

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICAS**

**INFORME DE MATERIA INTEGRADORA**

**“DESCONTAMINACIÓN DE AGUAS RESIDUALES REALES  
EN LA INDUSTRIA CARTONERA MEDIANTE  
COMBINACIÓN DE TRATAMIENTOS CONVENCIONALES  
Y PROCESO FENTON”**

Previo a la obtención del Título de:

**INGENIERO QUÍMICO**

Autores

**KARLA ANDREA CAICEDO ZAMBRANO**

**MARLYS DENISSE MORENO VIVANCO**

**GUAYAQUIL – ECUADOR**

**AÑO 2017**

## RESUMEN

En el presente documento, se analiza la eficiencia del tratamiento de las aguas residuales de una empresa cartonera, mediante procesos convencionales como decantación y filtración en combinación con el proceso Fenton, además de la utilización de filtros naturales, con el fin de reducir los componentes orgánicos presentes en el agua a tratar.

Este proyecto consta de tres fases, en la primera fase se realizó el muestreo del agua proveniente del efluente del área de proceso de una industria cartonera, ubicada en la ciudad de Machala. La segunda fase consistió en la caracterización inicial de la muestra para evaluar la condición en la que se encontraban los parámetros fisicoquímicos iniciales: DBO<sub>5</sub>, DQO, COT, color y turbidez. Esta etapa permitió la elección de la combinación y orden adecuado de los métodos para el tratamiento.

Finalmente, en la tercera fase o fase experimental, se buscó la dosis correcta de los reactivos a usar en el proceso Fenton, además de las condiciones en que deben encontrarse los parámetros fisicoquímicos para la eliminación de la mayor cantidad de la carga orgánica presente en la muestra, principalmente en la etapa de la aplicación del proceso Fenton, el cual basa su efectividad en las concentraciones de reactivos de Sulfato de Hierro (FeSO<sub>4</sub>) y Peróxido de Hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>).

Luego de haberse aplicado las fases mencionadas, se obtuvieron porcentajes de eliminación de contaminantes en un 90% en promedio, esto con relación a los valores de DBO<sub>5</sub> y DQO. El agua al final del tratamiento presentó una coloración transparente, evidenciando también con esto la eficiencia obtenida al aplicar esta metodología de depuración.

**Palabras Clave:** Efluente, Tratamiento, Fenton, Filtros

## ABSTRACT

In the present document, the efficiency of the water treatment in a paperboard industry has been analyzed, through conventional processes as decantation and filtration in combination with Fenton process, in addition with the use of natural filters, with the objective to reduce organic components contained in the water.

The Project is about three phases, in the first one; it has been made the sampling of the water in the effluent of the process area in the paperboard industry, located in Machala city. The second phase consisted in the characterization of the sample to evaluate the initial condition of the physical parameters like: BOD<sub>5</sub>, COD, TOC, color and turbidity. This stage allowed the election of the right combination and order of the methods for the treatment.

Finally, in the third phase or experimental phase, it had been looking the correct dose of the reagents to use in Fenton process, also the conditions that the physical parameters have to keep to the elimination of the major quantity of the organic load present in the sample, principally in the stage of the application of Fenton process, which base the effectivity in the concentrations of the reagents of Iron sulphate and hydrogen peroxide.

After all the apply of the phases, it has been gotten percentages of the elimination of contaminants in a 90% in average, this in a relation with the values of the BOD<sub>5</sub> and COD. The water, product of the treatment presented a transparent coloration, showing the efficiency gotten with the application of this depuration methodology.

**Keywords:** Effluent, Treatment, Fenton, Filters

## DEDICATORIA

Sin dudarle este trabajo lo dedico a mi familia, a mis padres quienes me han demostrado que solo se necesitan anhelo y constancia para cumplir los objetivos que me planteo, quienes a pesar de la distancia han estado presentes en cada uno de mis logros y fallos, fortaleciendo día a día con paciencia mi carácter. A mi hermano quien me motiva a ser su ejemplo y por quien doy lo mejor de mí, espero entiendas lo importante que es llegar a este momento y anheles tanto como yo luchar por cumplirlo.

Karla

Dedico este trabajo mis padres Víctor Hugo Moreno y Carmen Vivanco; a mi hermano Carlos y mi sobrina Ana Victoria, quienes depositaron en mí toda su confianza y me alentaron durante toda mi etapa estudiantil, lo cual me ha permitido crecer y superarme cada día.

A mis abuelos: Santos Vivanco y Olga Villalta y especialmente a Teresa López, quienes con sus oraciones me reconfortaron y me impulsaron durante mi carrera universitaria.

A Gabriel Guerra Delgado, quien ha sido mi apoyo incondicional durante toda mi etapa universitaria.

A estos seres nobles y abnegados, que supieron despertar en mi formación intelectual una expresión de vida, convencíendome que en un futuro no muy lejano veré realizados mis más grandes anhelos de bienestar y felicidad, les dedico con toda devoción todo mi esfuerzo y todos los logros de mi carrera universitaria.

Marlys

## AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por la fortaleza y sabiduría, por darme el carácter para poder sobrellevar esta etapa de manera independiente, lejos de mi familia, pero siempre guiándome a seguir el mejor camino.

Agradezco a mis padres, Carlos Caicedo y Pamela Zambrano, por ser el bastón que me mantuvo de pie, por sus múltiples esfuerzos para que mi etapa universitaria posea una carga ligera, que como joven pudiese aguantar, pero que al mismo tiempo me convierta en una persona fuerte para enfrentar las diferentes adversidades de la vida. A mi hermano Jair Caicedo por su paciencia, por ser una persona noble y demostrarme que ser el mejor no siempre es lo más importante, vale más la belleza del corazón. ¡Gracias a ustedes lo logre!

Agradezco a mi tía Gaby Caicedo, por haberme recibido en su hogar como un miembro más de la familia, por su inmensa paciencia y comprensión, por darme la libertad de desenvolverme sin limitaciones.

Agradezco a la Escuela Superior Politécnica del Litoral y a los docentes que formaron parte de mi formación profesional, de manera especial al Ph.D. Francisco Torres Andrade por su apoyo incondicional, paciencia, tiempo y comprensión, por darme la oportunidad de crecer en el ámbito profesional y abrirme las puertas hacia la realidad laboral; de igual manera agradezco al equipo de trabajo de PSI CIA. LTDA., quienes han brindado sus conocimientos de manera desinteresada para mi formación profesional.

Finalmente agradezco a Marlys Moreno por decidir ser mi compañera en la ejecución de este proyecto y depositar su confianza en mí, sobre todo por la paciencia, valoro mucho su apoyo y amistad.

Karla

Muy trascendental y significativo es para mí ver concluida una importante etapa de mi vida, porque este logro me hace evaluar todos los momentos y circunstancias pasadas y proyectarme hacia el futuro en busca del bienestar para la Patria, para mí y mi familia.

Por ello, en este momento feliz de mi vida, dejo constancia de imperecedera gratitud a:

En primer lugar, a Dios por haberme dado la vida, la fuerza y las habilidades para poder alcanzar mis metas.

A mis padres, por sus múltiples desvelos y esfuerzos en darme el apoyo espiritual y material, muy necesarios para culminar con éxito mi carrera profesional.

A mi compañera Karla Caicedo Zambrano, quien ha sido partícipe en esta etapa del proyecto, ha compartido sus enseñanzas y ha brindado su apoyo de manera incondicional.

A las autoridades y docentes de la Escuela Superior Politécnica del Litoral, especialmente a los de la Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas, que supieron prepararnos con sus sabias enseñanzas durante todo el tiempo que duró la carrera.

Al PHD. Francisco Torres Andrade, director del presente trabajo de investigación que con mucho conocimiento y paciencia supo guiarnos durante todo el proceso.

A la Empresa PSI C.Ltda., por abrirme las puertas y brindarme las facilidades para la realización de este proyecto.

Marlys

## **DECLARACIÓN EXPRESA**

“La responsabilidad del contenido desarrollado en la presente propuesta de la materia integradora corresponde exclusivamente al equipo conformado por:

Karla Andrea Caicedo Zambrano

Marlys Denisse Moreno Vivanco

Y el patrimonio intelectual del mismo a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”.

Karla Caicedo Zambrano

Marlys Moreno Vivanco

## SIGLAS

CIIU	Código de Clasificación Industrial Internacional Uniforme
INEC	Instituto Nacional de Estadísticas y Censos
PIB	Producto Interno Bruto
°C	Grados Centígrados
H	Horas
NTU	Unidad nefelométrica de turbidez
Abs	Absorbancia
OH	Radical Hidroxilo
DQO	Demanda Química de Oxígeno
DBO	Demanda Bioquímica de Oxígeno
COT	Carbón Orgánico Total
pH	Potencial de Hidrógeno
SST	Sólidos Suspendidos Totales
SD	Sólidos Disueltos
SS	Sólidos Suspendidos
PAO	Procesos Avanzados de Oxidación

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO 1 .....	
MARCO TEÓRICO .....	4
1.1. Consumo de Agua en el Ecuador.....	4
1.1.1. Parámetros a analizar en las aguas residuales .....	5
1.1.1.1. Materia Orgánica:.....	6
1.1.1.2. Oxígeno Disuelto:.....	6
1.1.1.3. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO).....	6
1.1.1.4. Demanda Química de Oxígeno (DQO).....	7
1.1.1.5. Sólidos suspendidos y sólidos disueltos.....	7
1.1.1.6. Potencial de Hidrógeno (pH) .....	8
1.1.1.7. Carbón Orgánico Total (COT) .....	8
1.1.2. Procesos convencionales para el tratamiento de aguas residuales .....	9
1.1.2.1. Sedimentación.....	10
1.1.2.2. Floculación y Coagulación. - .....	11
1.1.2.3. Filtración.....	13
1.1.2.3.1 Filtros de lecho de arena.....	14
1.1.2.3.2.Filtros de lecho de balsa .....	15
1.1.2.4. Procesos avanzados de oxidación para purificación del agua .....	16
1.1.2.4.1.Procesos Fenton .....	20
1.2. Tratamiento de aguas para la industria de Cartón. ....	23
1.2.1. Proceso de Producción .....	25
1.2.1.1. Recepción de la materia prima.....	25
1.2.1.2. Elaboración de la pasta.....	26
1.2.1.3. Blanqueo .....	26

1.2.1.4. Producción del cartón.....	27
CAPÍTULO 2 .....	
METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	28
2.1. Metodología de análisis convencionales .....	28
2.2. Fundamentos básicos de los principales métodos instrumentales de análisis empleados.....	28
2.2.1. Carbono Orgánico Total (COT) .....	28
2.2.2. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5).....	29
2.2.3. Demanda Química de Oxígeno (DQO).....	30
2.2.4. Turbidez .....	32
2.2.5. Color.....	32
2.2.6. Potencial de hidrógeno (pH).....	33
2.2.7. Determinación de sólidos sedimentables .....	34
2.2.8. Técnica Experimental .....	34
2.2.9. Toma de muestra .....	35
2.2.10. Preparación de la muestra y determinación de pH.....	35
2.2.11. Filtración.....	37
2.2.12. Centrifugación .....	37
2.2.13. Proceso Fenton .....	38
2.2.14. Filtración con lecho orgánico.....	41
CAPÍTULO 3 .....	
RESULTADOS.....	43
3.1. Influencia del pH sobre el efluente .....	43
3.2. Proceso Fenton .....	46
3.2.1. Efecto a la variación de concentraciones de FeSO <sub>4</sub> y H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> .....	46
3.3. Tratamiento con filtros naturales .....	50
CAPÍTULO 4 .....	

ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	53
4.1. Determinación de las propiedades fisicoquímicas.....	53
4.2. Influencia del pH en la muestra previo al tratamiento.....	53
4.3. Proceso Fenton .....	55
4.3.1. Efecto a la variación de concentraciones de FeSO <sub>4</sub> y H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> .....	55
4.3.2. Efecto del filtrado y proceso Fenton a concentraciones de 100 mM y 200 mM de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> .....	57
4.3.3. Efecto del tiempo de reacción .....	64
4.4. Tratamiento con filtros de lecho natural.....	65
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	68
Conclusiones.....	68
Recomendaciones .....	69
REFERENCIAS.....	70
GLOSARIO DE TÉRMINOS.....	73

## LISTADO DE FIGURAS

Figura 1.1. Representación de un lecho filtrante de arena.....	15
Figura 2.2. Árbol de Balsa Ochroma Pyramidale .....	16
Figura 2.1. Equipo Shimadzu modelo TOC-V <sub>CSN</sub> .....	29
Figura 2.2. Equipo Multiparámetros HQ400 .....	30
Figura 2.3. Termoreactor HACH 456000 .....	31
Figura 2.4. Espectrofotómetro HACH DR 2800.....	31
Figura 2.5. Turbidímetro HACH 2100Q.....	32
Figura 2.6. Espectrofotómetro HACH DR 3900.....	33
Figura 2.7. pH-metro pH DENVER.....	33
Figura 2.8. Conos IMHOFF .....	34
Figura 2.9. Ubicación del punto de muestreo.....	35
Figura 2.10 Decantación en conos IMHOFF con .....	36
Figura 2.11. Decantación a diferentes pH con ácido nítrico .....	36
Figura 2.12. Agua residual filtrada .....	37
Figura 2.13. Sólidos depositados en el fondo .....	38
Figura 2.14. Vasos con dosificaciones de 1.5mM de FeSO <sub>4</sub> , .....	39
Figura 2.15. Coloración de la muestra después.....	40
Figura 2.16. Filtración con lecho de balsa y lecho de arena .....	41
Figura 2.17. Filtración con lecho de balsa y lecho de arena .....	42
Figura 3.1. Conos IMHOFF donde se puede observar .....	44
Figura 3.2. Variación del color en el agua decantada .....	45
Figura 3.3. <i>Diferencia de coloración entre el efluente inicial</i> .....	45
Figura 3.4. Diferencia de coloración entre el agua de industria .....	46
Figura 3.5. Sólidos decantados durante la centrifugación.....	49
Figura 3.6. Decantación del catalizador (FeSO <sub>4</sub> ) a pH 7.....	50
Figura 3.7. Variación de coloración del efluente en cada una de las etapas .....	50
Figura 3.8. Lecho de balsa y arena utilizados como filtros en el tratamiento .....	51
Figura 3.9. Efluentes de filtros (Arena y Balsa).....	52
Figura 4.1. Variación de la turbidez al decantar ácido nítrico, sulfúrico y fosfórico .....	54

Figura 4.2. Variación del COT en el agua decantada con ácido nítrico al variar el pH entre 1 y 5 .....	54
Figura 4.3. Variación del COT a diferentes dosis de FeSO <sub>4</sub> (1.5mM, 3mM, 4.5mM, 6mM) durante un tiempo de 4 horas .....	56
Figura 4.4. Variación del DQO en cada una de las etapas a 3mM de FeSO <sub>4</sub> y 100mM de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> .....	58
Figura 4.5. Variación del DQO en cada una de las etapas a 3mM de FeSO <sub>4</sub> y 100mM de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> .....	58
Figura 4.6. Valores de DQO obtenidos al terminar el proceso Fenton.....	59
Figura 4.7. Valores de DQO obtenidos al terminar el proceso Fenton.....	60
Figura 4.8. Variación del COT en cada una de las etapas del tratamiento .....	60
Figura 4.9. Variación de la turbidez en cada una de las etapas del tratamiento ..	61
Figura 4.10. Variación del color en cada una de las etapas del tratamiento .....	62
Figura 4.11. Variación de turbidez con respecto al tiempo durante la reacción Fenton.....	63
Figura 4.12. Variación del color con respecto al tiempo durante la reacción Fenton .....	63
Figura 4.13. Variación de la turbidez con respecto al tiempo durante la reacción Fenton.....	63
Figura 4.14. Variación de la DBO <sub>5</sub> con respecto al tiempo durante la reacción Fenton.....	64
Figura 4.15. Valores de COT, DBO <sub>5</sub> , DQO y turbidez del efluente de los filtros ..	66
Figura 4.16. Valores de COT y DQO del efluente a pH 7 y filtro de lecho con balsa .....	66

## LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de tratamiento de aguas residuales.....	10
Tabla 2. Procesos Avanzados de Oxidación.....	18
Tabla 3. Métodos analíticos empleados en la medición de los parámetros de calidad.....	28
Tabla 4. Dosificación molar utilizada en el proceso Fenton .....	39
Tabla 5. Valores de los parámetros iniciales del efluente .....	43
Tabla 6. Valores de COT y Turbidez del efluente .....	44
Tabla 7. Resultados de valores fisicoquímicos en las etapas de preparación del efluente .....	46
Tabla 8. Valores de COT a diferentes dosis de $\text{FeSO}_4$ .....	47
Tabla 9. Porcentaje de mineralización durante el proceso Fenton.....	47
Tabla 10. Valores de DQO a diferentes dosis de $\text{H}_2\text{O}_2$ .....	47
Tabla 11. Resultados de DQO en cada una de las etapas de tratamiento a 3 mM de $\text{FeSO}_4$ y 100 mM de $\text{H}_2\text{O}_2$ .....	48
Tabla 12. Resultados de DQO en cada una de las etapas de tratamiento a 3 mM de $\text{FeSO}_4$ y 100 mM de $\text{H}_2\text{O}_2$ .....	48
Tabla 13. Resultados de los parámetros fisicoquímicos durante la reacción con 3mM de $\text{FeSO}_4$ y 100mM de $\text{H}_2\text{O}_2$ .....	48
Tabla 14. Resultados de los parámetros fisicoquímicos después de cada una de las etapas del tratamiento del efluente .....	49
Tabla 15. Resultados de los parámetros fisicoquímicos del efluente de los filtros.....	51
Tabla 16. Resultados de los parámetros fisicoquímicos en cada una de las etapas del tratamiento del agua residual .....	52

# INTRODUCCIÓN

Actualmente el cambio climático, el incremento de los niveles de contaminación ambiental y el crecimiento industrial, ha provocado un aumento en la demanda de los recursos naturales para los procesos de producción, de los cuales se tiene muy poco interés con respecto a su uso o regeneración. Uno de los recursos más importantes para la industria es el agua, pero por su uso descontrolado ha provocado un incremento de contaminantes en las fuentes hídricas. Por esta razón, se busca implementar alternativas que permitan la depuración de las aguas residuales provenientes de los procesos industriales, lo que se lleva a cabo a partir de métodos que permiten cambiar los parámetros físicos y químicos de acuerdo a lo requerido, logrando el vertido final de éstas a las redes de alcantarillado o en el mejor de los casos su reúso en las etapas de producción.

