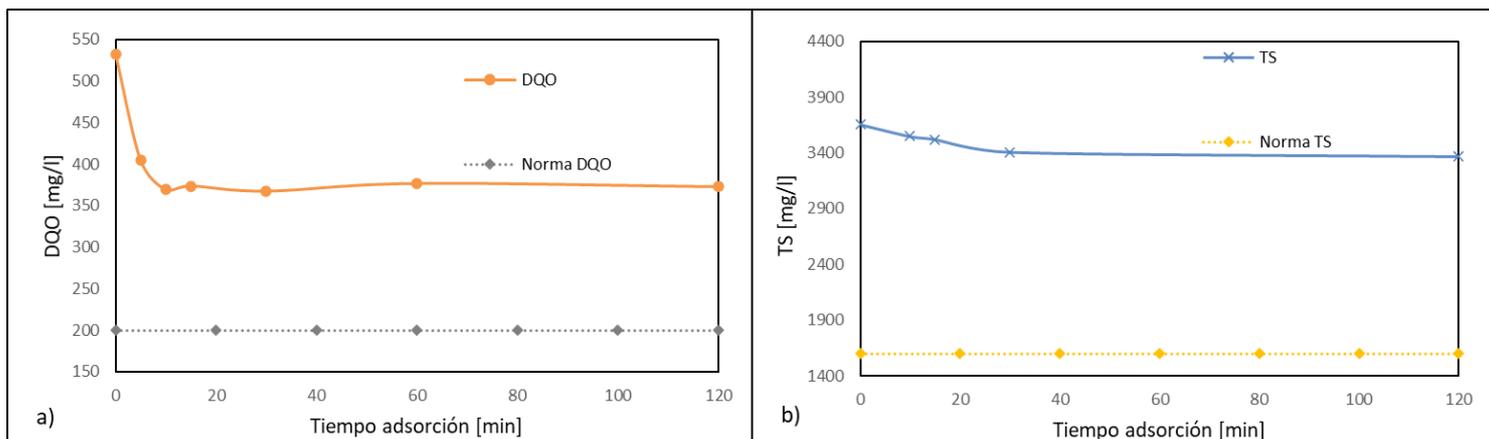


Figura 10. Tiempo de adsorción de NPs [min] vs. a) DQO [mg/l], b) TS [mg/l] a una dosificación constante de 1 mg NPs /ml

Tabla 7. Resultados del método de adsorción por NPs y comparación con la normativa.

Caracterización	DQO [mg/l]	TS [mg/l]	Color Real [Pt/Co]
Sin Tratamiento	533	3655	19
Con Tratamiento	367	3408	11.4
Normativa	200	1600	Imperceptible
Remoción %	30.7	2.9	40

Los resultados de este método, presentados en la Tabla 7, indican una remoción del 30.7% del DQO, una remoción del 2.9% de los TS y un 40% de remoción del Color Real. Esto indica que el método no es efectivo con respecto a la remoción de los TS y remueve de manera parcial el DQO y el Color Real. Sin embargo, este es un método que aún se está desarrollando y evaluando, pues sus aplicaciones son vastas y prometen ser bastante eficientes con respecto al tratamiento de aguas residuales. Resultados presentados por Liu (2014) evidencian una remoción completa de color de tintes organometálicos utilizando dosificaciones y condiciones similares a las del presente estudio. La diferencia entre resultados puede ser producto de la composición, cantidad y variabilidad de los colorantes presentes en el agua de descarga. De igual manera, al tener una concentración tan alta de color y sales disueltas, las NPs se saturan

sin lograr remover mayor parte de los TS y del DQO. De esta manera, se descarta el método como un tratamiento complementario a la actual PTAR.