Uno de los sectores industriales en desarrollo constante, es la industria gráfica, de la que se tiene una perspectiva de crecimiento en América Latina proyectada en un incremento del 4%, con una modernización tecnológica y una alta capacidad de inversión [15]. La industria cartonera y de celulosa ocupa el quinto lugar del sector industrial en el consumo de energía y utiliza más agua por tonelada producida a comparación de cualquier otra industria, siendo uno de los mayores contaminantes del aire y agua, generando afectaciones en el cambio climático. Se estima que el consumo eléctrico es de 1400 a 2500 kw/tonelada dependiendo del proceso que se lleve a cabo y un consumo de agua de 20 a 200 m<sup>3</sup>/tonelada generando aproximadamente un agua residual con 7 kg/tonelada de sólidos suspendidos y 55 kg/tonelada de DQO [17].

Dirigiendo el enfoque únicamente en la industria cartonera, el uso de ciertos componentes contaminantes tales como tintes, ácidos resínicos, aceras y ligninas, es vital en su proceso de producción, pero al juntarse estos con el agua, producen un efluente residual cargado de agentes químicos de diversas características orgánicas e inorgánicas, imposibilitando su disposición final al sistema de alcantarillado local.

Debido a que el agua residual de la industria cartonera tiene un alto grado de contaminación, no es suficiente la aplicación de un tratamiento simple para que esta cumpla con los parámetros de descarga al alcantarillado. Por lo tanto, se presenta

la necesidad de dar un tratamiento avanzado, combinándose varios procesos de depuración, evitando que los contaminantes presentes ocasionen daños irreversibles al ecosistema. Siendo importante por esto realizar investigaciones y experimentaciones, analizando la viabilidad que presenta la combinación de las metodologías con el fin de evaluar la eficiencia del tratamiento.

Existen una gran variedad de metodologías usadas para el tratamiento de los efluentes industriales, entre los más comunes se cuenta con: coagulación y floculación, filtración, decantación, tratamiento biológico, entre otros, caracterizados por su facilidad y eficiencia al aplicarlos. Estos tratamientos son capaces de mejorar los niveles de sólidos suspendidos totales (SST), potencial de hidrógeno (pH), demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>), acorde con lo dispuesto en la normativa ambiental. No obstante, estos procesos generan residuos, tales como lodos, los cuales requieren un tratamiento adicional previo a su disposición final, ocasionando un incremento de costos y tiempo, lo que es considerado como un gasto y no una inversión, generando el rechazo de esta fase en el sector industrial.

Es necesario que los métodos de tratamiento a usar, sean además de efectivos en cuanto a la eliminación de contaminantes, beneficiosos tanto en tiempo y costo, por lo tanto, la presente investigación va orientada al estudio de tratamientos de efluentes de industria cartonera mediante la aplicación de procedimientos convencionales en combinación con el proceso Fenton. Se consideran las cualidades con las que aporta cada uno de ellos para encontrar un método óptimo y alcanzar la eliminación de contaminantes.

Entre los procesos convencionales a utilizar, se encuentran la filtración, decantación, coagulación y floculación; mientras que el proceso Fenton posee características de oxidación, utilizándose compuestos como el Peróxido de Hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) y Sulfato de Hierro Heptahidratado (FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O). La descomposición del peróxido provoca la generación de radicales hidroxilos que son especies reactivas, las cuales son capaces de degradar la materia orgánica sin selectividad con el fin de mejorar la calidad del agua tratada.

Es importante determinar la dosificación óptima de sulfato ferroso y peróxido de hidrógeno encontrando el equilibrio ideal entre ambos, eliminando mayor cantidad de contaminantes antes de su disposición final, cumpliendo con los parámetros establecidos en la normativa ambiental. Analizando finalmente la efectividad de la

combinación de los métodos convencionales y el proceso Fenton para el tratamiento de aguas residuales industriales.

Se busca plasmar un enfoque diferente de tratamiento de aguas residuales, en el que la combinación de métodos pueda beneficiar a todos los medios implicados en la actividad de producción del cartón, ya sea en el ámbito de procesos como en el económico de la industria, logrando una disminución del impacto ambiental, provechoso para el ecosistema en general. De esta forma se espera que el agua tratada cumpla con los parámetros de descarga permitidos con la normativa ambiental vigente en el Ecuador al ser tratada mediante la combinación de los procesos eliminando entre el 70% al 80% de la materia orgánica.

# **CAPÍTULO 1**

# MARCO TEÓRICO

## 1.1. Consumo de Agua en el Ecuador

El agua es un componente de vital importancia en el diario vivir del ser humano, gracias a ella se pueden realizar las labores diarias, en el ámbito doméstico e industrial. Según el INEC (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos), se consume en promedio 27.02 m<sup>3</sup> en las zonas urbanas y rurales del país. [9]

En el área industrial, el agua es un componente esencial que está presente en casi todos los procesos de producción. Su origen es variado, proviene de aguas superficiales, tales como, de ríos, lagos o lagunas subterráneas, subterráneas o meteorológicas cuyas características físicas y químicas tienen un mayor grado de pureza que las mencionadas anteriormente.

Un problema causado por su uso continuo es la contaminación que parte desde el proceso doméstico más sencillo, hasta grandes escalas industriales. Al momento de arrojar el agua que consumimos, se dispersan agentes contaminantes, imposibilitando su uso sin antes haberla sometido a un tratamiento previo. El agua tiene la capacidad de descontaminarse a sí misma mediante procesos de dilución o mediante autopurificación. El grado de contaminación del agua dependerá de la concentración que presente el agente contaminante en ella en un factor de masa por cantidad de volumen. [22].

Los contaminantes presentes en el agua se clasifican en dos tipos; biodegradables, que se descomponen de manera natural, y no biodegradables, cuya descomposición es difícil y puede ser un grave problema para su uso; esta será propagada mediante las llamadas cadenas tróficas [18]. Estos contaminantes pueden provocar cambios físicos químicos o biológicos.

- ✓ Los contaminantes físicos son los encargados de modificar la apariencia del agua, generalmente son sólidos cuyo origen es natural y se mezclan en el agua, realizando cambios en color, turbidez, temperatura, sabor, pH, etc.

- ✓ Los contaminantes químicos pueden ser de tipo orgánico, cuya característica es la disminución del oxígeno disuelto en el agua, debido al proceso de degradación biológica, y de tipo inorgánico, contaminantes que pueden provocar toxicidad en el fluido.
- ✓ Los contaminantes biológicos, vienen cargados de microorganismos que son los que se encargan de la transmisión de enfermedades, generalmente entre los virus transmitidos en las aguas contaminadas se encuentra la tifoidea, cólera, etc. [14]

El objetivo del tratamiento de aguas, es la eliminación de agentes no permitidos en ella, evitando que su uso genere problemas en los procesos como la corrosión o incrustaciones, evitando la contaminación de las zonas de descarga del agua que ha pasado por las etapas de producción.

En la actualidad, los procesos de tratamiento de aguas residuales, están conformados por una serie de operaciones unitarias que se adaptarán de acuerdo a los patrones a tratar en la misma, obteniendo aguas que cumplen con los parámetros de descarga al sistema de alcantarillado o a otros cuerpos receptores. En general, todo proceso de descontaminación de aguas residuales está conformado por tres fases:

- ✓ Fase de revisión, que consiste en el análisis del efluente, determinando el caudal del mismo y la carga contaminante que lleva consigo.
- ✓ Fase de análisis de datos, en la que, de acuerdo a los valores obtenidos del efluente, se toman medidas para la reducción de los agentes contaminantes.
- ✓ Fase de costos, en donde se concreta la inversión a realizar para el tratamiento del agua residual, se analizan alternativas de acuerdo a lo estipulado en las fases anteriores. [18].

#### **1.1.1. Parámetros a analizar en las aguas residuales**

Entre los criterios a tomar en cuenta para la evaluación del grado de contaminación del agua, se destacan aquellos en los que se mide la

carga orgánica del mismo, además de aquellos encargados de provocar afectaciones en la apariencia de la misma. Estos son:

#### **1.1.1.1. Materia Orgánica:**

Es la principal causante de contaminación de las aguas, ésta se encarga de agotar el Oxígeno Disuelto presente en su masa. Se encuentra compuesta de Carbono, Oxígeno, Hidrógeno y otras especies de carácter orgánico, en muchas ocasiones también están presentes el Nitrógeno y algunos de sus compuestos.

#### **1.1.1.2. Oxígeno Disuelto:**

Catalogado como uno de los principales parámetros que deben ser medidos al efectuar el tratamiento de aguas residuales, pues de él dependen los organismos para cumplir con procesos metabólicos. Este parámetro indica el grado de contaminación que tiene el agua, debido a que la materia orgánica presente, tiene relación directa con el consumo del Oxígeno Disuelto.

El Oxígeno Disuelto puede verse afectado por la presencia de sólidos suspendidos, que hacen que este valor disminuya. Existe otro fenómeno que ocasiona que haya un exceso de oxígeno, por ejemplo, en aguas con presencia de algas, sin embargo, este fenómeno es menos común entre los tratamientos de aguas. Cabe mencionar que el Oxígeno Disuelto debe ser mayor a 5 mg/l para que pueda desarrollarse vida dentro del agua.

#### **1.1.1.3. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)**

Está compuesta por la materia orgánica, que es el alimento para bacterias que se encargan de consumir el oxígeno presente en el agua. En otras palabras, la DBO refiere a la cantidad de oxígeno necesaria para que pueda descomponerse la materia

orgánica del agua residual, por medio de bacterias que actúan en condiciones aerobias.

Para que ocurra una disminución de la  $DBO_5$ , es necesario el agotamiento de la materia orgánica, su medición se realiza a los 5 días y a  $20^{\circ}C$ , tomando las medidas de Oxígeno Disuelto en el día uno y luego en el día cinco, pero para la eliminación total de la materia orgánica, suelen transcurrir entre 20 a 30 días. [8].

#### **1.1.1.4. Demanda Química de Oxígeno (DQO)**

Conocida por ser otra manera de medir la cantidad de materia orgánica presente en el agua, utilizada por la necesidad de realizar mediciones de manera rápida y segura a través de la demanda de oxígeno de los compuestos de carácter orgánico. Sus mediciones parten de la cantidad de energía que éstos contienen. El valor de DQO será siempre mayor que el de la  $DBO_5$ . La  $DBO_5$  puede correlacionarse con la DQO mediante el factor  $DBO_5/DQO$  conocido como factor de biodegradabilidad. Esta relación, representa la cantidad de carga orgánica presente en el agua residual que puede ser degradada mediante tratamientos biológicos y se utiliza como referencia según los siguientes valores:

$DBO_5/DQO > 0.6$  = puede degradarse fácilmente

$DBO_5/DQO = 0,4 - 0,5$  = se considera parcialmente biodegradable

$DBO_5/DQO < 0,4$  = no es biodegradable

#### **1.1.1.5. Sólidos suspendidos y sólidos disueltos**

Los sólidos suspendidos (SS), como su nombre lo indica, son las partículas en suspensión presentes en el agua y en muchos casos se componen de materia orgánica. Los sólidos disueltos (SD) hacen referencia a las especies como sales presentes en

el agua en estado iónico generalmente, la sumatoria de ambos da como resultado a los sólidos totales (ST). [11].

#### **1.1.1.6. Potencial de Hidrógeno (pH)**

Es una medida del grado de acidez o alcalinidad del agua, su rango va desde 0 a 14, considerándose al 7 como pH neutro. Si una solución tiene un pH inferior a 4,5 es debido a la acidez mineral ocasionada por los ácidos fuertes tales como el ácido sulfúrico, ácido clorhídrico o ácido nítrico. Caso contrario, si el pH alcanza el valor hasta 8.3, presenta una alcalinidad natural provocada por carbonatos o bicarbonatos, para valores superiores al mencionado se debe a una alcalinidad de  $\text{OH}^-$ , producida por compuestos como hidróxido de sodio o hidróxido de calcio [11].

#### **1.1.1.7. Carbón Orgánico Total (COT)**

Se conoce como el carbón que se encuentra presente en las aguas superficiales y se analiza mediante la resta de carbono total y carbono inorgánico.

El Carbono Orgánico Total se origina de una manera natural, está presente en plantas y animales debido a la acción metabólica de sus organismos. Artificialmente se encuentra en las aguas residuales debido al uso de compuestos orgánicos que se encargan de alimentar a la misma con la emisión de éste. Esta sustancia puede ser descompuesta mediante la acción de los microorganismos, mientras los mismos se encuentran en un proceso de consumo de oxígeno.

Un aumento de COT en las aguas ocasiona una disminución significativa del Oxígeno Disuelto en ellas, ocasionando que el ambiente no sea propicio para la fauna marina, impidiendo su

supervivencia. No se conocen características que provoquen efectos sobre la salud humana [16].

### **1.1.2. Procesos convencionales para el tratamiento de aguas residuales**

El tratamiento de aguas residuales, está compuesto de una serie de métodos, los cuales son puestos en práctica de acuerdo al tipo de efluente que se espera tratar. De acuerdo con su complejidad y eficacia se los ha dividido en tipos de tratamiento y se presentan a continuación:

- Tratamiento primario: Utilizado para la eliminación de los sólidos en suspensión o materia flotante, todas aquellas que no son permitidas en los límites establecidos en la normativa ambiental, obteniendo agua más limpia y libre de partículas que puedan interferir en la siguiente fase de tratamiento.
- Tratamiento secundario: Este tratamiento consta de un proceso biológico, basado en el uso de filtros o lodos activados, con el fin de eliminar la materia contaminante del efluente.
- Tratamiento terciario: Es usado en casos en que los contaminantes que han estado presentes en el efluente, no han podido ser eliminados mediante tratamientos secundarios. Puede definirse como la etapa final, en la cual todos los residuos de las etapas anteriores pueden ser eliminados, entre los métodos de tratamiento se cuenta con el intercambio iónico, osmosis inversa, adsorción, filtración, entre otros. [21].

Entre los métodos comúnmente aplicados en los distintos niveles de tratamiento, destacan los presentados en la tabla 1.

**Tabla 1. Tipos de tratamiento de aguas residuales**

<b>Tipo</b>	<b>Método</b>
Tratamiento Primario	Sedimentación Cribado Separación de aceites Homogeneización Neutralización Flotación
Tratamiento Secundario	Aireación prolongada Discos biológicos Lodos activados Filtros biológicos Tratamientos anaerobios
Tratamiento terciario	Filtración Floculación y coagulación Adsorción Intercambio iónico Ósmosis inversa Microtamizado

Entre los métodos convencionales para el tratamiento de aguas, existen algunos que se destacan por su efectividad, velocidad y costos al momento de realizar la depuración, y, generalmente son utilizados en las industrias, con el fin de cumplir con los parámetros de descarga de aguas establecidos en la Normativa Ambiental, tales métodos se muestran a continuación:

#### **1.1.2.1. Sedimentación**

Utilizado para la separación de los sólidos en suspensión presentes en las aguas residuales, es un método muy antiguo, cuyo uso se ha extendido en el tiempo. Su funcionamiento parte de la diferencia del peso específico que tienen las partículas sólidas respecto al líquido, depositándolas en el interior del recipiente en donde se encuentran bajo efecto de la gravedad, facilitando la eliminación de las mismas. Este es un método muy

económico y sencillo, de fácil adaptación en recipientes con formas variadas. Puede ser aplicado después de que el agua ha sido sometida a tratamientos de coagulación y floculación, en caso de que el agua presente un alto nivel de turbidez. El agua que entra cargada de partículas sólidas, será depositada en el tanque de sedimentación, en la cual reposará mientras las partículas se depositan en el fondo del tanque, para luego ser retiradas del mismo, obteniendo como resultado la clarificación del efluente. En general, el tiempo que debe permanecer el agua dentro de un tanque con profundidad entre 3-5 metros, es de aproximadamente tres horas.

#### Tipos de sedimentación:

Entre los mecanismos utilizados en la sedimentación se pueden considerar tres tipos, los cuales son aplicables de acuerdo a la condición con la que se presentan los sólidos en suspensión.

- ✓ Sedimentación discreta. - Las partículas a tratar no van a sufrir un proceso de fusión entre ellas, sino más bien mantendrán sus características individuales. El tamaño, forma o peso no van a variar durante este proceso.
- ✓ Sedimentación con floculación. - Se presenta un cambio de volumen y densidad en las partículas, además de un aumento de la velocidad de sedimentación.
- ✓ Sedimentación por zonas. - Las partículas a sedimentar se juntan y forman una especie de manta que sedimentará totalmente, en este método se formará una interfase entre el sedimento y el líquido [2].

#### **1.1.2.2. Floculación y Coagulación. -**

Consiste en la formación de partículas de un tamaño considerable, con el fin de facilitar la sedimentación de las mismas en el agua. Su función consiste en tratar a las partículas

coloidales o a las suspensiones finas, aunque en ocasiones también va dirigida a sustancias disueltas o partículas en dispersión estable. A la formación de partículas visibles o flóculos, le precede una desestabilización de los componentes debido a la superación de las fuerzas que las mantienen estables [3].

La coagulación se encarga de desestabilizar las partículas coloidales mediante coagulantes químicos, estos vienen cargados de iones de carga positiva que se mezclarán con los coloides que presentan iones con carga negativa, su uso depende de las condiciones en que se encuentra el agua, adicional, se requiere la realización de un mezclado rápido de aproximadamente 30 segundos con el fin de provocar la dispersión del coagulante y mejorar su aplicación.

Entre los reactivos que comúnmente se utilizan en procesos de coagulación se encuentran los siguientes:

- ✓ Sulfato de Aluminio
- ✓ Cloruro férrico
- ✓ Sulfato ferroso
- ✓ Sulfato férrico

En ciertos casos puede recurrirse a:

- ✓ Aluminato sódico
- ✓ Cal

Una vez terminado el proceso de coagulación, es necesaria la realización de un agitado suave para lograr que las partículas puedan tener contacto entre ellas. Este proceso es conocido como floculación. Para la homogeneización de los flóculos se realiza la agitación en un tiempo estimado de 15 a 20 minutos, fusionándolos y aumentando la densidad, esta agitación debe disminuir su velocidad conforme avanza el proceso.

Para el correcto funcionamiento del proceso, es necesario encontrar las dosis necesarias del agente coagulante. Una manera de encontrarla, es realizando pruebas en escalas más

pequeñas mediante un “jar-test” o “test de jarras”, en los cuales en recipientes de volumen específicos con la ayuda de agitación se puede determinar el tiempo necesario para la sedimentación, la cantidad del sedimento generado y el pH adecuado para su funcionamiento [6].

### **1.1.2.3. Filtración**

El método de filtración, consiste en la separación de la parte sólida presente en el agua, pasando a través de un medio poroso que se encargará de retener a los sólidos y abriendo su paso al líquido. La efectividad de la filtración depende del tamaño de los sólidos y los tamaños de los poros del filtro. La filtración puede darse de dos maneras, dependiendo de la relación entre el sólido y la porosidad del filtro, ésta puede ser:

- ✓ Filtración superficial. - consiste en la acumulación de la materia sólida en una base de soporte, obteniendo un fango resaca, separando casi en su totalidad el agua del mismo, etapa denominada “sequedad límite”.
- ✓ Filtración en profundidad. - Usado comúnmente en las industrias, su proceso parte del uso de lechos filtrantes, que se escogen de acuerdo a factores como: características del material filtrante, características del agua que se va a filtrar, cantidad de sólidos totales en el agua, condiciones de operación del filtro o uso de coagulantes.

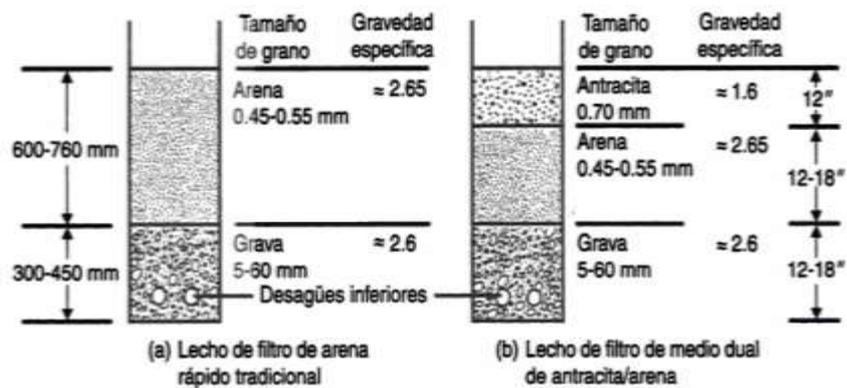
Entre los materiales filtrantes más usados se encuentra la arena, con diferentes diámetros del grano, otra opción puede ser los diferentes tipos de carbones, tierras calizas, etc. El proceso de filtración, cuenta con variantes tales como la microfiltración y ultrafiltración, variando en el tamaño del residuo que puede retener.

Para llevar a cabo el proceso de filtración, se debe pasar al agua por el material filtrante, con cuidado de provocar salpicaduras, el líquido atravesará el filtro, dejando la muestra sólida atrapada en él, obteniendo como resultado agua clarificada y con menor cantidad de sólidos disueltos [10].

#### **1.1.2.3.1. Filtros de lecho de arena**

Entre los materiales utilizados para la elaboración de filtros se destaca la arena. Su funcionamiento se basaba antiguamente en filtrar líquidos con un caudal inferior entre 0,0976 a 0,292  $\text{m}^3/\text{h}.\text{m}^2$ , pero los mismos no dieron resultados favorables para todo tipo de agua, por lo que, gracias a la tecnología, se mejoraron las características del filtro para su correcto funcionamiento en caudales que se encuentran entre 2,44 a 9,76  $\text{m}^3/\text{h}.\text{m}^2$ , este se conoce como filtro de arena rápido.

Entre las ventajas del filtro de arena rápido se cuenta con el ahorro de dinero, debido a que se necesita de menor área filtrante por mayor velocidad a filtrar deseada, además que su operación es más sencilla y tiene un mayor porcentaje de eliminación de bacterias. Su elaboración consiste en la colocación de una capa de arena fina sobre una capa de grava u otra estructura de soporte, la arena puede ir combinada con otros materiales filtrantes como la antracita. En la figura 1.1., se muestra la construcción de un filtro de arena convencional.



**Figura 1.1. Representación de un lecho filtrante de arena**

*Fuente: (Henry, J. Glynn, 1999)*

El filtro de arena es necesario para la contención de contaminantes orgánicos e inorgánicos que afecten la calidad del agua. Este método tiene como cualidad la separación de microorganismos y agentes patógenos, mejorando además la apariencia del agua [10].

### 1.1.2.3.2. Filtros de lecho de balsa

La *Ochroma Pyramidale*, conocida comúnmente como balsa, es una especie maderera de gran potencial industrial internacional. Se encuentra en un ambiente sub-tropical en la selva ecuatoriana, destacada por poseer una alta calidad, razón por la cual su cotización es elevada ante otras especies. El 95% de su plantación de un total de más de 20 mil hectáreas, se encuentra situada en la cuenca del Río Guayas, seguido por las provincias de El Oro, Los Ríos y Pichincha.

El cultivo de balsa debe realizarse en ambientes cálidos y húmedos con una gran cantidad de nutrientes en el suelo. Estas plantaciones no toleran grandes cantidades de agua a su alrededor, muriendo con facilidad al encontrarse ante inundaciones, las mismas toleran precipitaciones de hasta 1500 mm anuales. La temperatura a la cual se debe mantener

a las plantaciones debe ser cálida, ya que muere con facilidad ante climas helados. En la figura 1.2., se presenta el árbol de balsa cultivado en el país.



**Figura 1.2. Árbol de Balsa *Ochroma Pyramidale***

*Fuente: Perfect Earth Network*

El árbol de balsa tiene una velocidad elevada para su crecimiento, el mismo alcanza alturas finales entre 25 y 30 m, aunque puede sobrepasar dicho valor, en un tiempo estimado de 5 a 6 años, mientras más rápido sea su crecimiento, la balsa va a adquirir mayores propiedades para su uso industrial. Los árboles presentan señales de deterioro a temprana edad y no viven más de 20 a 30 años [7].

#### **1.1.2.4. Procesos avanzados de oxidación para purificación del agua**

En la actualidad, ante la contaminación de agua con compuestos altamente tóxicos, se obliga a buscar nuevas técnicas que permitan la depuración de la misma, pues, con los procesos convencionales no es posible alcanzar ese porcentaje de remoción de agentes contaminantes deseado. Por ello, se toma como medida alternativa a los procesos avanzados de oxidación (PAO), que nace como una alternativa de tratamiento de aguas

contaminadas con sustancias difíciles de extraer y que no han podido degradarse bajo ningún tratamiento convencional.

Las aguas residuales que necesitan someterse a un tratamiento deben tener claras sus características y propiedades físicas o químicas, de tal manera que se pueda escoger el adecuado proceso para su tratamiento. Generalmente los efluentes industriales son tratados mediante procesos convencionales de oxidación, cloración, ozonización, etc.; tratamientos biológicos o adsorción por carbón activado. Sin embargo, este tipo de procesos no son suficientes para alcanzar el grado de depuración de las aguas que se adapte a los niveles requeridos bajo la normativa ambiental, es por ello que se recurre a los Procesos Avanzados de Oxidación (PAO<sub>s</sub>), que, aunque son muy poco conocidos y aplicados en países de América Latina, tienen cualidades que permiten remediar y eliminar la toxicidad del agua residual a pequeña o mediana escala [1].

Los PAO<sub>s</sub> son una combinación de procesos físicos y químicos que son capaces de alterar las características del efluente residual, mejorándolo significativamente. Estos procesos se definen por su gran poder oxidante, entre el que destaca la generación del radical hidroxilo (HO<sup>-</sup>) que mediante formas de energía puede ser generado en la reacción, y aporta grandes beneficios de oxidación de la materia orgánica [4].

Entre los procesos que constan dentro de los PAO<sub>s</sub> se destacan los presentados en la Tabla 2.

**Tabla 2. Procesos Avanzados de Oxidación**

<b>PROCESOS FOTOQUÍMICOS</b>	<b>PROCESOS NO FOTOQUÍMICOS</b>
Fotocatálisis heterogénea	Procesos Fenton ( $\text{Fe}_2^+/\text{H}_2\text{O}_2$ ) y relacionados
Fotólisis del agua en el ultravioleta de vacío (UVV)	Radiólisis y y tratamiento con haces de electrones
Foto-Fenton y relacionadas	Ozonización en medio alcalino ( $\text{O}_3/\text{OH}^-$ )
Procesos fotoquímicos	Ozonización con peróxido de hidrógeno ( $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$ )
UV/ $\text{O}_3$	Oxidación electroquímica
Oxidación en agua sub/y supercrítica	Plasma no térmico
UV/peróxido de hidrógeno	Descarga electrohidráulica – Ultrasonido

Los Procesos Avanzados de Oxidación, son de gran ayuda para ser aplicados previo a un tratamiento como el biológico, de tal forma que elimina o reduce la cantidad de contaminantes que son resistentes a procesos de ese tipo, además, entre las ventajas que se tiene al utilizar estas técnicas destacan las siguientes:

- ✓ Puede alcanzarse la destrucción del agente contaminante, gracias a su poder oxidante, superando a las capacidades de los procesos convencionales.
- ✓ No se generan lodos que requieran tratamientos adicionales.

- ✓ Mejora significativamente las propiedades del agua.
- ✓ Permite que el agente contaminante reaccione químicamente.
- ✓ Elimina contaminantes que no han podido ser eliminados mediante procesos convencionales.
- ✓ El consumo energético generalmente es menor que otros procesos.
- ✓ Eliminan organismos que atentan contra la salud y oxidantes residuales.
- ✓ Se pueden tratar contaminantes presentes en bajas concentraciones.
- ✓ Mejora significativamente las propiedades del contaminante, pudiendo ser posible su eliminación por medio de tratamientos posteriores.
- ✓ No generan subproductos debido a la reacción generada.
- ✓ Disminuye las concentraciones de compuestos generados por tratamientos previos.

De igual manera, la aplicación de los Procesos Avanzados de Oxidación posee desventajas que no permiten que estos procesos se posicionen como un método prioritario ante los convencionales, entre las desventajas se destacan:

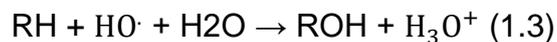
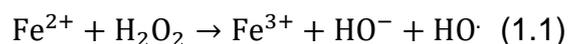
- ✓ Altos costos de operación debido al uso de reactivos como el peróxido de hidrógeno y hierro.
- ✓ Es necesario realizarse un estricto control de pH al realizarse los procesos de oxidación.
- ✓ El uso de procesos como el Fenton, ocasionan un incremento del índice de biodegradabilidad, además, no se logra erradicar completamente a los contaminantes presentes en el agua, entre los compuestos que presentan mayor resistencia a la reacción son: ácidos orgánicos, aldehídos, acetonas, entre otros [4].

#### 1.1.2.4.1. Procesos Fenton

El Proceso Fenton, es una alternativa viable para el tratamiento de los efluentes industriales en donde tiene una amplia participación la generación de radicales hidroxilos, los cuales se producen al reaccionar peróxido de hidrógeno y sales de hierro (II). Esta solución Fenton, es capaz de oxidar ácidos y compuestos orgánicos. Los resultados obtenidos mejoran cuando se encuentra a un pH igual o menor a 3.

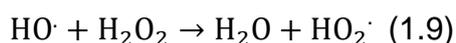
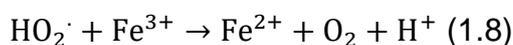
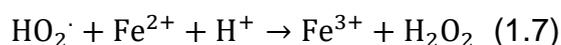
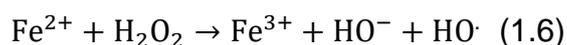
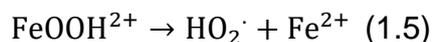
El proceso Fenton se caracteriza por ser una reacción muy rápida y se produce en la oscuridad, tiene la ventaja de que no es necesaria de energía externa para la descomposición del peróxido en los radicales hidroxilos, convirtiéndose en un proceso sencillo y eficiente, sin embargo, este proceso perderá la eficacia si tiene interferencias de aniones disueltos como los cloruros, fosfatos o nitratos [12].

El proceso Fenton se produce a partir de las siguientes reacciones:

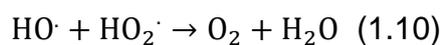


En esta reacción, el ión Fe(III) se reduce debido a la reacción del peróxido, formando el ión Fe(II), acompañado de radicales hidroxilos. En esta etapa la reacción es lenta y permite la regeneración de Fe(II). Para que la reacción pueda ocurrir, es necesario que el peróxido se encuentre en exceso con respecto al hierro.

A pH<3, el Fe(III) va a descomponer al H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> en O<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O, a través de un mecanismo en cadena.



Este proceso se destaca por su gran utilidad al momento de combatir los agentes contaminantes, ya que genera HO·, pero esta reacción debe ser medida, debido a que un exceso de Fe<sup>+2</sup>, el H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, los compuestos halógenos o radicales perhidroxilo, pueden afectar al HO·



Otras especies de Fe, como el Fe(IV) o Fe(V), pueden ser partícipes activamente en el proceso de reacción. Cuando existe un exceso de peróxido, va a existir una concentración de Fe<sup>+2</sup> mucho menor en relación a la de Fe<sup>+3</sup> pues la reacción (5) es más lenta que la reacción (1). Los radicales hidroxilos, reaccionarán con la materia orgánica, pero el HO<sub>2</sub>·, será menos reactivo.

La reacción del ión ferroso con peróxido tiene una constante de velocidad alta, por lo cual, la oxidación de Fe(II) a Fe(III) se produce rápidamente en exceso de peróxido.

A partir de la reacción desde el Fe(II) la velocidad con la que se produce la desmineralización y su eficiencia son elevadas, y se sugiere que el pH utilizado en esta parte sea menor a 2.8. Entre los compuestos que el proceso Fenton puede degradar mediante las reacciones producidas destacan los siguientes: [4]

- ✓ Alifáticos
- ✓ Aromáticos clorados
- ✓ PCBs
- ✓ Nitroaromáticos
- ✓ Colorantes azo
- ✓ Clorobenceno
- ✓ PCP
- ✓ Fenoles
- ✓ Fenoles clorados
- ✓ Octacloro-p-dioxina
- ✓ Formaldehído

Si se trabaja con un exceso de  $H_2O_2$ , se producirá mayor cantidad de radicales hidroxilos o se regenerará el  $Fe^{2+}$ , aumentando además la velocidad de reacción y desaparición de los radicales. Sin embargo, el peróxido residual que queda luego del proceso provoca un gran aporte de componentes tóxicos, alterando los valores finales de carga orgánica. [12].

Este proceso es un gran removedor de herbicidas y contaminantes de suelos, como el hexadecano, mejora la apariencia del agua y descompone ciertos solventes, pero, a su

vez, también se destacan aquellos que no pueden ser afectados mediante el proceso Fenton los cuales son:

- ✓ Ácido acético
- ✓ Acetona
- ✓ Parafinas
- ✓ Ácido oxálico
- ✓ Compuestos organoclorados

La efectividad del tratamiento se ve reflejada en la disminución de la DQO, su uso es necesario como pre-tratamiento de aguas y para tratamiento de suelos. Entre otras ventajas del proceso, se muestran las siguientes:

- ✓ Los reactivos utilizados no presentan un problema grande ambientalmente.
- ✓ El Fe(II) empleado no es tóxico.
- ✓ El peróxido presenta una manera sencilla de utilizar.
- ✓ No existe formación de compuestos clorados como suele pasar en otras técnicas de oxidación.
- ✓ No existirá una transferencia de masa durante el proceso, en vista de que el mismo es homogéneo.
- ✓ El diseño tecnológico presenta características sencillas.