4.5. Evaluación del método de tratamiento por oxidación avanzada: reacción fenton

A continuación, se presentan los resultados del método de tratamiento por Oxidación Avanzada tipo Fenton. La Figura 11 presenta los resultados de la dosificación de H_2O_2 [μ l] vs. el DQO [mg/l] y TS [mg/l] alcanzado tras el estudio:

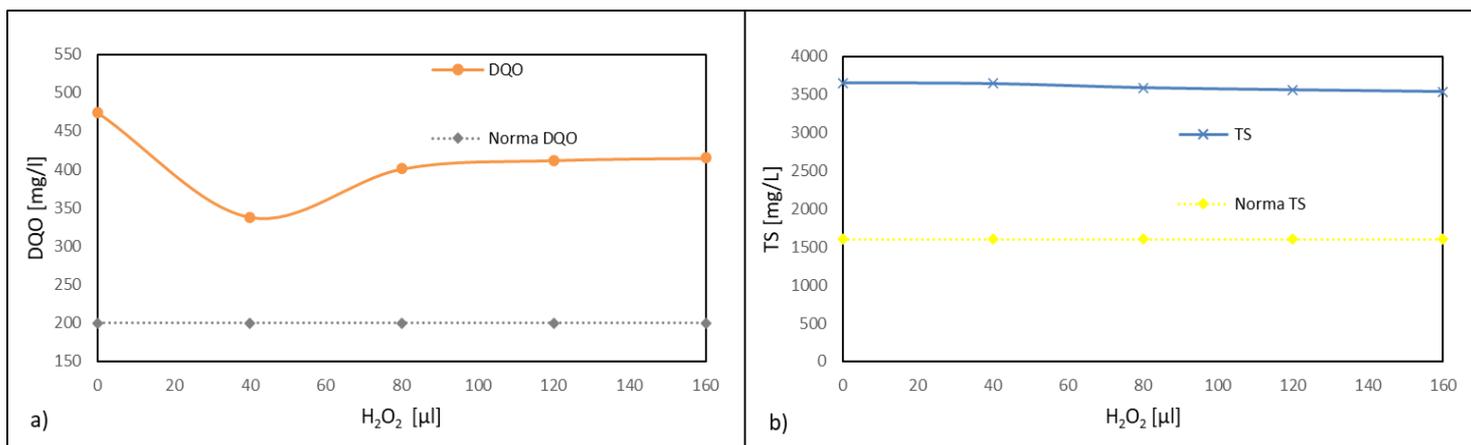


Figura 11. Dosificación de H_2O_2 [μ l] vs. a) DQO [mg/l], b) TS [mg/l]

Tabla 8. Resultados del método de Oxidación Avanzada tipo Fenton y comparación con la normativa.

Caracterización	DQO [mg/l]	TS [mg/l]	Color Real [Pt/Co]
Sin Tratamiento	474	3654	26
Con Tratamiento	338	3538	10.3
Normativa	200	1600	Imperceptible
Remoción %	28.7	3.2	60.4

En la Figura 11 a), se puede observar una disminución significativa de DQO a una dosificación de 40 μl de H_2O_2 con un aumento secuencial a partir de las dosificaciones siguientes de H_2O_2 . Esto puede ser resultado de una saturación de H_2O_2 en la reacción Fenton, de manera que a dosificaciones menores a 40 μl de peróxido de hidrógeno, la reacción se lleva a cabo de manera óptima, degradando la carga orgánica de la muestra. Sin embargo, la remoción de TS es insignificante, con apenas un 3.2% como se puede observar en la Tabla 8. Con respecto a los resultados de DQO, se observa una disminución del 28.7% y una disminución en el Color Real del 60.4%. Con estos resultados, el agua de descarga tratada no cumple con la normativa establecida por el MAE como se detalla en la Tabla 8. Resultados en estudios similares por Karthikeyan (2011) presentan valores de reducción de DQO del 91%, de TS del 6.4%, lo cual corrobora que el hecho de que este método de Oxidación Avanzada tipo Fenton es eficiente con respecto a la remoción del DQO mas no para la remoción de TS en una muestra de agua residual textil. La diferencia de resultados puede ser producto de la composición de los contaminantes, específicamente de la alta concentración de TDS en el agua de descarga, pues al no ser materia orgánica no se la logra remover eficientemente con este método.