Es importante que, al finalizar el proceso, se alcalinicen las aguas, de tal manera que pueda eliminarse el hierro sobrante. A escalas grandes, no es aconsejable utilizar sales ferrosas puras, pues su costo es elevado, es recomendable el uso de  $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2$ , que contiene 20% de hierro activo [23].

## **1.2. Tratamiento de aguas para la industria de Cartón.**

Una vez conocida la variedad de tratamientos y la forma de determinar su aplicabilidad, se orientará la búsqueda hacia un tratamiento de aguas residuales de la industria cartonera. Su alto contenido en

contaminantes, impide que la realización de tratamientos primarios permita que el agua alcance los parámetros permitidos para su descarga al sistema de alcantarillado. Para esto, es necesario conocer la cantidad de producción y la figura que ocupa en el país, información que sirve para determinar el tratamiento propicio que permita beneficiar a los organismos implicados.

Actualmente el día a día del ser humano gira en torno a actividades en las que el papel y el cartón complementan sus acciones ya sea en el trabajo o dentro del hogar y aunque cada vez hay más influencia de la tecnología, se muestra que el papel y cartón se encuentran en un auge de consumo que se incrementa a pesar de la situación económica actual.

Latinoamérica se ubica en tercer lugar de producción mundial. En América del Sur, se cuenta con una producción de papel y cartón de 14`493.000 toneladas anuales en promedio, presentando un crecimiento del 4,7% anual. Específicamente en Ecuador, de acuerdo con el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, en el año 2016, se presentó un crecimiento del 83,14% en el consumo de estos materiales. El sector manufacturero es conocido por ser uno de los más importantes en el país, representando un alto porcentaje anual de PIB (11% en promedio). Según análisis estadísticos, en los próximos años existirá un aumento de producción y de comercialización tanto de papel como de cartón, ofreciendo una ventaja, ya que se estima crear vínculos comerciales con grandes potencias como China, Estados Unidos o la Unión Europea, países con los cuales se ha firmado convenios, garantizando la efectividad de negociación, pues, estos países se destacan como los principales consumidores del material [20].

La Superintendencia de Compañías expresa que las empresas dedicadas a la elaboración de cartón, presentan una mayor concentración en Guayaquil, Quito y Cuenca, siendo Papelera Nacional S.A., Incasa y Cartopel las principales productoras de cada ciudad mencionada respectivamente; la producción total en el país está

distribuida en 14 empresas, sin embargo, el gobierno actual, busca introducir pequeñas y medianas fábricas al sector industrial, de tal forma que el país genere una mayor cantidad de ingresos y mayores plazas de trabajo. Se estima que el 60% de la producción cartonera, va destinada a la elaboración de empaques para exportación de fruta, principalmente de banano y la materia prima para su elaboración proviene del reciclaje e importación de pulpa o pasta de celulosa. [5].

### **1.2.1. Proceso de Producción**

El proceso de elaboración de cartón en las industrias cartoneras corresponde al CIU (Código de Clasificación Industrial Internacional Uniforme) C1701 "Fabricación de pasta de madera, papel y cartón", el cual ha sido actualizado en el año 2012 por el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. El cartón es un material compuesto de fibras vegetales y componentes químicos que se obtiene en un proceso sencillo que parte de un entramado de fibras de celulosa, las cuales están unidas por medio de enlaces de hidrógeno; al inicio del proceso se requiere una separación de los componentes no celulósicos para garantizar una mayor absorbancia de los químicos empleados, además que de esta forma presentan una mayor resistencia y flexibilidad. Como fuente fundamental de la materia prima propicia para la elaboración de la pasta se encuentra la madera de árboles de especies coníferas, tales como el pino, como fuente secundaria se tiene al bagazo, bambú, cáñamo, lino, entre otros tallos leñosos.

#### **1.2.1.1. Recepción de la materia prima**

Dentro de la fábrica se reciben los troncos en presentación de tablones y pasan por un proceso de descortezado. Luego de la selección de la madera pasan por la maquina astilladora que arrojará porciones de madera de distintos tamaños, estas astillas son dirigidas hacia una serie de cribas que tiene como función la

separación del material por tamaño y grosor, enviando nuevamente a la astilladora a aquellas que no han cumplido los requisitos necesarios para continuar con las siguientes fases del proceso.

### **1.2.1.2. Elaboración de la pasta**

Para el proceso de elaboración de la pasta se requiere la separación de los enlaces de la estructura de la madera, la producción de la pasta se realiza mediante procesos mecánicos, procedimiento al sulfato, procedimiento al sulfito o procesos químicos y puede realizarse en medio ácido o alcalino. El proceso de la elaboración de pasta varía de acuerdo a las características del producto, es decir, la calidad o rendimiento, además del método de elaboración que se usa y los químicos empleados.

### **1.2.1.3. Blanqueo**

Consiste en un proceso de refinado de la pasta resultante de alguno de los procesos antes mencionados, dependiendo de su proceso de formación, ya sea química o mecánica, disuelve o se modifica respectivamente a la lignina que no se pudo eliminar en procesos anteriores. El proceso de blanqueo estará influenciado por el pH y temperatura dentro del proceso, duración y el material blanqueador a utilizar. Una vez que se ha terminado su blanqueamiento, se lava la pasta con agentes cáusticos, eliminando de esta forma a los elementos utilizados, luego pasa a unos tamices, desechando de esta forma a contaminantes que han quedado como residuo y queda lista para su almacenamiento o transporte.

#### **1.2.1.4. Producción del cartón**

Para la producción de cartón, es primordial escoger la pasta a usarse, debido a que influye mucho el proceso con la cual se elaboró, por ejemplo, la pasta mecánica, debido a su fragilidad, es útil para productos como papel de seda, sin embargo, si se combinan métodos mecánicos y químicos, se obtendrá una pasta resistente que reúna las características primordiales para su empleo en la elaboración del cartón. La pasta obtenida de procesos anteriores se coloca en una banda metálica de forma extendida, durante este proceso se elimina la humedad presente mediante rodillos que se encargan de exprimir al producto y toma la forma y grosor deseado mediante calentamiento. Finalmente se obtienen planchas de cartón que serán cortadas a criterio de la venta, almacenadas y posteriormente transportadas. [13]

## **CAPÍTULO 2**

# METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

## 2.1. Metodología de análisis convencionales

Para la caracterización de los parámetros fisicoquímicos del agua residual utilizada en este estudio se llevaron a cabo análisis utilizando los métodos analíticos con estándares de medición mostrados en la Tabla 3.

**Tabla 3. Métodos analíticos empleados en la medición de los parámetros de calidad**

Parámetro	Método de referencia	Técnicas analíticas
Carbono Orgánico Total (COT)	SM 5310 B	Método de combustión a 680°C
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO <sub>5</sub> )	SM 5220 C	Método colorímetro a reflujo cerrado
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	SM 5210 B	Método respirométrico
Turbidez	SM 2130 B	Método nefelométrico
Sólidos Sedimentables (SS)	SM 2540 F	Conos IMHOFF
Color	SM 2120 B	Método espectrofotométrico
Ph	SM 4500H+B	Método electrométrico

## 2.2. Fundamentos básicos de los principales métodos instrumentales de análisis empleados.

### 2.2.1. Carbono Orgánico Total (COT)

El COT es la cantidad de carbono contenido en el agua por la oxidación catalítica de los compuestos con carbono presentes en ésta. El carbono se presenta de dos formas en el agua residual:

carbono orgánico e inorgánico; el carbono inorgánico (IC) es aquél que está presente en el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), iones carbonatos ( $\text{CO}_3^{-2}$ ) y bicarbonatos ( $\text{HCO}_3^{-1}$ ) por lo tanto la suma de estas concentraciones da como resultado el carbono total. La medición del COT no diferencia el carbono de los diferentes compuestos por lo que es capaz de detectar el carbono inorgánico y el carbono total.

La determinación del COT se llevó a cabo en un equipo Shimadzu modelo TOC-V<sub>CSN</sub>, utilizando oxígeno ultra puro de grado 5 como gas de arrastre. Los estándares de calibración son soluciones de ftalato potásico para el carbono total y soluciones de carbonato de sodio y bicarbonato de sodio para el carbono inorgánico, esto está establecido en la norma SM 5310 B. En la figura 2.1. se observa el equipo utilizado para el análisis.



**Figura 2.1. Equipo Shimadzu modelo TOC-V<sub>CSN</sub>**

### **2.2.2. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>)**

La DBO<sub>5</sub> representa la cantidad de oxígeno que se consume para la degradación de la materia orgánica biodegradable. El análisis para este parámetro se lleva a cabo según la norma SM 5210B en la cual se indica que se debe realizar mediante la incubación de la muestra a 20°C en total oscuridad en un tiempo específico de 5 días, asegurando de esta manera la oxidación biológica de la materia orgánica

biodegradable disuelta en el agua. El oxígeno disuelto es medido al inicio y al final del periodo de incubación mediante un medidor multiparámetro como se muestra en la figura 2.2.

Debido a que debe ser en total oscuridad este análisis se lo lleva a cabo en botellas winkler donde se colocan 2 ml de la muestra junto con el agua de dilución, la cual se preparó con soluciones de cloruro de calcio, sulfato de magnesio heptahidratado, cloruro férrico heptahidratado y solución tampón de fosfato en proporción 1:1000 en agua destilada, todo esto en aproximadamente 300 ml de agua. Además, se requiere una solución con semilla incubadora Polyseed™, que se prepara utilizando la mitad de la cápsula de polyseed en 500 ml de agua destilada, agitando por una hora con un agitador magnético. Finalmente, se ingresa en una incubadora durante 5 días y una vez concluido este tiempo se procede a la lectura del oxígeno disuelto final.



**Figura 2.2. Equipo Multiparámetros HQ400**

### **2.2.3. Demanda Química de Oxígeno (DQO)**

La DQO es la cantidad que hace referencia al oxígeno que se consume en la oxidación química de la toda la materia orgánica para transformarse en productos finales inorgánicos. Para el análisis de este parámetro se utilizaron tubos de digestión HACH los cuales contienen permanganato de potasio ( $K_2Cr_2O_7$ ), sulfato de mercurio (II)

( $\text{HgSO}_4$ ) y ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$  85%/ en las proporciones que el método SM 5220 C lo requiere.

Se utilizaron 2 ml de muestra colocada en los tubos HACH para la digestión que consiste en colocar los viales de DQO en un Termoreactor HACH 456000 durante dos horas a una temperatura de 150 °C, una vez que ha culminado la digestión los viales se dejan enfriar y se procede a realizar la lectura de la absorbancia de la muestra a 620 nm en el espectrofotómetro HACH DR 2800, el cual posee una curva de calibración que relaciona la absorbancia con la DQO en  $\text{mg O}_2/\text{l}$ . Los equipos utilizados para este análisis se pueden observar a continuación en las figuras 2.3. y 2.4.



**Figura 2.3. Termoreactor HACH 456000**



**Figura 2.4. Espectrofotómetro HACH DR 2800**

#### 2.2.4. Turbidez

La turbidez es la disminución de la transparencia de un líquido causada por la presencia de sólidos suspendidos o sin disolverse en el agua. Para el análisis de la turbidez se utilizó el método nefelométrico que se basa en la dispersión de la luz por partículas en suspensión en el seno de la disolución para lo cual se utilizaron 10ml de muestra que fueron colocadas en el turbidímetro HACH 2100Q que se muestra en la figura 2.5., este equipo mide el haz de luz en la dirección en la que forma un ángulo recto 90°. La unidad en la que se mide la turbidez es NTU (Nephelometric Turbidity Unit).



**Figura 2.5. Turbidímetro HACH 2100Q**

#### 2.2.5. Color

Para este parámetro se utilizó el método 2220 B el cual se lleva a cabo en un espectrofotómetro HACH DR 3900 como se puede ver en la figura 2.6. Inicialmente se encera el equipo con una celda fotométrica con un blanco de agua destilada el cual se coloca cada vez que enciende el equipo para luego colocar la celda con la muestra. La absorbancia es medida a una longitud de onda de 400 nm.

Las muestras fueron filtradas al vacío con filtros de 0.45µm para eliminar los sólidos suspendidos y que el resultado no se vea afectado, también se realizaron diluciones 1:20 con agua destilada

con aquellas muestras que tenían un color que superaba el límite de detección del equipo.



**Figura 2.6. Espectrofotómetro HACH DR 3900**

### **2.2.6. Potencial de hidrógeno (pH)**

Para la determinación del pH se utilizó el pH-metro pH DENVER el que se presenta en la figura 2.7., la medición fue de manera directa colocando el sensor o medidor de pH en la muestra de agua.



**Figura 2.7. pH-metro pH DENVER**

### 2.2.7. Determinación de sólidos sedimentables

Para lograr medir los sólidos sedimentables de la muestra se utilizó el método SM 2540 F que mide de forma volumétrica la cantidad de sólidos sedimentables que se ubican en la parte inferior de un cono IMHOFF. El procedimiento consiste en llenar un cono con 1L de agua hasta donde la marca lo indica, se deja sedimentar por 45 minutos, una vez transcurrido este tiempo en caso de haber sólidos en las paredes del cono, se remueven con una varilla para que estos caigan en el fondo y se espera 15 minutos más para su sedimentación. Una vez haya pasado el tiempo de decantación se registra el volumen de sólidos sedimentables, lo cual se expresa en mililitros de partículas sedimentadas por litro de muestra. En la Figura 2.8. se puede observar los conos IMHOFF utilizados para la sedimentación.



**Figura 2.8. Conos IMHOFF**

### 2.2.8. Técnica Experimental

Con la finalidad de llevar a cabo la investigación sobre el tratamiento de aguas residuales de la industria cartonera utilizando procesos de oxidación avanzada (PAOs), se busca determinar las condiciones y dosis óptimas para la aplicación de los PAOs en el agua residual, en este caso del efluente proveniente de las etapas de proceso de la

industria cartonera, desde donde se obtuvo el agua para investigación. La experimentación se llevó a cabo en el laboratorio del Centro de Medio Ambiente (CEMA) de la ESPOL.

### **2.2.9. Toma de muestra**

La muestra fue tomada en el efluente proveniente de las áreas de proceso de una industria cartonera ubicada en la ciudad de Machala como se muestra en la figura 2.9, una vez que se captó la cantidad deseada, fue trasladada hasta el laboratorio para realizar las mediciones de los parámetros iniciales tales como Sólidos sedimentales, DQO, DBO<sub>5</sub>, pH, color y turbidez.



**Figura 2.9. Ubicación del punto de muestreo**

### **2.2.10. Preparación de la muestra y determinación de pH**

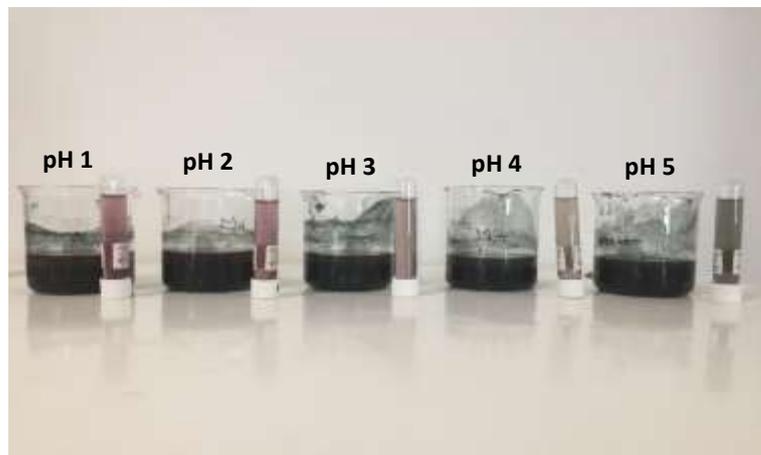
En las diferentes investigaciones realizadas del proceso Fenton y las condiciones ideales para llevarse a cabo, se ha determinado que el pH ideal para que la reacción ocurra es 3, pero la muestra a tratar presenta un pH de 5.1, razón por la cual inicialmente se hizo un ajuste de pH con tres ácidos diferentes: Nítrico ( $\text{HNO}_3$  al 50%), Sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$  al 95%) y Fosfórico ( $\text{H}_3\text{PO}_4$  al 85%) para determinar cuál sería el ácido ideal con el que posteriormente se va a regular el pH de la muestra, para esto se colocaron 3 conos IMHOFF en un soporte tal como se observa en la figura 2.10., en cada uno de ellos

se utilizó 1 L de la muestra y se dosificó con ácido hasta llegar a pH 3.



**Figura 2.10 Decantación en conos IMHOFF con ácido nítrico, sulfúrico y fosfórico.**

Después de que transcurrieron los 45 minutos para la sedimentación de la muestra se notó que en el cono de Ácido Nítrico había mayor volumen de sedimentos siendo esta la razón por la que se utilizó este ácido para regular el pH de la muestra a tratar, posteriormente se procedió a regular la muestra a diferentes pH para conocer cuál es el ideal durante el proceso Fenton, la variación se realizó con valores de 1, 2, 3, 4 y 5, como se puede observar en la figura 2.11.



**Figura 2.11. Decantación a diferentes pH con ácido nítrico**

### 2.2.11. Filtración

La muestra fue filtrada de manera manual con papel filtro, después de haber sido llevado a pH 3 para liberarlo de los sólidos suspendidos, antes del proceso Fenton. En la figura 2.12. se puede observar la coloración de la muestra después de haber sido filtrada.



**Figura 2.12. Agua residual filtrada**

### 2.2.12. Centrifugación

Con el fin de llegar al proceso Fenton con la menor cantidad de sólidos suspendidos en el agua a tratar, se ejecutó un proceso de centrifugación y posteriormente una filtración. La centrifugación se realizó durante 15 minutos, transcurrido este tiempo se nota que hay una evidente deposición de los sólidos suspendidos en el fondo de los tubos tal y como se muestra en la figura 2.13. El sustrato producto de esta etapa fue extraído para posteriormente realizar una filtración.



**Figura 2.13. Sólidos depositados en el fondo del tubo después de la centrifugación.**

### **2.2.13. Proceso Fenton**

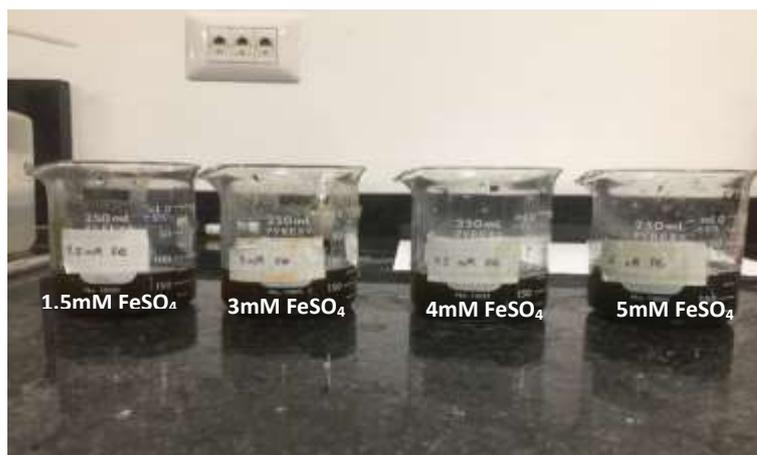
El proceso Fenton consiste en adicionar sales de hierro en presencia de peróxido de hidrógeno en un medio ácido para lograr la formación de radicales  $\text{OH}^\cdot$  así como también se forman radicales perhidroxilos ( $\text{OH}_2^\cdot$ ), los que inician una reacción de oxidación en cadena para lograr la eliminación de materia oxidable. Conociendo esto, es importante en el tratamiento de aguas residuales con proceso Fenton determinar qué concentración de  $\text{H}_2\text{O}_2$  y  $\text{FeSO}_4$  es la óptima para la remoción de mayores porcentajes de materia orgánica.

El proceso Fenton se llevó a cabo de dos maneras experimentales en las que variaban concentraciones y tiempo de reacción. El primer ensayo se llevó a cabo en un tiempo de reacción de 4 horas, se colocaron en 4 vasos de 250 ml una cantidad de 150 ml de la muestra con concentraciones de  $\text{FeSO}_4$  variadas en cada vaso y una concentración constante de  $\text{H}_2\text{O}_2$ , en la tabla 4 se presenta la dosificación molar utilizada en el proceso Fenton.

**Tabla 4. Dosificación molar utilizada en el proceso Fenton**

VASO	FeSO <sub>4</sub> (mM)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (mM)
1	1.5	200
2	3	200
3	4.5	200
4	6	200

La dosificación se realizó de la siguiente manera: dosis de 40 mM durante las tres primeras horas y 80 mM en la última hora, esto se hizo con la finalidad de llevar un registro de cómo se comportan los diferentes parámetros fisicoquímicos con relación al tiempo. En la figura 2.14 se puede observar cómo se llevó a cabo la distribución de las dosis.



**Figura 2.14. Vasos con dosificaciones de 1.5mM de FeSO<sub>4</sub>, 3mM de FeSO<sub>4</sub>, 4.5mM de FeSO<sub>4</sub>, 6mM de FeSO<sub>4</sub>**

La segunda experimentación se realizó filtrando el agua decantada para posteriormente agregar 100 mM de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y 30 mM de FeSO<sub>4</sub> al 10%, el muestreo para la medición de los parámetros se realizó cada 10 minutos durante media hora, en la figura 2.15 se observa la coloración del agua al ser agregado el reactivo y el catalizador. Una vez que concluyó el tiempo destinado para la reacción se reguló el pH a 7 para precipitar el hierro presente en el agua y poder filtrarla, finalmente se determinaron de los parámetros fisicoquímicos

después del proceso Fenton. Esta prueba se realizó a 200 mM de  $\text{H}_2\text{O}_2$  y 30 mM de  $\text{FeSO}_4$  al 10% con el fin de realizar una comparación con relación a los valores obtenidos de los parámetros a diferentes concentraciones y determinar cuál es la dosis óptima.



**Figura 2.15. Coloración de la muestra después de agregar 3mM  $\text{FeSO}_4$  y 100mM  $\text{H}_2\text{O}_2$**

Finalmente se realizó una última experimentación en la cual el agua decantada fue centrifugada y filtrada previo al proceso Fenton; se utilizó 100 mM de  $\text{H}_2\text{O}_2$  al 30% y 30 mM de  $\text{FeSO}_4$  al 10%, con un tiempo de reacción de 30 minutos y siguiendo los pasos finales, tal como se detallan en la segunda experimentación al concluir el tiempo de reacción.

Una vez finalizado el proceso Fenton se reguló el pH a 7 para lograr la decantación del hierro presente en la muestra tal como se muestra en la figura 2.16., luego de que el hierro se precipita, se realizó la filtración del agua tratada de manera manual con papel filtro.



**Figura 2.16. Precipitación del hierro a pH 7**

#### **2.2.14. Filtración con lecho orgánico**

Con la finalidad de conocer cuál sería el mejor lecho filtrante para la remoción de la materia orgánica mediante el uso de un filtro de lecho orgánico durante el tratamiento, se realizó una etapa de filtración inicial utilizando balsa y arena. Se llenaron dos filtros de 35 cm de altura y 8 de diámetro con los lechos mencionados y con la ayuda de un embudo de decantación de 500 se colocó gota a gota 250 ml de la muestra pura en la parte superior del filtro tal como se muestra en la figura 2.17. Para tener resultados óptimos se lavaron los filtros con agua potable y agua destilada eliminando así las impurezas presentes en el lecho.

Se realizó el análisis de los diferentes parámetros fisicoquímicos al agua efluente del filtro para así conocer en cual se había logrado una mejor reducción de las impurezas presentes en ésta.



**Figura 2.17. Filtración con lecho de balsa y lecho de arena**

# **CAPÍTULO 3**

## RESULTADOS

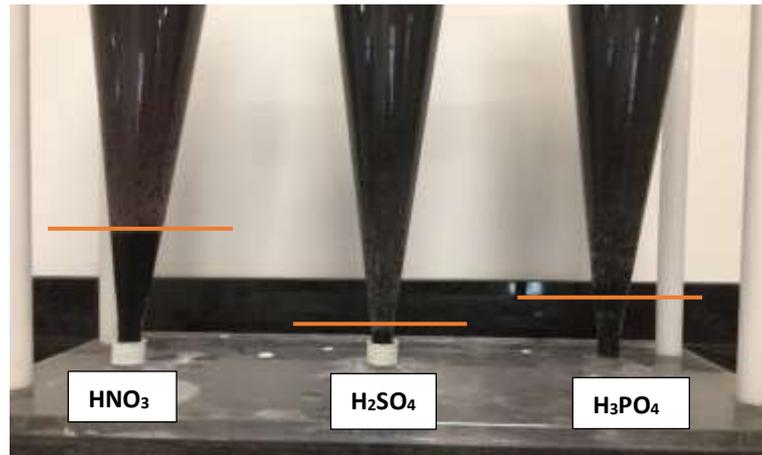
Para llevar a cabo este estudio se utilizó una muestra de agua proveniente de una industria cartonera, de la cual se determinaron los parámetros fisicoquímicos iniciales, éstos nos brindan información sobre el estado original en el que se encontraba la muestra antes de ser tratada. En la tabla 5 se muestran los valores iniciales de la caracterización de la muestra.

**Tabla 5. Valores de los parámetros iniciales del efluente**

Parámetro	Unidad	Resultado	Normativa
pH	--	5.1	6-9
Color	Abs	235	-
Turbidez	NTU	54000	-
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO <sub>5</sub> )	mg/l	12800	250
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/l	90300	500
Carbono Orgánica Total COT	mg/l	2668	-

### 3.1. Influencia del pH sobre el efluente

En la figura 3.1. se observa la cantidad de sólidos decantados después de regular el pH a 3, paso que se realiza para preparar el efluente antes del proceso Fenton. Se observa que en la parte inferior de los conos se encuentran los sólidos decantados del agua residual, mientras que en la parte superior se ubica el sustrato que es aquel con el que se va trabajar en el tratamiento.



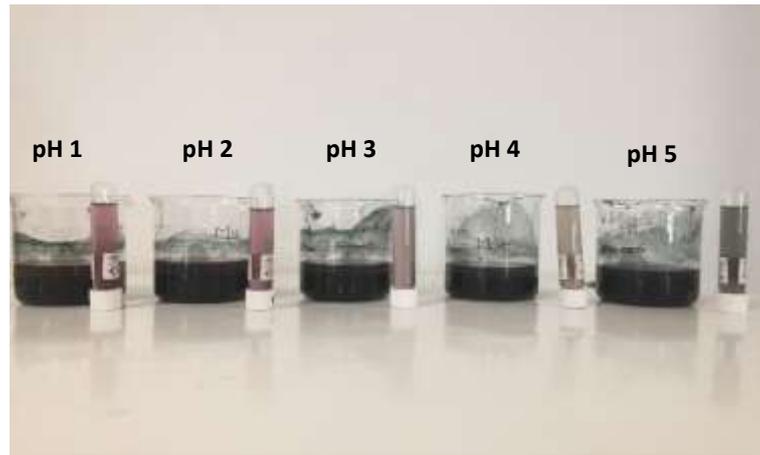
**Figura 3.1. Conos IMHOFF donde se puede observar el nivel de decantado con los diferentes ácidos.**

A continuación, en la tabla 6. se detallan los valores obtenidos de COT y turbidez del agua a pH 3, estos parámetros fueron medidos con la finalidad de conocer cuál es el ácido adecuado para acidificar el efluente.

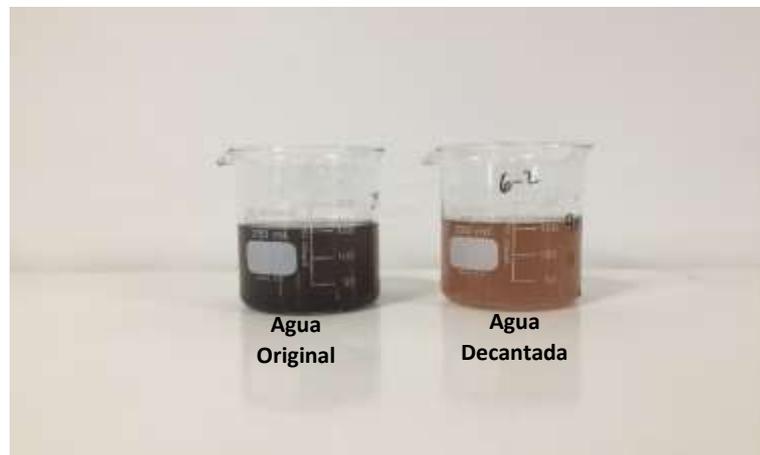
**Tabla 6. Valores de COT y Turbidez del efluente después de la acidificación.**

ÁCIDO	COT (mg/l)	TURBIDEZ (NTU)
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1785	343
H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	1771	298
HNO <sub>3</sub>	2505	251

Una vez determinado el ácido con el que se regularía el pH del efluente, se determinó cual sería el valor de pH al que se lograría una mayor decantación, en la figura 3.2. se pueden observar los niveles de decantado y la variación del color del sustrato con relación al pH. En la figura 3.3. se observa el cambio en la coloración del agua después de haber realizado la decantación a pH 3.

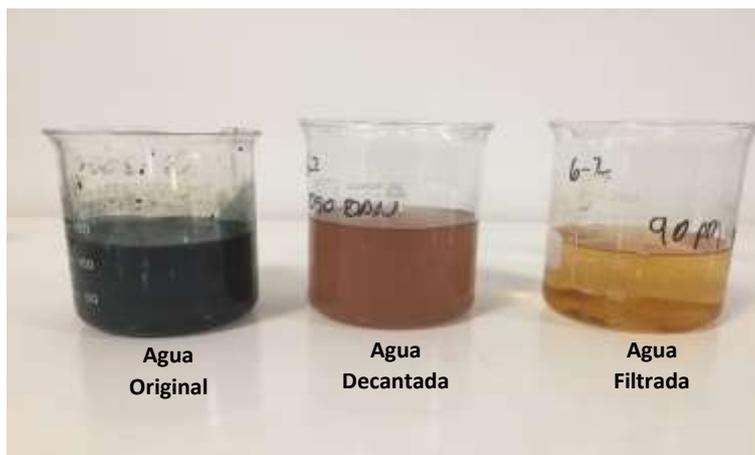


**Figura 3.2. Variación del color en el agua decantada con Ácido Nítrico al variar el pH entre 1 y 5.**



**Figura 3.3. Diferencia de coloración entre el efluente inicial y el agua decantada a pH 3.**

El efluente decantado fue filtrado, para llevarlo al proceso Fenton con la menor cantidad de sólidos suspendidos, como se observa en la figura 3.4. hay una clarificación del agua filtrada a comparación del agua decantada, se aprecia un cambio de color pasando de marrón a amarillo oscuro.



**Figura 3.4. Diferencia de coloración entre el agua de industria cartonera, agua decantada a pH 3 y agua filtrada.**

En la etapa de adecuación del efluente, previo al proceso Fenton, se obtuvieron los valores de los diversos parámetros fisicoquímicos que se presentan en la tabla 7.

**Tabla 7. Resultados de valores fisicoquímicos en las etapas de preparación del efluente.**

ETAPA	COT(mg/l)	DQO (mg/l)	TURBIDEZ (NTU)	COLOR (Abs)
Original	2668	90300	54000	23500
Decantada	2505	36420	337	2.63
Filtrada	1336	8475	217	2.05

### 3.2. Proceso Fenton

#### 3.2.1. Efecto a la variación de concentraciones de FeSO<sub>4</sub> y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

##### Efecto de la concentración de FeSO<sub>4</sub>

Los resultados obtenidos durante la reacción del proceso Fenton, variando las concentraciones de FeSO<sub>4</sub> y manteniendo constante la concentración de 200 mM de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, se muestran en la tabla 8. En ella se muestra cómo varía la mineralización de la materia orgánica conforme pasa el tiempo durante las 4 horas de reacción y en la tabla

9 los porcentajes de remoción con cada una de las dosificaciones de oxidante.

**Tabla 8. Valores de COT a diferentes dosis de FeSO<sub>4</sub> durante la reacción de Fenton.**

Tiempo (h)	1.5 mM FeSO <sub>4</sub>	3 mM FeSO <sub>4</sub>	4.5 mM FeSO <sub>4</sub>	6 mM FeSO <sub>4</sub>
0	2505	2505	2505	2505
1	1306	1289	1520	1224
2	1217	1099	1200	1100
3	1198	1131	1144	1048
4	970.6	1260	1116	1005

**Tabla 9. Porcentaje de mineralización durante el proceso Fenton**

Dosificación	COT (mg/l)	% Mineralización
1.5 mM FeSO <sub>4</sub>	970.6	73.34
3 mM FeSO <sub>4</sub>	960	66.94
4.5 mM FeSO <sub>4</sub>	1116	69.35
6 mM FeSO <sub>4</sub>	1005	72.40

#### Efecto de la concentración de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

Para la determinación de la dosis óptima de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> se llevó a cabo la reacción de Fenton durante 30 minutos, con un muestreo tomado cada 10 minutos. Los valores obtenidos de DQO durante el proceso Fenton se presentan en la tabla 10.

**Tabla 10. Valores de DQO a diferentes dosis de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> durante la reacción Fenton.**

Tiempo (min)	100mM H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	200mM H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>
10	7050	8525
20	6175	7800
30	5925	7150

A continuación, en las tablas 11 y 12 se muestran los resultados de cada una de las experimentaciones realizadas en función de la cantidad de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>.

**Tabla 11. Resultados de DQO en cada una de las etapas de tratamiento a 3 mM de FeSO<sub>4</sub> y 100 mM de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>**

Etapa	DQO (mg/l)
Efluente Inicial	90300
Decantada	36420
Filtrada	8475
Fenton	5925

**Tabla 12. Resultados de DQO en cada una de las etapas de tratamiento a 3 mM de FeSO<sub>4</sub> y 200 mM de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>**

Etapa	DQO (mg/l)
Efluente Inicial	90300
Decantada	36420
Filtrada	8475
Fenton	7150

Conociendo las dosis óptimas del catalizador y el oxidante se realizó una última experimentación, para conocer cuál era la variación de los parámetros fisicoquímicos conforme pasa el tiempo, se realizó un muestreo y se midieron los parámetros obteniendo los resultados que se detallan en la tabla 13.

**Tabla 13. Resultados de los parámetros fisicoquímicos durante la reacción con 3mM de FeSO<sub>4</sub> y 100mM de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>**

Tiempo	COT (mg/l)	DQO (mg/l)	TURBIDEZ (NTU)	COLOR (Abs)
10	1405	2225	12.1	1.069
20	1341	2175	13.2	1.071
30	1273	2450	20	1.12

En la tabla 14. se muestran los valores de los parámetros fisicoquímicos obtenidos en cada una de las etapas del tratamiento, desde el muestreo inicial hasta finalizar el proceso Fenton. Se debe

tener en cuenta que en esta etapa el agua decantada fue centrifugada, previo a la filtración, con la finalidad de disminuir la cantidad de sólidos suspendidos. En la figura 3.5 se puede observar el decantado después de haber realizado la centrifugación.