4.6. Resultados de métodos combinados y comparación entre métodos de tratamiento

A continuación, se presentan los resultados tras combinar distintos métodos evaluados utilizando los puntos óptimos de cada método. Los métodos que se combinaron fueron: coagulación-floculación + adsorción por carbón activado (CF-CA), coagulación-floculación + adsorción por nanopartículas (CF-NPs), adsorción por carbón activado + adsorción por nanopartículas (CA-NP) y coagulación-floculación + adsorción por nanopartículas + adsorción

por carbón activado (CF-NPs-CA). En la Tabla 9 y en la Figura 12 se observa el resumen de resultados tras la combinación de métodos y los valores de la normativa.

Tabla 9. Resumen de resultados de remoción de métodos combinados y comparación con la normativa.

Métodos Combinados	DQO [mg/l]	TS [mg/l]	Color Real [Pt/Co]
Sin tratamiento	527	3601	22
CF-CA	463	3270	Imperceptible
CF-NPs	523	3520	Imperceptible
CA-NPs	307	3255	Imperceptible
CF-NPs-CA	342	3260	Imperceptible
Normativa	200	1600	Imperceptible

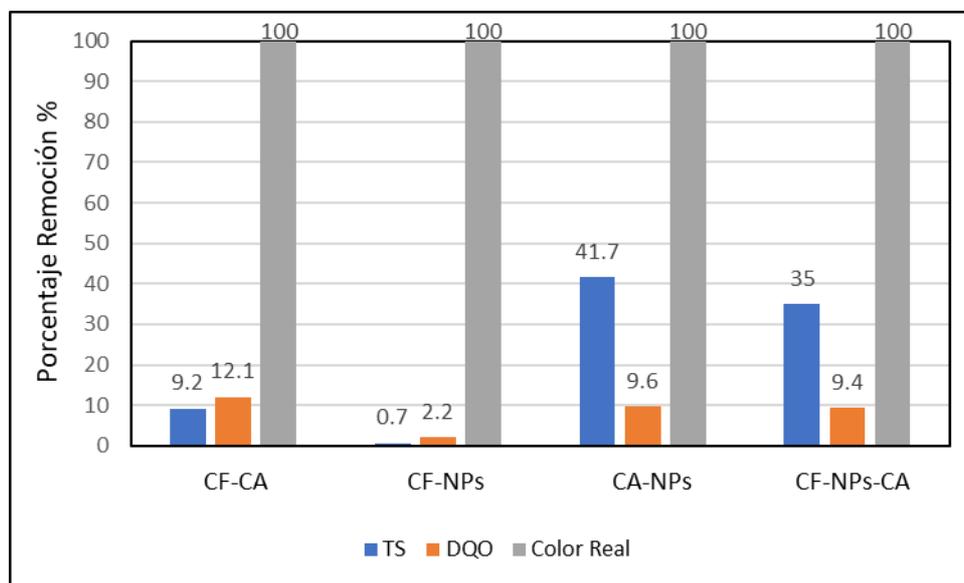


Figura 12. Porcentaje de remoción de parámetros principales por métodos combinados.

Se puede observar en la Tabla 10 que ninguna combinación de métodos logra cumplir con la normativa establecida. Esto indica que los contaminantes que son removidos de cada

método son similares. Por esta razón, no se tiene una mayor remoción que con los métodos aplicados individualmente, descartando así la combinación de métodos como una opción para implementarse en la PTAR de la industria.

A continuación, se presenta en la Tabla 10 la comparación entre los distintos resultados de los métodos de tratamiento de aguas residuales evaluados:

Tabla 10. Resumen de resultados de remoción de los distintos métodos de tratamiento evaluados y comparación con la normativa

Método tratamiento	DQO [mg/l]	TS [mg/l]	Color Real [Pt/Co]	%Remocion DQO	% Remocion TS	% Remocion Color
CF	524	2961	Imperceptible	-11	16	100
Adsorción CA	252	2609	Imperceptible	33	20	100
Adsorción NPs	367	3408	7	30.7	2.9	40
Fenton	474	3654	10.3	28.7	3.2	60.4
Normativa	200	1600	Imperceptible	-	-	-

5. CONCLUSIONES

Se realizó una caracterización a las aguas de descarga en la industria Textil San Pedro después del tratamiento en la planta de tratamiento de aguas residuales y un estudio comparativo entre diferentes métodos complementarios de tratamiento de aguas residuales aplicados para la remoción de TS, DQO y Color Real. Tras la caracterización se obtuvo que el 97.1% de los TS se encuentran disueltos, probablemente debido a la gran cantidad de NaCl utilizada durante el proceso.