**Tabla 14. Resultados de los parámetros fisicoquímicos después de cada una de las etapas del tratamiento del efluente**

<b>Etapa</b>	<b>COT (mg/l)</b>	<b>DQO (mg/l)</b>	<b>TURBIDEZ (NTU)</b>	<b>COLOR (Abs)</b>	<b>DBO (mg/l)</b>
Efluente original	2668	90300	54000	23500	12800
Decantada	2505	36420	337	2.63	3642
Centrifugada	1481	4000	217	2.055	941
Fenton	1273	2450	20	0.973	989



**Figura 3.5. Sólidos decantados durante la centrifugación.**

Una vez concluido el proceso Fenton se llevó a cabo la decantación del catalizador regulando el pH a 7 con NaOH 1M, formándose flóculos los cuales decantaron tal como se puede observar en la figura 3.6.



**Figura 3.6. Decantación del catalizador ( $\text{FeSO}_4$ ) a pH 7.**

El sobrenadante fue filtrado a través de filtros de celulosa para jeringa con una porosidad de  $0.45 \mu\text{m}$ , separando así los sólidos suspendidos que aún se encontraban en éste. En la figura 3.7. se puede observar la variación de la coloración en cada una de las etapas del tratamiento.

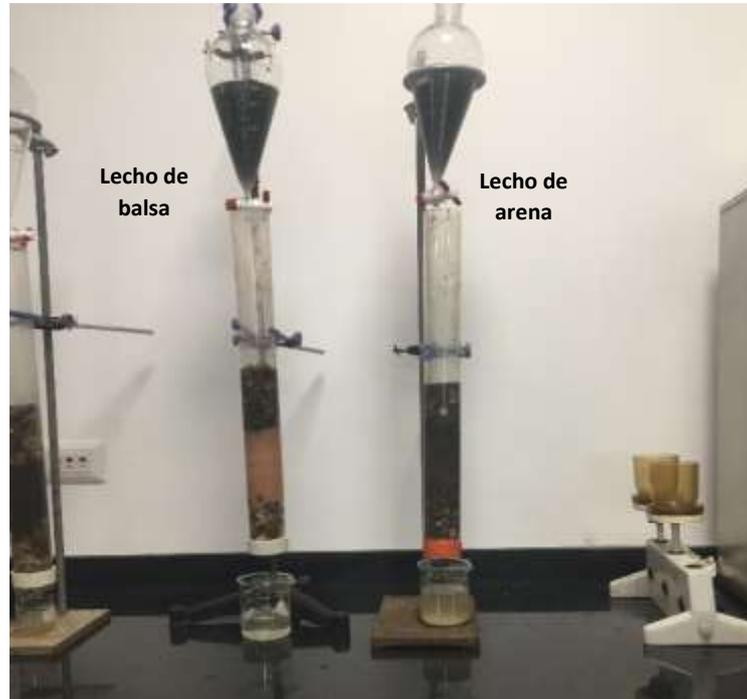


**Figura 3.7. Variación de coloración del efluente en cada una de las etapas del tratamiento. (Agua negra residual, agua decantada pH 3, agua del proceso Fenton, agua filtrada pH 7)**

### **3.3. Tratamiento con filtros naturales**

Para determinar cuál era el filtro adecuado a utilizar en el tratamiento se filtró el agua residual de industria cartonera por lecho de balsa y lecho de arena como se muestra en la figura 3.8. Al efluente de cada

uno de los filtros se les evaluaron los diferentes parámetros fisicoquímicos como se muestra en la tabla 15.



**Figura 3.8. Lecho de balsa y arena utilizados como filtros en el tratamiento**

**Tabla 15. Resultados de los parámetros fisicoquímicos del efluente de los filtros**

<b>LECHO</b>	<b>COT (mg/l)</b>	<b>DQO (mg/l)</b>	<b>DBO<sub>5</sub> (mg/l)</b>	<b>TURBIDEZ (NTU)</b>
Balsa	923.7	2714	450.75	44.4
Arena	993.4	2863	436.5	66.1

La coloración del efluente de cada uno de los filtros se muestra en la figura 3.9. en la cual se denota la clarificación del agua, teniendo en cuenta que para esta experimentación se utilizó el agua residual de la industria cartonera sin ningún tratamiento previo.



**Figura 3.9. Efluentes de filtros (Arena y Balsa)**

Conforme a estos resultados se decidió realizar el tratamiento con balsa al efluente de la última experimentación con 3 mM  $\text{FeSO}_4$  y 100 mM  $\text{H}_2\text{O}_2$ ; en la tabla 16 se muestran los resultados de cada uno de los parámetros fisicoquímicos determinados al agua original proveniente del efluente del proceso de la industria cartonera hasta el tratamiento final con lecho de balsa.

**Tabla 16. Resultados de los parámetros fisicoquímicos en cada una de las etapas del tratamiento del agua residual**

ETAPA	COT (mg/l)	DQO (mg/l)	TURBIDEZ (NTU)	COLOR (Abs)	DBO <sub>5</sub> (mg/l)
Original	2668	90300	54000	23500	12800
Decantada	2505	36420	337	2.63	3642
Centrifugada	1481	4000	217	2.055	941
Filtrada	1336	3700	14.4	0.532	989
Fenton	1273	2450	20	0.973	942
pH 7	1164	2000	15.3	0.223	225
Balsa	320.4	1200	12.7	0.163	587

# **CAPÍTULO 4**

## **ANÁLISIS DE RESULTADOS**

### **4.1. Determinación de las propiedades fisicoquímicas**

Con el fin de conocer cuál es el mejor tratamiento de la muestra se realizaron diferentes ensayos, determinando mediante estos cuales son los efectos de las variables que contribuyen a la biodegradación de la materia orgánica, para lo cual se utilizó inicialmente como referencia el índice de biodegradabilidad que corresponde a la relación  $DBO_5/DQO$ , éste índice nos da una idea del nivel de contaminación del agua.

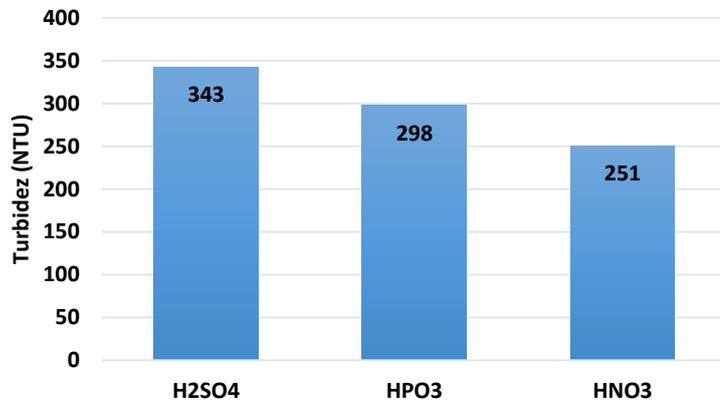
Si la relación del  $DBO_5/DQO$  es menor de 0.5, se tiene un efluente poco biodegradable, debido a que la materia orgánica posee baja disposición para ser oxidada por medios biológicos y es conveniente realizar un análisis fisicoquímico; mientras que si se tiene  $DBO_5/DQO$  mayor a 0.5, el efluente puede ser tratado por medio de un tratamiento biológico. Debido a que el índice de biodegradabilidad del agua en estudio es 0.14, no se emplea un tratamiento biológico como tratamiento primario, optando a la aplicación de métodos convencionales en combinación con el proceso Fenton para tratar el agua.

### **4.2. Influencia del pH en la muestra previo al tratamiento**

Como se muestra en la figura 3.1. se obtuvo 16 ml de sedimentos en el caso del ácido nítrico, 3 ml para el ácido sulfúrico y 6 ml para el ácido fosfórico; haciendo a su vez la determinación de la turbidez de la muestra para así conocer cuál era el ácido óptimo para regular el pH a la muestra. La turbidez se midió después de 1 hora de haber iniciado la decantación. Se obtuvieron los valores que se presentan en la figura 4.1.

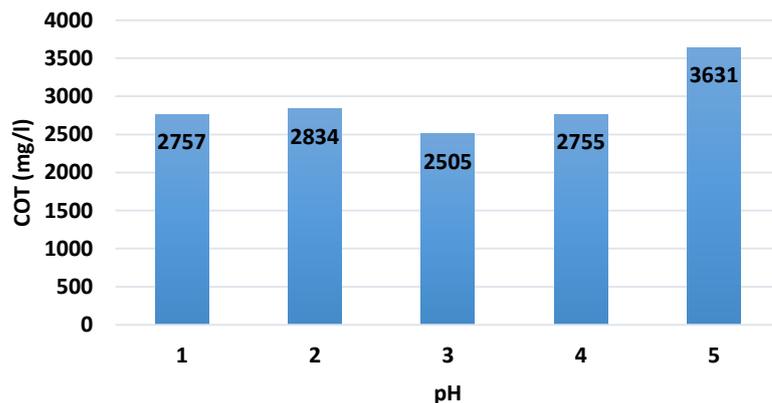
Con el ácido nítrico se registró una turbidez de 251 NTU versus 298 NTU del ácido fosfórico y 343 NTU del ácido sulfúrico, así como un volumen de decantado casi 3 veces mayor con el ácido nítrico en comparación con los

otros ácidos; en base a estos resultados se determinó que el ácido nítrico sería utilizado para regular el pH del agua a tratar.



**Figura 4.1. Variación de la turbidez al decantar ácido nítrico, sulfúrico y fosfórico**

Conociendo el ácido, se analizó el efecto ocasionado al modificar el pH de la muestra original, siendo el COT el parámetro fisicoquímico a evaluar. Se realizó la variación del pH de 1 a 5 con Ácido Nítrico al 50%, teniendo en cuenta que el pH inicial de la muestra es 5.1. Los resultados de COT obtenidos se presentan en la figura 4.2.



**Figura 4.2. Variación del COT en el agua decantada con Ácido Nítrico al variar el pH entre 1 y 5**

La muestra inicial poseía un COT de 2668 mg/l disminuyendo este valor a 2505 mg/l a un pH 3. Mediante el proceso de decantación se logró la reducción de la materia orgánica, acción que favorece la aplicación del

método Fenton, reduciendo la cantidad de  $\text{Fe}_2\text{SO}_4$  y  $\text{H}_2\text{O}_2$  que se debe agregar para lograr la reacción.

La DQO disminuyó de 90300 mg/l a 36420 mg/l, logrando una remoción de 59.66% en esta etapa. Es importante notar que desde el inicio del tratamiento de la muestra se logra una remoción significativa de materia orgánica, con una notable disminución de la cantidad de los sólidos suspendidos en la etapa de decantación, lo que es ideal para evitar la interferencia de estos en las reacciones de oxidación. La variación de la coloración con relación a los diferentes valores de pH se muestra en la figura 3.2., pasando de color negro a una coloración marrón oscuro.

El pH cuenta con un papel importante en las reacciones del proceso Fenton, la eficiencia de la remoción de la materia orgánica aumenta cuando las reacciones se desarrollan en un medio ácido. Al utilizar un pH excesivamente bajo (pH menor a 2) se produce la formación de  $\text{Fe}(\text{O}_2\text{H})^{2+}$  que reacciona lentamente con el  $\text{H}_2\text{O}_2$  de manera que se disminuye y obstaculiza la generación de radicales hidroxilos ( $\text{OH}^\cdot$ ), reduciendo el coeficiente de absorción de los complejos de hierro; mientras que a pH alto (mayor a 4) se da la precipitación del hierro apareciendo hidróxido de hierro, lo que conlleva a una disminución de la velocidad de reacción. [4].

El agua decantada se filtró antes de ser utilizada en el proceso Fenton, la coloración cambia de manera significativa tal y como se muestra en la figura 3.4. Inicialmente al ser decantada tiene un color marrón oscuro, pero luego de la filtración se presenta de un color amarillo opaco.

### **4.3. Proceso Fenton**

#### **4.3.1. Efecto a la variación de concentraciones de $\text{FeSO}_4$ y $\text{H}_2\text{O}_2$**

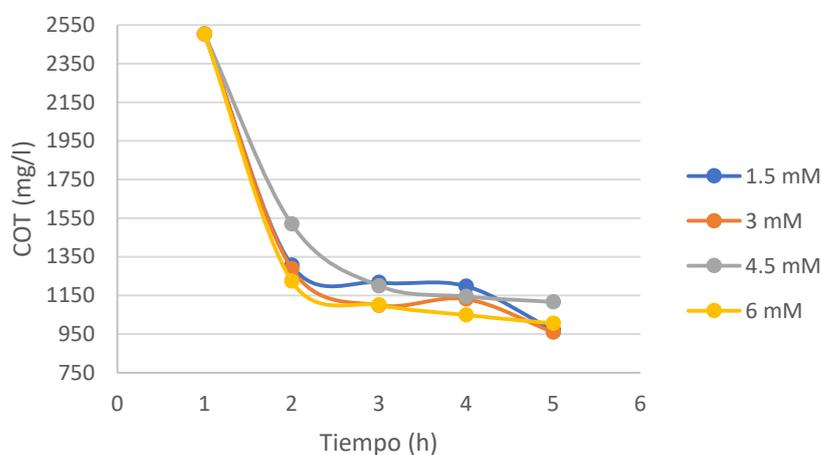
En esta sección se analizará el efecto de la variación de las concentraciones de  $\text{FeSO}_4$  y  $\text{H}_2\text{O}_2$  en el proceso Fenton, se debe tener en cuenta estos valores debido a que al reaccionar el  $\text{Fe}^{2+}$  con el  $\text{H}_2\text{O}_2$  se generan radicales hidroxilos en una reacción térmica muy rápida. Durante el proceso de la reacción, los radicales hidroxilos

continúan reaccionando con el  $\text{Fe}^{2+}$  que se encuentra remanente, hasta que todo el  $\text{Fe}^{2+}$  se convierte a  $\text{Fe}^{+3}$ , así como también oxidando la materia orgánica presente.

En general el proceso Fenton es de carácter catalítico, razón por la cual es necesario que el  $\text{H}_2\text{O}_2$  se encuentre en exceso, de no ser así, el  $\text{Fe}^{+3}$  podría reducirse al reaccionar con el  $\text{H}_2\text{O}_2$  y formar nuevos iones  $\text{Fe}^{2+}$  y una mayor cantidad de radicales hidroxilos, esto se lo conoce como proceso Fenton-like y no es ideal caer este debido a que es más lento que el proceso Fenton y permite la regeneración del  $\text{Fe}^{+2}$ . [4]

#### Efecto de la concentración de $\text{FeSO}_4$

Las dosis utilizadas en esta etapa se detallan en la tabla 3. En la figura 4.3. se observa la variación los valores de COT con respecto al tiempo de reacción a las diferentes concentraciones de  $\text{FeSO}_4$ .



**Figura 4.3. Variación del COT a diferentes dosis de  $\text{FeSO}_4$  (1.5mM, 3mM, 4.5mM, 6Mm) durante un tiempo de 4 horas**

Se visualiza notablemente que en los cuatro casos durante la primera y segunda hora se da una disminución brusca en los valores de COT mientras que entre la segunda y tercera hora hay un sesgo en todas las dosificaciones. En la tabla 9., se muestra el porcentaje

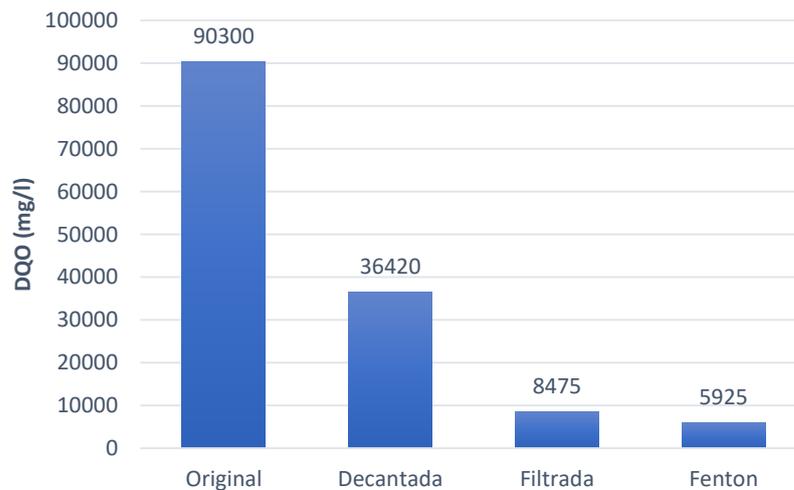
de remoción que se logró en cada una de las dosificaciones después de concluir el proceso Fenton. De acuerdo con esta experimentación la dosis óptima para lograr una disminución del COT es de 3 mM de  $\text{FeSO}_4$ .

Las variaciones presentadas en cada una de las dosis es un indicador de cómo se comporta la reacción con respecto a la cantidad de catalizador agregada a la muestra, se determina que a una dosis de  $\text{H}_2\text{O}_2$  y 3 mM de  $\text{FeSO}_4$  limitante se logra una mayor degradación de materia orgánica; en el caso de la dosis de 4.5 mM y 6 mM de  $\text{FeSO}_4$  se observa que después del sesgo, entre la tercera y cuarta hora, poseen un valor de COT mayor que el de la dosis de 3 mM, esto se debe a que se produce una reacción Fenton-like [26], debido a que con el paso del tiempo se produce una mineralización de la materia orgánica, pero de manera lenta y al acabarse el catalizador, ésta se detiene es por esto que a menores cantidades de catalizador hay una menor mineralización de la materia orgánica.