Los métodos de tratamiento por Coagulación-Floculación (CF) y de adsorción por Carbón Activado (CA) muestran una mayor remoción de TS con un 16% y 20% respectivamente. El método de tratamiento fisicoquímico por CF indica un aumento en el DQO, lo cual resulta negativo para el estudio realizado. Los métodos de adsorción por CA y

por NPs muestran una remoción del DQO de 33 y 30.7% respectivamente, mientras que el método de oxidación avanzada tipo Fenton presenta una remoción de DQO del 28.7%. Con respecto a la remoción del Color Real, los métodos de CF y de adsorción por CA muestran una remoción completa, mientras que los métodos de adsorción por NPs y el método de oxidación avanzada tipo Fenton muestran una remoción del 40 y 60.4%, respectivamente. Con los resultados obtenidos, se concluye que con ningún método ni combinación de métodos se logra una remoción mayor al 42% con respecto a los TS ni al DQO, lo que indica que ningún método sería efectivo para el cumplimiento de la norma establecida por el MAE. Sin embargo, los métodos de CF y adsorción por CA logran una remoción total del Color Real, cumpliéndose con la normativa establecida en este parámetro. Se requiere una investigación más profunda evaluando otros métodos de tratamiento que se centren directamente en el problema de TDS que tienen las aguas de descarga de la industria Textil San Pedro.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adamaki, B., Karatza, D., Chianese, S., & Musmarra, D. (2016). *Super-Paramagnetic Nanoparticles : Manufacturing , Structure , Properties , Simulation , Applications*. 47, 79–84.
- Ansari, R. (2009). Activated Charcoal : Preparation , characterization and Applications : A review article. *International Journal of ChemTech Research*, 1(4), 859–864.
- Asociación de Industriales Textileros del Ecuador. (2017). *Estadísticas de comercio exterior. Bloque Económico 2017*
- Bisschops, I., & Spanjers, H. (2008). *Literature review on textile wastewater characterisation*. 24:11, 1399–1411.
- Cheremisnoff, N. P. (1997). Handbook of water and wastewater treatment technology. In *Journal of Hazardous Materials* (First Edit, Vol. 53, Issues 1–3). Butterworth-Heinemann.
- Dey, S., & Islam, A. (2015). A Review on Textile Wastewater Characterization in Bangladesh. *Resources and Environment*, 5(1), 15–44.
- Dionysiou, D. D., Maity, A., & Bux, F. (2015). Synthesis and performance evaluation of a new polymeric composite for the treatment of textile wastewater. *Industrial and Engineering Chemistry Research*.
- Ferroudj, N., & Nzimoto, J. (2013). Maghemite nanoparticles and maghemite/silica nanocomposite microspheres as magnetic Fenton catalysts for the removal of water pollutants. *Applied Catalysis B: Environmental*, 136–137, 9–18.
- Gallo-Cordova, A. (2019). Effect of the Surface Charge on the Adsorption Capacity of Chromium (VI) of Iron Oxide Magnetic Nanoparticles Prepared by Micro-Wave assisted Synthesis. *Water*, Vi, 1–12.
- Gallo-cordova, A., Lemus, (2019). Superparamagnetic nanosorbent for water purification : Assessment of the adsorptive removal of lead and methyl orange from aqueous solutions. *Science of the Total Environment*, 134–644.
- Hach, Datalogging Colorimeter Handbook DR890, (2007).
- Hayat, H., Mahmood, Q., Pervez, A., Bhatti, Z. A., & Baig, S. A. (2015). Comparative decolorization of dyes in textile wastewater using biological and chemical treatment. *Separation and Purification Technology*, 154, 149–153.
- Holkar, C. R., Jadhav, A. J., Pinjari, D. V., Mahamuni, N. M., & Pandit, A. B. (2016). A critical review on textile wastewater treatments : Possible approaches. *Journal of Environmental Management*, 182, 351–366.
- Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. (2018). Boletín Técnico: *Evolución del índice de producción de la industria manufacturera (IPI-M)*
- Iqbal, M. J., & Ashiq, M. N. (2007). Adsorption of dyes from aqueous solutions on activated charcoal. *Journal of Hazardous Materials*, 139, 57–66.
- Karthikeyan, S., Titus, A., Gnanamani, A., Mandal, A. B., & Sekaran, G. (2011). Treatment of textile wastewater by homogeneous and heterogeneous Fenton oxidation processes. *Desalination*, 281(1), 438–445.
- Leiknes, T. O. (2009). The effect of coupling coagulation and flocculation with membrane filtration in water treatment: A review. *Journal of Environmental Sciences*, 21(1), 8–12.
- Li, T. P. (2010). Coagulation and Flocculation Treatment of wastewater in Textile Industry by using Chitosan. *Journal of Chemical and Natural Resources Engineering*, 4(1), 43–53.
- Liu, X., Shi, W., Zhang, Y., An, S., & Zhang, L. (2014). Adsorbing Properties of Magnetic

- Nanoparticles Mn- Ferrites on Removal of Congo Red From Aqueous. *Journal of Dispersion, Science and Technology*, 37–41.
- Ministerio de Ambiente Ecuatoriano. (2018). Anexo 1 del Libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA)
- Muller, B. R. (2010). Effect of particle size and surface area on the adsorption of albumin-bonded bilirubin on activated carbon. *Carbon*, 8, 1–9.
- Nawaz, M. S., & Ahsan, M. (2014). Comparison of physico-chemical, advanced oxidation and biological techniques for the textile wastewater treatment. *Alexandria Engineering Journal*. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2014.06.007>
- Nidheesh, P. V., & Gandhimathi, R. (2014). Effect of solution pH on the performance of three electrolytic advanced oxidation processes for the treatment of textile wastewater and sludge characteristics. *RSC Advances*, 4(53), 27946–27954.
- Paździor, K., Bilińska, L., & Ledakowicz, S. (2018). A review of the existing and emerging technologies in the combination of AOPs and biological processes in industrial textile wastewater treatment. *Chemical Engineering Journal*, 213, 90–924.
- Sarayu, K., & Sandhya, S. (2012). Current Technologies for Biological Treatment of Textile Wastewater – A Review. *Appl Biochem Biotechnol*, 167, 645–661.
- Syafalni, S. (2012). Treatment of Dye Wastewater Using Granular Activated Carbon and Zeolite Filter. *Modern Applied Science*, 6(2), 37–51.
- Tzoupanos, N. D., & Zouboulis, A. I. (2008). Coagulation-Flocculation Processes in Water / Wastewater Treatment: The application of new generation of chemical reagents. *Heat Transfer, Thermal Engineering and Environment*, 309–317.
- Vashi, R. T., & Road, R. (2010). Treatment of Textile Wastewater by Adsorption and Coagulation. *E-Journal of Chemistry*, 7(4), 1468–1476.
- Verma, A. K., Dash, R. R., & Bhunia, P. (2012). A review on chemical coagulation / flocculation technologies for removal of colour from textile wastewaters. *Journal of Environmental Management*, 93, 154–168.
- Wang, N., Zheng, T., Zhang, G., & Wang, P. (2016). Journal of Environmental Chemical Engineering A review on Fenton-like processes for organic wastewater treatment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 4(73), 762–787.
- Yadav, A., Mukherji, S., & Garg, A. (2013). Removal of Chemical Oxygen Demand and Color from Simulated Textile Wastewater Using a Combination of Chemical / Physicochemical Processes. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 52, 10063–10071.