#### **4.3.2. Efecto del filtrado y proceso Fenton a concentraciones de 100 mM y 200 mM de $\text{H}_2\text{O}_2$**

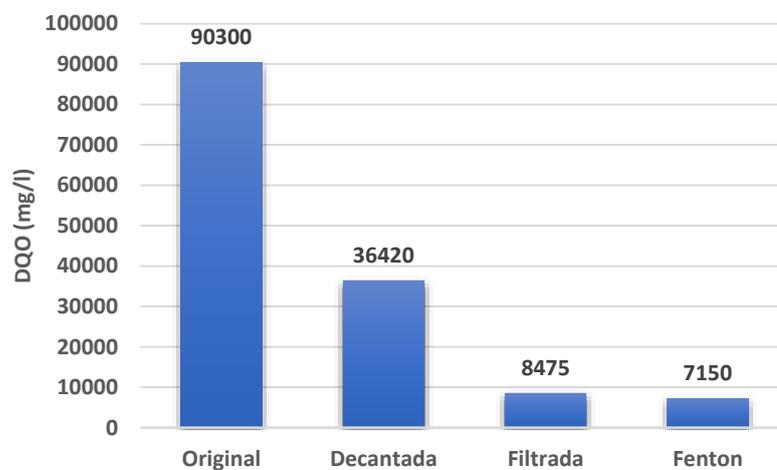
En esta sección se presenta el análisis de la variación de la DQO con relación a los milimoles de  $\text{H}_2\text{O}_2$  utilizados para la reacción durante el proceso Fenton; debido a que es importante la cantidad del oxidante, se utilizan dosis de 100 mM y 200 mM de  $\text{H}_2\text{O}_2$  con una cantidad de catalizador de 3 mM de  $\text{FeSO}_4$ .

Como se muestra en la figura 4.4, el proceso Fenton en el que se emplearon 3 mM de  $\text{FeSO}_4$  y 100 mM de  $\text{H}_2\text{O}_2$ , se inicia con una DQO de 6475 mg/l y finaliza con un DQO de 5800 mg/l logrando una remoción de 30.09%, pero en comparación con el DQO inicial del agua original se obtuvo una disminución de la DQO de 90300 mg/l hasta una DQO de 5800 mg/l logrando una remoción del 93.57%.



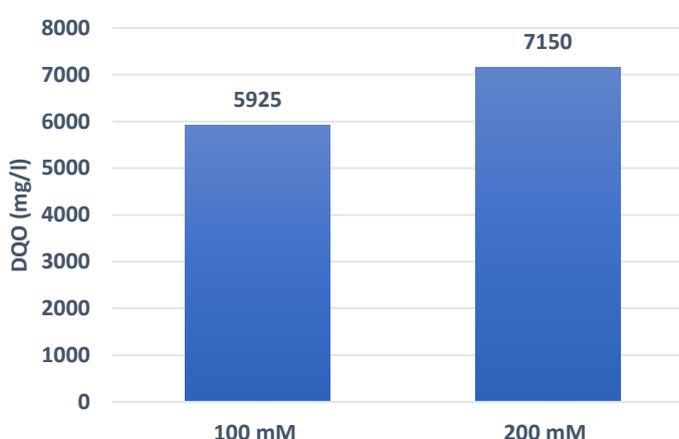
**Figura 4.4. Variación del DQO en cada una de las etapas a 3mM de FeSO<sub>4</sub> y 100mM de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>.**

En el proceso Fenton, en el cual se utilizó 3 mM de FeSO<sub>4</sub> y 200 mM de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, se inicia con un DQO de 8475 mg/l y finaliza con un DQO de 7150 mg/l logrando una remoción de 15.63%, pero en comparación con el valor de DQO inicial del agua original, se obtuvo una disminución de la DQO de 90300 mg/l hasta un valor de la DQO de 7150 mg/l logrando una remoción del 92.08%. En la figura 4.5 se observan las variaciones del DQO con relación a cada una de las etapas del tratamiento.



**Figura 4.5. Variación del DQO en cada una de las etapas a 3mM de FeSO<sub>4</sub> y 200mM de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>**

Conforme a estos resultados se determina que en la reacción de Fenton con 100 mM de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> se logra una remoción del 93.57% mientras que a 200 mM de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> de 92.08%, como se muestra en la figura 4.6. Debido a que la DQO es el parámetro que determina el grado de remoción de materia orgánica, se establece que la dosis para la reacción que debe llevarse a cabo es 3 mM de FeSO<sub>4</sub> y 100 mM de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>.

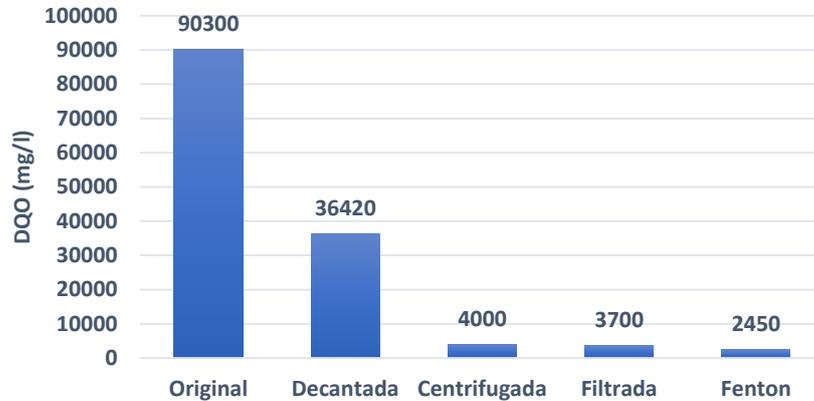


**Figura 4.6. Valores de DQO obtenidos al terminar el proceso Fenton con 3mM FeSO<sub>4</sub> + 100mM H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> Y 3mM FeSO<sub>4</sub> + 200mM H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>**

Concluido el proceso Fenton se neutralizó con NaOH 1M con la finalidad de precipitar el catalizador y que el resultado no se vea afectado por la presencia de este, al agregar NaOH se forman flóculos como se muestra en la figura 4.6., los cuales se depositan en el fondo del vaso.

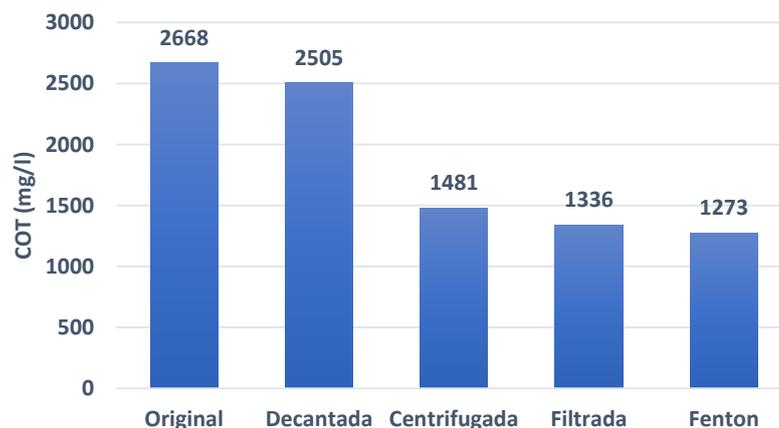
Finalmente se realizó una experimentación con la dosis ideal para el proceso Fenton, 3 mM de FeSO<sub>4</sub> y 100 mM de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Además, para lograr disminuir aún más la cantidad de sólidos suspendidos en la muestra previo al proceso Fenton, se realizó una centrifugación como etapa previa a la filtración, de manera que el sustrato de la centrifugación se volvió importante para el estudio con relación a los diferentes parámetros fisicoquímicos a medir. En la figura 4.7. se

muestra como disminuye la DQO con relación a cada una de las etapas.



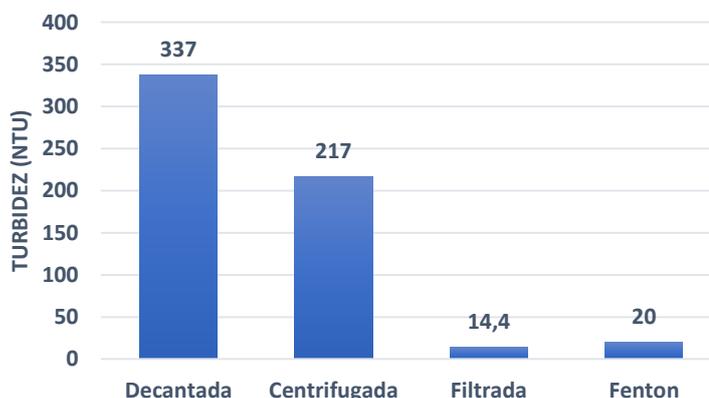
**Figura 4.7. Valores de DQO obtenidos al terminar el proceso Fenton con 3mM FeSO<sub>4</sub> + 100mM H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>**

El valor de la DQO inicial de la muestra es de 90300 mg/l y al finalizar el proceso es de 2450 mg/l logrando una remoción del 97.28%. Debido a que es en esta reacción en la que se utilizan las dosis determinadas como óptimas y se obtiene un porcentaje de remoción mayor, se midieron los parámetros tales como COT, Turbidez y color cuyos resultados se muestran en las figuras a continuación:



**Figura 4.8. Variación del COT en cada una de las etapas del tratamiento**

En la figura 4.8 se observa que el COT inicial del agua residual fue de 2668 mg/l y al finalizar la reacción del proceso Fenton se obtuvo un valor de COT de 1273 mg/l logrando una mineralización del 52.28% de la materia orgánica.



**Figura 4.9. Variación de la turbidez en cada una de las etapas del tratamiento.**

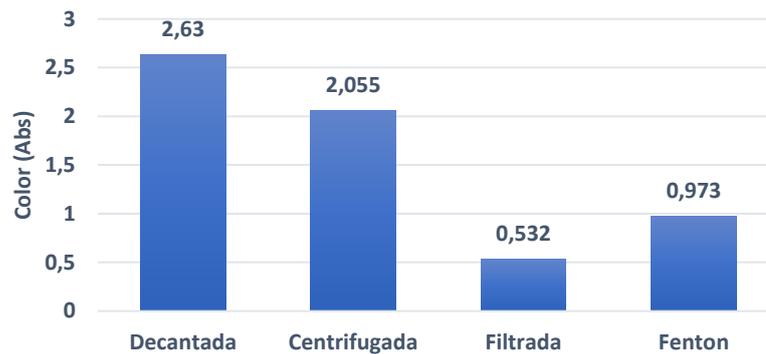
Como desde un inicio se ha descrito, el agua proveniente de la industria cartonera es rica en sólidos suspendidos, es por eso que se ha llevado a cabo este estudio, con el fin de demostrar la influencia de estos, se midió la turbidez a lo largo del proceso y tal como se presenta en la figura 4.9, se logró una disminución del 94.06% de la turbidez con respecto a su valor inicial.

No hay una diferencia significativa entre el agua decantada y el agua centrifugada, esto se debe a que, aunque se buscaba con la centrifugación disminuir en mayor cantidad los sólidos suspendidos en el agua, no es representativa la cantidad que se logró decantar tal como se observa en la figura 3.5. Sin embargo, los resultados obtenidos de la filtración si muestran una diferencia evidente, esto se debe a que la filtración se la llevó a cabo con filtros de celulosa para jeringa de 0.45  $\mu\text{m}$  de porosidad, lo cual garantizó que aquellos sólidos que no se decantaron hayan sido retenidos.

La turbidez después de la reacción Fenton subió, esto se debe a que, durante la reacción entre los radicales hidroxilos y la materia

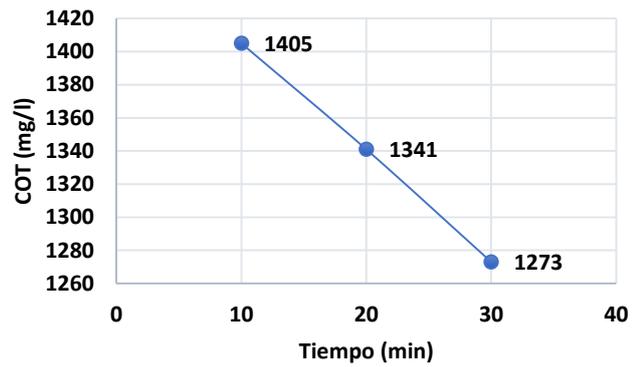
orgánica, se forman flóculos en el agua, al ser la turbidez un parámetro que se ve afectado por la cantidad de sólidos suspendidos eleva su valor, el cual es un efecto esperado siendo un indicativo de que se logró la degradación de la materia orgánica durante la reacción del proceso Fenton.

Otro parámetro que permitió corroborar la influencia de los sólidos suspendidos en los resultados obtenidos es el color, el cual está relacionado directamente con la turbidez, en cuanto menor sea la turbidez menor será el color debido a que el haz de luz puede penetrar mejor por la muestra de agua y no verse afectado por la interferencia de los sólidos suspendidos. En la figura 4.10 se observa los valores obtenidos de color con relación a cada una de las etapas del proceso.

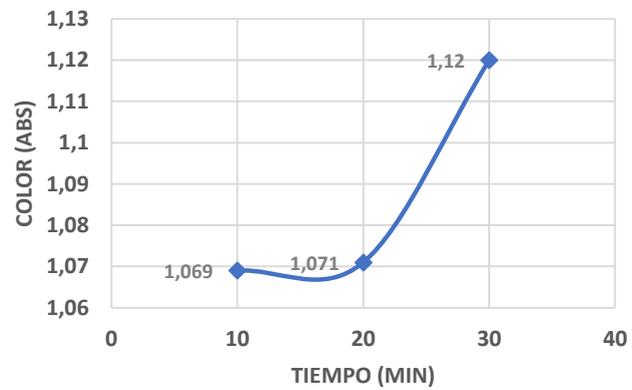


**Figura 4.10. Variación del color en cada una de las etapas del tratamiento**

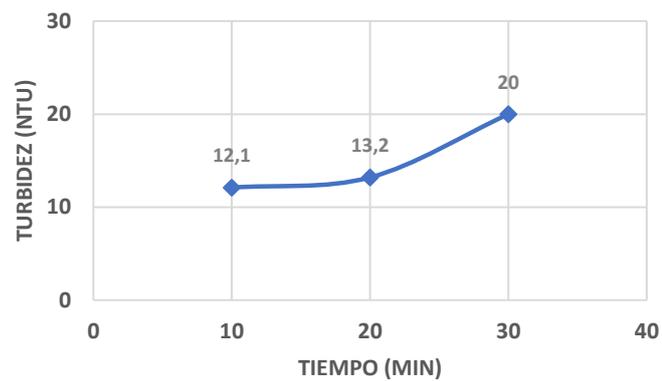
La reacción se llevó a cabo durante 30 minutos y con la finalidad de conocer cuál es el comportamiento de los parámetros, se hizo un muestreo cada 10 minutos. En las gráficas 4.11, 4.12, 4.13 y 4.14, podemos ver el comportamiento del DQO, COT, DBO<sub>5</sub>, color y turbidez con relación al tiempo.



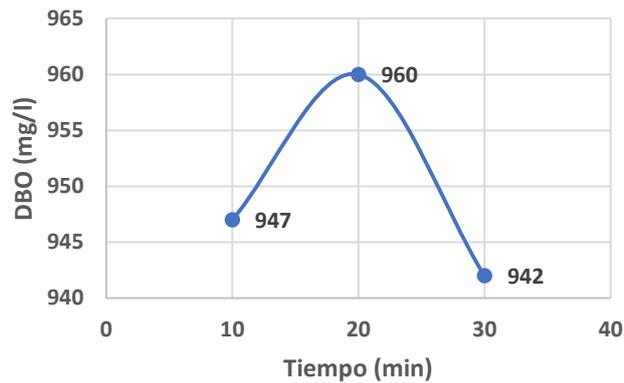
**Figura 4.11. Variación de turbidez con respecto al tiempo durante la reacción Fenton**



**Figura 4.12. Variación del color con respecto al tiempo durante la reacción Fenton**



**Figura 4.13. Variación de la turbidez con respecto al tiempo durante la reacción Fenton**



**Figura 4.14. Variación de la DBO<sub>5</sub> con respecto al tiempo durante la reacción Fenton**

Los valores correspondientes a COT disminuyen conforme ocurre la reacción, lo que indica que disminuyó la materia orgánica presente en el agua tratada; mientras que en el caso de la turbidez y el color sus valores aumentan, esto se debe a la formación de flóculos por la reacción de los radicales hidroxilos con la materia orgánica, aumentando la cantidad de sólidos suspendidos.

#### **4.3.3. Efecto del tiempo de reacción**

Se experimentó con una dosificación del H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> de cada 30 minutos durante 2 horas mientras que en el otro caso se empleó una dosificación total de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y FeSO<sub>4</sub> pero en un tiempo de reacción de 30 minutos. El porcentaje de remoción durante ambos procesos sin importar el tiempo de reacción está entre el 50 y 60% de la materia orgánica, este porcentaje es únicamente considerando la remoción durante la reacción es decir con los valores de DQO al inicio y al final de la misma.

Conforme a este resultado, se determina que el tiempo de reacción no es un parámetro a considerarse como relevante para determinar la cantidad de remoción. La velocidad de la reacción se ve afectada únicamente por la relación de las concentraciones de FeSO<sub>4</sub> con

respecto al  $\text{H}_2\text{O}_2$ , es decir que si las dosis utilizadas en el proceso son las correctas se evita una reacción Fenton-like.

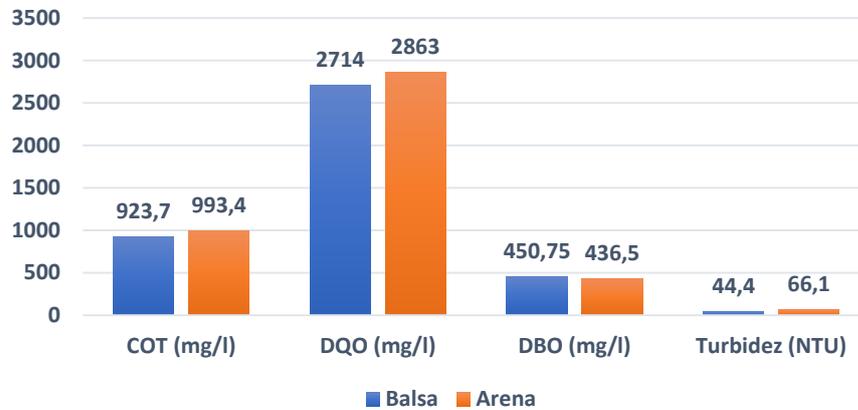
La reacción del proceso Fenton tiene una constante de velocidad de segundo orden con un valor de  $76,5 \text{ Lmol}^{-1}\text{s}^{-1}$ , esta constante indica la velocidad con la que se producen radicales hidroxilos y  $\text{Fe}^{+3}$  durante la reacción, pero, en caso de que exista un exceso de catalizador se dará la reacción Fenton-like la cual posee una constante de velocidad de  $2000 \text{ Lmol}^{-1}\text{s}^{-1}$  lo que indica la velocidad de reacción es mucho más rápida con respecto a la regeneración de  $\text{Fe}^{+2}$  esto afecta la reacción del proceso Fenton porque el  $\text{Fe}^{+3}$  reacciona con los radicales hidroxilos que son los encargados de la degradación de la materia orgánica.

#### **4.4. Tratamiento con filtros de lecho natural**

Debido a los elevados costes que posee el tratamiento del agua residual se ha estudiado la aplicación del tratamiento con filtros de lecho natural realizando una experimentación en la que se determinó el COT, DQO, Turbidez y Color tanto para el filtro de balsa y de arena; como se muestra en la figura 4.15 los valores obtenidos para la balsa en cada uno de los parámetros son menores con respecto a los de la arena, siendo el COT y la DQO los parámetros más relevantes. Con respecto al valor de DQO inicial de  $90300 \text{ mg/l}$  se obtuvo una DQO de  $2714 \text{ mg/l}$  logrando una remoción del 96.99% mientras que la remoción final de la arena es  $2863 \text{ mg/l}$  logrando una remoción del 96.82%. Los valores obtenidos de remoción son muy próximos, siendo el tiempo de retención en la balsa es menor que en la arena.

Es importante tener en cuenta que se utilizó el agua original del efluente de la industria cartonera la cual poseía una alta cantidad de sólidos suspendidos, esto provoco que ambos lechos se llenaran de material orgánico en la parte superior lo que es una limitante en cuanto a su capacidad filtrante con respecto al tiempo, a pesar de esto los 500 ml de la

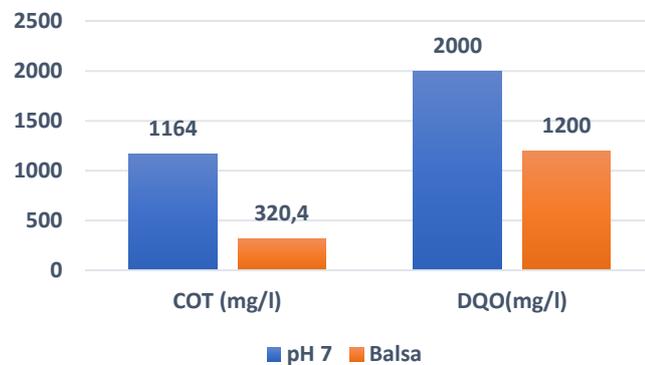
muestra se filtraron en un tiempo de 16 min para el filtro de balsa y 23 minutos en el filtro de arena.



**Figura 4.15. Valores de COT, DBO<sub>5</sub>, DQO y turbidez del efluente de los filtros**

Se debe tener en cuenta que la coloración del agua cambia tal como se muestra en la figura 3.9, en ambos casos se da una clarificación del agua, pero es en el caso de la arena en la que se ve una coloración más oscura lo cual confirma que en ella existe mayor turbidez tal y como se evidencia en la figura 4.15.

Conforme a esto se decidió utilizar el tratamiento con filtros una vez concluido el proceso Fenton, con el fin de lograr una remoción final de la materia orgánica presente en el efluente.



**Figura 4.16. Valores de COT y DQO del efluente a pH 7 y filtro de lecho con balsa**

En la Figura 4.16 se observa que la DQO del agua a pH 7 (pH al que decanta el catalizador) es de 2000 mg/l mientras que la DQO del agua después de pasar por el filtro de balsa es de 1200 mg/l, removiendo el 40% en esta etapa. Con relación al valor inicial de la DQO del agua residual de la industria cartonera, cuyo valor es de 90300 mg/l la remoción lograda al finalizar el tratamiento es de 98.67%.

Una vez obtenidos los valores del proceso combinado, se determinaron valores de DBO y DQO que no cumplen con los parámetros de descarga al sistema de alcantarillado, para lograr los resultados esperados, existe la posibilidad de realizar un tratamiento biológico al agua, posterior a la aplicación del proceso en mención. Este tratamiento solo puede ser posible con un índice de biodegradabilidad mayor a 0,4, que resulta de la relación  $DBO_5/DQO$ . El agua obtenida luego del proceso presentó un índice de biodegradabilidad de 0,49, lo que hace factible la aplicación de este tipo de tratamiento adicional [23].

# CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

## Conclusiones

Se realizó una combinación de procesos de decantación y filtración, al pasar el agua por el proceso de decantación, se realizó una disminución de pH de 5,1 a 3, y se obtuvo una remoción de COT, DQO y DBO<sub>5</sub> de 6%, 59,6% y 71,5% respectivamente, además se observaron mejoras en el color y turbidez, en porcentajes de 99% para ambos parámetros.

Al filtrar la muestra, luego de la decantación, se eliminó una parte de la materia orgánica presente, obteniendo una disminución de COT, DQO y DBO<sub>5</sub> de 46%, 89,8% y 73%, existiendo una variación significativa entre decantación y filtración, estos procesos previos fueron realizados con el fin de tener agua más limpia para que el proceso Fenton sea efectivo y presente un mayor porcentaje de remoción.

Continuando con el agua a un pH 3, se llevó a cabo el proceso Fenton, a este medio ácido, y con materia orgánica removida previamente, se utilizó menor cantidad de reactivos H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y FeSO<sub>4</sub>.

Experimentalmente se obtuvo que las dosis que mayor porcentaje de remoción presentaban en el proceso Fenton fueron de 100 mM de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y 3 mM de FeSO<sub>4</sub>. Posteriormente se determinó que el porcentaje de disminución de COT, DBO<sub>5</sub> y DQO, luego de la aplicación del proceso Fenton con referencia al agua filtrada, fue de 4%, 5% y 34% respectivamente, no se evidencia un cambio significativo en sus parámetros.

Al elevar el pH de 3 a 7 mediante la adición de NaOH, se formó un precipitado, el cual mediante filtración se lo eliminó, llevándose consigo materia orgánica, disminuyendo los valores de COT, DQO y DBO<sub>5</sub>, se observaron mejoras en la apariencia del agua, reflejándose en los resultados obtenidos de análisis de color y turbidez, los cuales tuvieron un porcentaje de remoción de 77% y 23% respectivamente.

Para finalizar el proceso se pasó a la muestra por un filtro conformado de balsa, este filtro presentó un resultado final de DBO, COT, y DQO que ha disminuido en total en comparación con el agua inicial un 95%, 88% y 98,6% respectivamente.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el proceso Fenton, en combinación con los métodos convencionales, ha presentado resultados favorables en cuanto a remoción de contaminantes presentes en el agua, de igual manera mejoró parámetros físicos de color y turbidez. Sin embargo, a pesar del porcentaje de remoción obtenido, no se logró llegar a los parámetros de descarga permitidos por la Normativa Ambiental.

## **Recomendaciones**

Una vez finalizado el proceso de tratamiento de aguas mediante procesos convencionales combinado con el método Fenton, se recomienda:

- Para el efluente que proviene de la industria cartonera, es necesario iniciar el proceso de tratamiento con la decantación, esto ayudará a eliminar carga orgánica presente, facilitando los procesos siguientes a aplicar.
- Para la realización del proceso Fenton se debe utilizar las concentraciones de reactivo de 100 mM de  $H_2O_2$  y 3 mM de  $FeSO_4$ .
- Realizar constantes monitoreos sobre la remoción de carga orgánica, mediante análisis de COT y DQO, determinando la viabilidad del método mientras se efectúa el proceso.
- Para aguas altamente contaminadas como las de la industria cartonera, se debe realizar sedimentación previa, de tal manera que pueda disminuirse la carga orgánica y puedan encontrarse dentro de los parámetros requeridos para este tipo de tratamiento.
- Para el uso de filtros, se debe remover la mayor cantidad de materia orgánica presente previo a su uso, con el objetivo de preservar la eficacia del mismo, evitando que se forme de manera inmediata una capa de impureza en la superficie, obstruyendo el paso del agua para ser limpiada, su uso debe ser monitoreado, analizando sus condiciones, y efectuando mantenimiento en caso de que sea requerido.
- Realizar tratamientos adicionales, como el tratamiento biológico, con el fin de lograr que el agua tratada cumpla con las especificaciones de la Normativa Ambiental, pudiendo descargarlas al sistema de alcantarillado sin ocasionar contaminación en el mismo.

## REFERENCIAS

- [1] Aguado Alonso, José, Editor. Tratamientos Avanzados de Aguas Residuales Industriales. Universidad Rey Juan Carlos de Madrid, Madrid, 2012. 182 páginas.
- [2] Aguilar. M. (2002). Coagulación y Floculación. En M. Aguilar, *Tratamiento Físico-Químico de Agus Residuales* (págs. 35-36). Murcia: Universidad de Murcia.
- [3] Cyril Gomella, H. G. (1977). Coagulación. En H. G. Cyril Gomella, *Tratamiento de aguas para abastecimiento público* (págs. 63-71). Barcelona, España: Editores Técnicos Asociados.
- [4] Doménech, X., Jardim, W. F., & Litter, M. I. (2001). Procesos avanzados de oxidación para la eliminación de contaminantes. Eliminación de Contaminantes por Fotocatálisis Heterogénea. Editor: Miguel Blesa, Red CYTED VIII-G, 3, 26
- [5] El Universo. (16 de mayo de 2017). *Inec midió la calidad de agua que consumen los ecuatorianos*. Obtenido de El Universo: <http://www.eluniverso.com/noticias/2017/05/16/nota/6186154/inec-midio-calidad-agua-que-consumen-ecuatorianos>
- [6] Galvin, R. M. (2003). filtración. En R. M. Galvín, *Fisicoquímica y Microbiología de los medios acuático. Tratamiento y control de calidad de aguas*. (págs.175-179). Madrid: Díaz de Santos.
- [7] González Betty, X. C. (2010). Caracterización del cultivo de balsa en la provincia de Los Ríos-Ecuador. *Ciencia y Tecnología*, 7-11.
- [8] Himmelblau, D. (2002). Principios básicos y cálculos en la Ingeniería Química. En D. Himmelblau, *Principios básicos y cálculos en la Ingeniería Química* (pág. 236). México: Pearson Educación.
- [9] INEC. (2015). *Estadística de Información Ambiental Económica de Gobiernos Autónomos Descetralizados Municipales. Agua y Alcantarillado*. Obtenido de [http://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Encuestas\\_Ambientales/Municipios\\_2015/Presentacion\\_GAD\\_Municipales\\_Gestion\\_Agua\\_Alcantarillado\\_2015.pdf](http://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Encuestas_Ambientales/Municipios_2015/Presentacion_GAD_Municipales_Gestion_Agua_Alcantarillado_2015.pdf)

- [10] J. Glynn Henry, G. W. (1999). Ingeniería Ambiental. En G. W. J. Glynn Henry, *Ingeniería Ambiental* (págs. 395-402). México: Prentice Hall Hispanoamérica S.A.
- [11] Jaramillo, Á. O. (2005). *Bioingeniería de aguas residuales*. Bogotá: Acodal.
- [12] Jurado, J. (2009). Degradación de un efluente textil real mediante procesos Fenton y Foto-Fenton. Universitat Politècnica de Catalunya. Tesis Máster I.A.
- [13] Kay Teschke, P. D. (1998). Industria del papel y de la pasta del papel En J. M. Stellman, *Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo* (págs. 2, 6-10). Madrid : Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales.
- [14] Lapeña, M. R. (1990). Tratamiento de aguas industriales, aguas de proceso y residuales. En M. R. Lapeña, *Tratamiento de aguas industriales, aguas de proceso y residuales* (págs. 142-149). Barcelona: Marcombo S.A.
- [15] Lozano, C. (21 de Diciembre de 2012). *Grafix*. Obtenido de <http://notigrafix.com/?p=3658>
- [16] Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente. (2007). *Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes*. Obtenido de Carbono Orgánico Total: <http://www.prtr-es.es/Carbono-organico-total-COTComo-C,15663,11,2007.html>
- [17] Pozas Terrado, P. (2009). Papel Reciclado: Consumo responsable. En P. Pozas Terrado, *Voces del Planeta* (págs. 57-59). Madrid: Aebius.
- [18] Ramalho, R. S. (2003). *Introduction to wastewater treatment Processes*. Londres: Academic Press, Inc.
- [19] Ruiz, Á. A. (2015). La biofiltración, una alternativa para la potabilización del agua. *Redalyc.org*, 63-65.
- [20] SIPRO. (Abril de 2016). *Reporte del Índice de producción de la Industria Manufacturera*. Obtenido de [http://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas\\_Economicas/IPI-M/Abril-2016/Reporte\\_IPI-M%20Abril%202016.pdf](http://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas_Economicas/IPI-M/Abril-2016/Reporte_IPI-M%20Abril%202016.pdf)

- [21] Stanley, M. (2007). Tratamiento de agua para uso industrial. En M. Stanley, *Introducción a la Química Ambiental* (págs. 207-215). Madrid: Reverté S.A. MIPRO. (25 de Octubre de 2016). *Estado de la Industria de Pulpa, papel y Cartón*. Obtenido de <http://www.proecuador.gob.ec/wp-content/uploads/2016/11/ESTADO-DE-LA-INDUSTRIA-DE-PULPA-PAPEL-Y-CARTON-MIPRO-min.pdf>
- [22] Vian Ortuño, A. (2006). El agua como materia prima. En A. Vian Ortuño, *Introducción a la Química Industrial* (págs. 95-97). Barcelona: Reverté S.A.
- [23] Vidal, F. R. (2003). Procesos de potabilización del agua e influencia del tratamiento de ozonificación. En F. R. Vidal, *Procesos de potabilización del agua e influencia del tratamiento de ozonificación* (págs. 204-209). Madrid : Díaz de Santos.

## GLOSARIO DE TÉRMINOS

**Acidez:** Acuidad que poseen los ácidos la cual se ve reflejada con un sabor agrio, liberación de hidrogeno o un pH menor que 7.

**Alcalinidad:** Medida de la capacidad de una sustancia para neutralizar ácidos.

**Biodegradable:** Que puede descomponerse en elementos químicos naturales por la acción de agentes biológicos, como el sol, el agua, las bacterias, las plantas o los animales.

**Biopelícula:** Un conjunto de biomasa con microcirculación, que permite a las comunidades bióticas complementarse nutricionalmente.

**Cáustico:** Que quema y destruye los tejidos orgánicos.

**Celulosa:** Sustancia sólida, blanca, amorfa, inodora y sin sabor, e insoluble en agua, alcohol y éter, que constituye la membrana celular de muchos hongos y vegetales; se emplea en la fabricación de papel, tejidos, explosivos, barnices, etc.

**Coagulación:** Hacer que se solidifique una sustancia albuminosa disuelta en un líquido.

**Coagulante:** Que provoca o acelera la coagulación de la sangre.

**Coloidal:** Es un sistema formado por dos o más fases, normalmente una fluida otra dispersa en forma de partículas generalmente sólidas muy finas.

**Corrosión:** Destruir progresivamente una cosa penetrando de afuera hacia adentro; especialmente destruir [ciertos agentes] los metales u objetos de metal.

**Criba:** Instrumento para cernir o cribar que está compuesto por un aro o un marco al cual está asegurado un cuero o un tejido agujereado o una tela metálica fina con el fin de separar lo más fino de la harina o de otras sustancias.

**Depuración:** Eliminación de la suciedad, impurezas o sustancias nocivas de una cosa.

**Efluente:** Líquido residual que fluye de una instalación.

**Hidroestática:** Es una rama de la hidráulica que estudia los incompresibles líquidos y gases en estado de equilibrio.

**Hidrólisis:** Descomposición de sustancias orgánicas por acción del agua.

**Interfase:** Intervalo entre dos fases sucesivas

**Lignina:** Sustancia natural que forma parte de la pared celular de muchas células vegetales, a las cuales da dureza y resistencia.

**Manufactura:** Producto elaborado con las manos o con ayuda de máquinas, a partir de una materia prima.

**Sedimento:** Conjunto de partículas sólidas que queda depositado en el fondo del recipiente que contiene un líquido.